

Endbericht

Beschichtungsverfahren zur Sanierung von Abwasserschächten

*- Studie zu Qualitätseinflüssen und Einsatzgrenzen
anhand von Praxis- und Laboruntersuchungen -*



**Bosseler, B.; Puhl, R.
Gelsenkirchen, Februar 2005**

Fördernde Stelle



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

Bearbeitung



IKT - Institut für Unterirdische Infrastruktur
Exterbruch 1
45886 Gelsenkirchen

Wissenschaftliche Leitung

Dr.-Ing. Bert Bosseler

Projektleitung und Bearbeitung

Dipl.-Ing. René Puhl

Dipl.-Ing. A. Bogatyrev

Dipl.-Ing. (FH) C. Bera

Dipl.-Ing. (FH) N. Aktas

Dipl.-Ing. (FH) R. Fürst

Wir danken allen projektbeteiligten Netzbetreibern für die weitreichende Unterstützung im Rahmen der zahlreichen Sanierungsmaßnahmen:

Herr Dipl.-Ing. F. Großklags	Tiefbauamt der Stadt Bochum
Herr D. Leufgen	Stadtwerke Essen
Frau Dipl.-Ing. (FH) J. Gellrich	Stadtentwässerung Göttingen
Herr A. Schneider	Stadtentwässerung Düsseldorf
Herr H.W. Turk	Stadt Neuenrade
Herr Dipl.-Ing. (FH) M. Neumann	Gemeinde Möhnesee
Herr U. Paluszak	Stadt Dortmund
Herr Dipl.-Ing. (FH) U. Klein	NVV AG Mönchengladbach
Herr M. Gremmel	Wasserverband Peine
Herr M. Köning / Herr N. Wigger	Stadt Ahaus
Herr Dipl.-Ing. (FH) R. Terwolbeck	Stadt Selm
Herr B. Hagmann	Stadt Velen

Darüber hinaus danken wir Herrn Prof. Dr.-Ing. G. Meschke, Lehrstuhl für Statik und Dynamik der Ruhr-Universität-Bochum, für die numerischen Untersuchungen im Rahmen des Kapitel 6 sowie Herrn Prof. Dr.-Ing. H. Pfeifer, Baustofflabor der Fachhochschule Bochum, für die Durchführung und Auswertung der Laboruntersuchungen nach Abschnitt 4.3.2.3.

Inhaltsverzeichnis

1	Veranlassung	1
2	Problem-, Zielstellung und Vorgehensweise.....	2
3	Derzeitiger Kenntnisstand	4
3.1	SCHACHTBAUWERKE	4
3.1.1	<i>Aufbau und Verbreitung</i>	4
3.1.2	<i>Dichtsysteme</i>	8
3.1.3	<i>Dichtheitsprüfung</i>	10
3.2	SCHÄDEN UND BELASTUNGEN	12
3.2.1	<i>Schadensbilder</i>	12
3.2.2	<i>Belastungen</i>	16
3.3	BESCHICHTUNGSVERFAHREN	21
3.3.1	<i>Mörtelbeschichtung</i>	23
3.3.2	<i>Polyurethanbeschichtung</i>	30
3.3.3	<i>Qualitätssicherungsmaßnahmen</i>	35
4	In-situ-Maßnahmen	46
4.1	AUSWAHL DER SCHÄCHTE, PRODUKTE UND VERFAHREN	46
4.1.1	<i>Anwendungsfälle und Randbedingungen</i>	46
4.1.2	<i>Ausgewählte Anwendungsfälle</i>	49
4.2	UNTERSUCHUNGSPROGRAMM	60
4.3	UNTERSUCHUNGSERGEBNISSE	68
4.3.1	<i>Qualitätssicherung: Einflussfaktoren und Optimierungspotentiale</i>	68
4.3.2	<i>Ist-Zustand der Schächte vor Sanierung</i>	84
4.3.3	<i>Ausführung der Sanierungsarbeiten</i>	101
4.3.4	<i>Zustand nach Sanierung und Materialqualität</i>	124
5	Laborversuche	165
5.1	AUSWIRKUNGEN VON DYNAMISCHEN BELASTUNGEN AUF SCHACHTBESCHICHTUNGEN	165
5.1.1	<i>Versuchsaufbau und -durchführung</i>	165
5.1.2	<i>Optische Inspektion und Prüfung der Haftzugfestigkeit</i>	171
5.1.3	<i>Schlussfolgerungen</i>	180
5.2	VERBUNDVERHALTEN AUF WASSERGELAGERTEN SCHACHTELEMENTEN AUS BETON	182
5.2.1	<i>Probekörper</i>	182
5.2.2	<i>Wassersättigung der Probekörper</i>	183
5.2.3	<i>Beschichtung und Nachbehandlung der Probekörper</i>	184
5.2.4	<i>Optische Inspektion und Prüfung der Haftzugfestigkeit</i>	188
5.2.5	<i>Schlussfolgerungen</i>	197
6	Ergänzende Untersuchungen	199
6.1	NUMERISCHE UNTERSUCHUNGEN ZU HAFTZUGSPANNUNGEN	200
6.2	REINIGUNG UNTER BEIMISCHUNG VON FESTEM STRAHLGUT	211
6.3	EINFLUSS DES AUßENKLIMAS	214
6.4	KOMBINIRTER EINSATZ MIT PE-HD - AUSKLEIDUNGSSYSTEMEN	216
7	Zusammenfassung und Schlussfolgerungen.....	218
8	Fazit und Ausblick.....	234
9	Literatur	240

1 Veranlassung

Die Gesamtzahl der Schächte in öffentlichen Verkehrsflächen lässt sich für die Bundesrepublik Deutschland mit ca. 10 Mio. bzw. für Nordrhein-Westfalen mit ca. 2 Mio. abschätzen (vgl. [1], [2]). Mit Inkrafttreten der „Verordnung zur Selbstüberwachung von Kanalisationen und Einleitungen von Abwasser aus Kanalisationen im Mischsystem und im Trennsystem (Selbstüberwachungsverordnung Kanal – SüwVKan [3]) am 1. Januar 1996 wurden die Kanalnetzbetreiber in Nordrhein-Westfalen verpflichtet, den baulichen und betrieblichen Zustand ihres Kanalnetzes sowie der mit diesen verbundenen Bauwerke der Ortsentwässerung bis zum 31.12.2005 erstmalig vollständig festzustellen. In Abhängigkeit des Inspektionsergebnisses sind dann entsprechende Betriebs- und Unterhaltungsmaßnahmen auszuführen (vgl. Runderlass des Ministeriums für Umwelt und Naturschutz, Landwirtschaft und Verbraucherschutz des Landes Nordrhein-Westfalen vom 03.01.1995 [4]). Bei Undichtigkeiten am Schachtkörper und bei schadhaftem Allgemeinzustand des Schachtes wird die Abdichtung und Instandsetzung gefordert. Hierzu bieten sich insbesondere Beschichtungsverfahren an, die in vielen Fällen eine kostengünstige Alternative zur Erneuerung der schadhaften Schächte darstellen.

Grundsätzlich bestehen bei den Netzbetreibern allerdings große Unsicherheiten hinsichtlich der Einsatzgrenzen der angebotenen Beschichtungsverfahren und der Dauerhaftigkeit der Sanierungsergebnisse. Eine Umfrage zur Sanierung von Schachtbauwerken im Bereich der Abwassertechnik [5] aus dem Jahr 2001 zeigte, dass bundesweit zwar durch 37 % der Netzbetreiber bereits Beschichtungsverfahren für die Schachtsanierung eingesetzt werden, allerdings bei 2/3 dieser Betreiber lediglich Probemaßnahmen mit maximal 15 Schachtsanierungen zur Ausführung kamen. Demgegenüber schätzen die in [5] befragten Netzbetreiber, dass sich insgesamt **12 %** aller Schächte grundsätzlich für den Einsatz von Beschichtungsverfahren eignen. Mit Blick auf ein damit mögliches Investitionsvolumen von **ca. 2,7 Mrd. Euro** ist also für die Zukunft noch mit erheblichen Aufwendungen in diesem Bereich zu rechnen. Vor diesem Hintergrund beauftragte das Ministerium für Umwelt und Naturschutz, Landwirtschaft und Verbraucherschutz des Landes Nordrhein-Westfalen das IKT-Institut für Unterirdische Infrastruktur mit der nachfolgend dargestellten Untersuchung zur „Sanierung von Schachtbauwerken im Bereich der Abwassertechnik mittels Beschichtungsverfahren“ (Aktenzeichen IV-9-042 105 0020).

2 Problem-, Zielstellung und Vorgehensweise

Durch zahlreiche „Versuchsbaustellen“ wird derzeit von einzelnen Betreibern versucht, erste Erfahrungen mit dem Einsatz von Beschichtungen zur Schachtsanierung zu gewinnen. Allerdings wird nur in wenigen Ausnahmefällen der Sanierungserfolg, z.B. durch Materialprüfungen und detaillierte optische Inspektionen, überprüft. Eine stichhaltige Aussage zu den Einsatzmöglichkeiten und –grenzen von Beschichtungsverfahren ist auf der Basis des bisher vorliegenden Datenmaterials daher nicht möglich. Dies betrifft insbesondere die Identifikation möglicher Qualitätseinflüsse (vgl. [5]):

- Neben optisch einwandfreien Beschichtungen wurden im Rahmen von Ortsterminen bei den Netzbetreibern auch eine Reihe von mangelbehafteten Schachtbeschichtungen festgestellt. Ob die Ursache für die festgestellten Mängel an Beschichtungen ausschließlich auf Ausführungsfehler zurückzuführen sind oder ob die Anwendungsgrenzen der Verfahren erreicht wurden, konnte im Rahmen der Umfrage [5] nicht ermittelt werden.
- Aufgrund des geringen Alters der ausgeführten Beschichtungen – etwa die Hälfte war weniger als 2 Jahre alt – lassen sich aus den bisherigen praktischen Erfahrungen der Netzbetreiber keine Aussagen bzgl. der Dauerhaftigkeit von Schachtbeschichtungen ableiten. Es wird allerdings vermutet, dass die dynamischen Belastungen durch den Straßenverkehr an der Oberfläche zu einer besonderen Beanspruchung des Schachtes führen und die Lebensdauer einer Beschichtung begrenzen können.
- Sanierungen mit Beschichtungsverfahren werden vor allem an Schächten mit Korrosion der Schachtwandung, sichtbaren Undichtigkeiten und Grundwasserinfiltrationen vorgenommen. Inwieweit in Abhängigkeit des Schachtzustandes und der gewählten Oberflächenvorbereitung systematische Unterschiede in der Ausführungsqualität von Beschichtungen an Mauerwerks- bzw. Betonschächten zu erwarten sind, ist bislang ungeklärt.

Vor diesem Hintergrund ist es **Ziel** des Forschungsvorhabens, die wesentlichen Qualitätseinflüsse bei der Ausführung von Beschichtungsmaßnahmen zu erkennen, Einsatzmöglichkeiten und –grenzen einzelner Verfahrenskombinationen zu identifizieren und geeignete Methoden zur Qualitätssicherung abzuleiten. Besondere Berücksichtigung finden dabei die speziellen Randbedingungen bei der Beschichtung von Abwasserschächten, wie z.B. ein i.d.R. hoher Verschmutzungsgrad, ggf. eindringendes Grundwasser und schwierige Arbeitsbedingungen in tiefen bzw. engen Schächten.

Um dieses Ziel zu erreichen, wurde eine stark **praxisorientierte Vorgehensweise** gewählt. Auf Basis einer Marktrecherche und Gesprächen mit Dienstleistern, Netzbetreibern und weiteren Fachleuten wurden am Markt verbreitete bzw. innovative Produkte, Verfahren und Werkzeuge ausgewählt und deren Einsatz bei 42 Beschichtungsmaßnahmen begleitet und umfangreiche Qualitätsprüfungen durchgeführt. Sämtliche Maßnahmen wurden durch die

beteiligten Netzbetreiber beauftragt. An die vor Ort tätigen Fachfirmen wurden seitens der Netzbetreiber übliche Vertragsanforderungen gestellt und lediglich Vorgaben zur Verfahrensauswahl (Material, Verfahrenstechnik) geäußert. Auf Hinweise zur Sanierungsdurchführung wurde bewusst verzichtet, um die üblichen Arbeitsprozesse, die tatsächliche Sanierungsqualität sowie mögliche Fehlerquellen und Verbesserungspotenziale wirklichkeitsgetreu erkennen zu können. In anschließenden Laborversuchen wurde das Verbundverhalten von Beschichtungen auf wassergesättigten Betonoberflächen sowie die Auswirkung von Verkehrsbelastungen auf die Beschichtungsqualität weitergehend untersucht. Ergänzende Untersuchungen zur Qualität der Verbindungsbereiche und Einsatzmöglichkeiten alternativer Vorbehandlungstechniken sowie numerische Untersuchungen zur Haftzugfestigkeit runden das Bild ab.

3 Derzeitiger Kenntnisstand

3.1 Schachtbauwerke

3.1.1 Aufbau und Verbreitung

Gemäß der Vornorm DIN V 4034-1 [6] wird der Schacht als ein Bauwerk für einen erdverlegten Abwasserkanal oder eine erdverlegte Abwasserleitung definiert. Er dient zur Be- und Entlüftung, Kontrolle, Wartung und Reinigung, der Zusammenführung sowie Richtungs-, Neigungs- und Querschnittsveränderungen von Kanälen und Leitungen.

In Abb. 1 ist ein Beispiel für einen Schacht aus Beton- und Stahlbetonfertigteilen abgebildet. Nicht eingegangen wird im Rahmen des vorliegenden Forschungsvorhabens auf Auflageringe und Schachtabdeckung (Nr. 7 und Nr. 8 der Legende), da sich eine Sanierung mittels Beschichtungsverfahren auf den Schachtkörper beschränkt. Angaben zu den entsprechenden Sanierungsverfahren finden sich in [7].

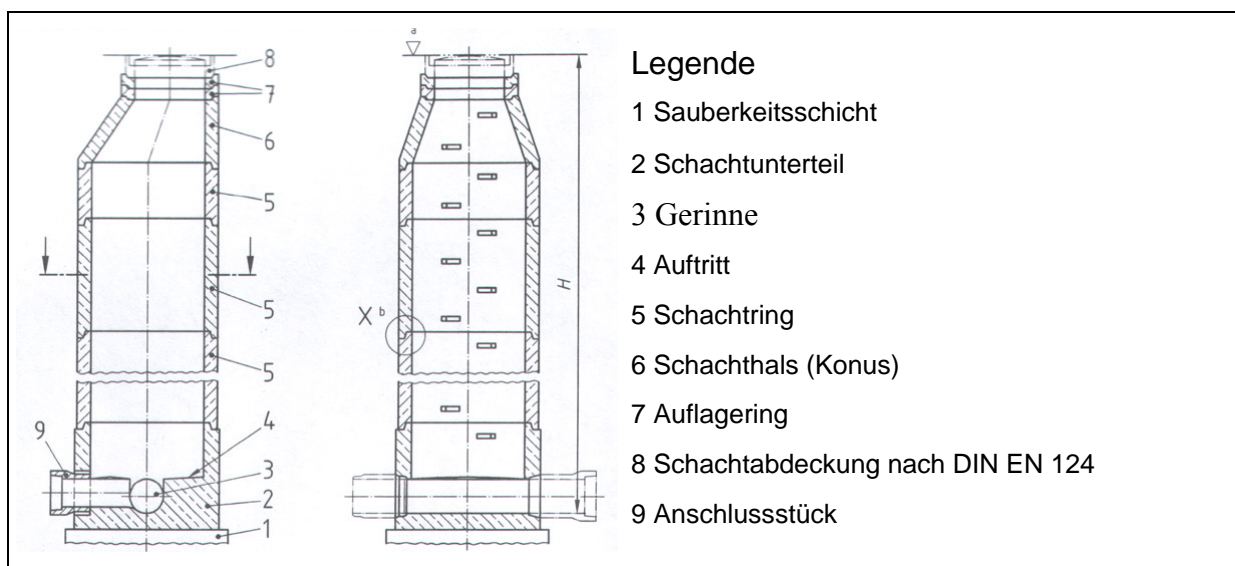


Abb. 1: Beispiel eines Schachtes aus Beton- und Stahlbetonfertigteilen (aus [6])

Anforderungen und Prüfungen sowie Regelvorschlage für Planung und Ausführung von Schächten für erdverlegte Abwasserkanäle und –leitungen enthalten ATV-DVWK-A 157 [8], ATV-A 241 [9], DIN V 4034, Teil 1 [6] und die DIN EN 1917 [10], welche die Teile 1 und 2 der alten DIN 4034 [11] ersetzen. Zusätzlich gelten die einschlägigen Werkstoff- und Bauteilnormen.

Heutzutage werden vornehmlich Fertigteilschachte aus Beton und Stahlbeton eingesetzt, wobei auch Fertigteilschachte aus den Materialien Steinzeug, glasfaserverstärkte Reaktionsharze (GFK), Polyurethan (PUR), Polyethylen hoher Dichte (PE-HD), Polyvinylchlorid (PVC) und Polymerbeton angeboten werden.

Früher wurden Abwasserschächte meist vor Ort unter Verwendung von Kanalklinkersteinen gemauert. Seltener wurden die Schächte auch vor Ort betoniert. Neben den werkstoffeinheitlichen Ausführungen finden sich auch Schächte, die aus zwei oder mehreren Werkstoffen bestehen. Hierbei wird das Schachtunterteil z.B. aus Kanalklinkersteinen nach [12] bzw. [13] gemauert (gemäß DIN 4034, Teil 10 [14]) oder mit Ortbeton gegossen und der weitere Aufbau aus Betonfertigteilen erstellt. Zum Teil wurde auch bei der Erneuerung von älteren, nicht mehr standsicheren Schächten aus Mauerwerk der Schachtkörper bis auf das Schachtunterteil durch Betonfertigteile ersetzt. Abb. 2 gibt eine Übersicht über die Werkstoffverteilung der Schächte.

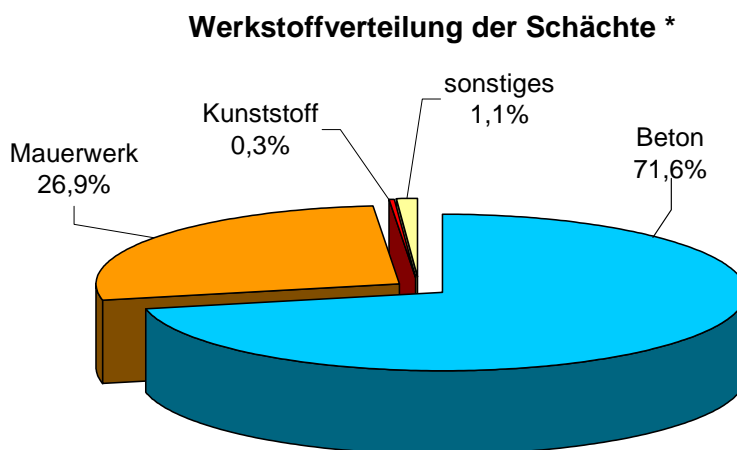


Abb. 2: Werkstoffverteilung der Schächte

* nach einer bundesweiten Umfrage des IKT im Jahre 2001 in % der gesamten Schächte von 87 befragten öffentlichen Netzbetreibern [15]

In Abb. 3 sind in Betrieb befindliche Abwasserschächte aus Betonfertigteilen und Mauerwerk dargestellt.

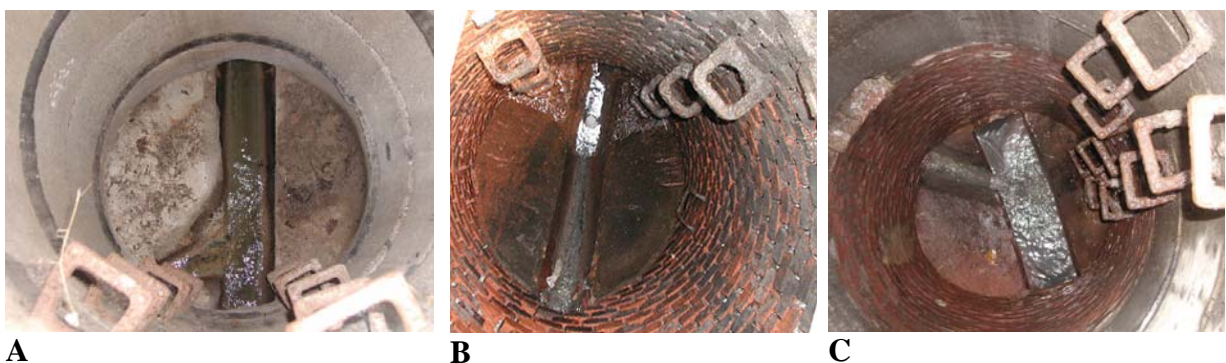


Abb. 3: Blick in Abwasserschächte aus verschiedenen Materialien. **A:** Schacht aus Betonfertigteilen. **B:** Schacht aus Mauerwerk. **C:** Schacht, bei dem das Unterteil aus Mauerwerk und der obere Aufbau aus Betonfertigteilen besteht.

Nach ATV-DVWK-A 157 [8] bzw. ATV-A 241 [9] beträgt die lichte Mindestweite bzw. der Minstdurchmesser bei viereckigen und runden Schächten 1,0 m. Der Schacht muss so ge-

räumig sein und die Einstiegsöffnung so angeordnet werden, dass das Reinigen der Kanäle vom Schacht aus einwandfrei möglich ist. Der Arbeitsraum über dem Auftritt sollte möglichst 2,00 m hoch sein.

Im Schachtunterteil ist ein Auftritt (Berme) auszubilden, der bei einem Durchmesser des abgehenden Kanals bis DN 500 beidseitig in Höhe des Scheitels liegen soll. Die Schachtunterteile werden bei Bedarf mit einem Korrosionsschutz, z.B. aus Kanalklinkern oder Kunststoffen versehen (vgl. Abb. 4).

Bei Schächten aus Betonfertigteilen werden i.d.R. Schachthälsa (Konus) mit Muffe und einem Einsteigedurchmesser von DN 625 eingebaut (vgl. Abb. 5). Bei Schächten aus Mauerwerk wird die Verjüngung auf den üblichen Einsteigedurchmesser i.d.R. durch eine treppenartige Anordnung der Mauerwerklinker erreicht (vgl. Abb. 6).

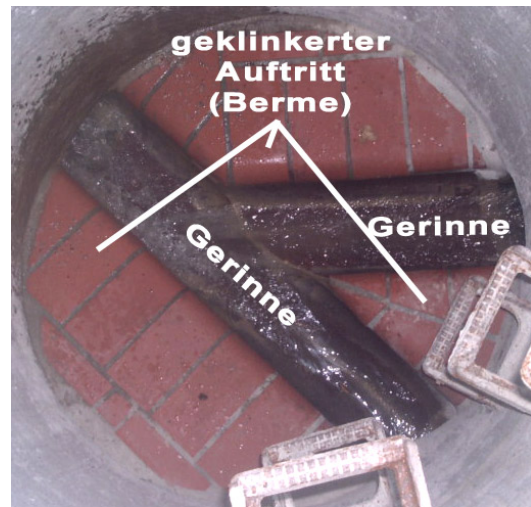


Abb. 4: Beispiel für die Ausbildung eines Schachtunterteils mit Korrosionsschutz der Berme

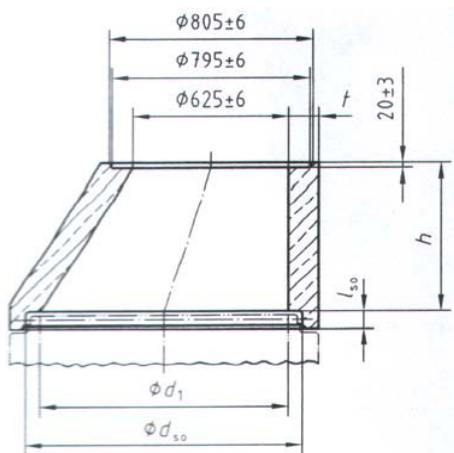


Abb. 5: Schachthals (Konus) mit Muffe als Betonfertigteile (aus [6])



Abb. 6: Ausbildung des Schachthalses (Konus) in einem Mauerwerksschacht

Schächte sind mit Steighilfen auszurüsten. In der Regel werden ein- oder zweiläufige Steigengänge gemäß DIN 1211 [16], DIN 1212 [17], DIN V 1264 [18] bzw. DIN 19555 [19] eingesetzt. In der DIN EN 1917 [10] wird verlangt, dass die Auftrittstiefe mindestens 120 mm betragen muss (vgl. Abb. 7).

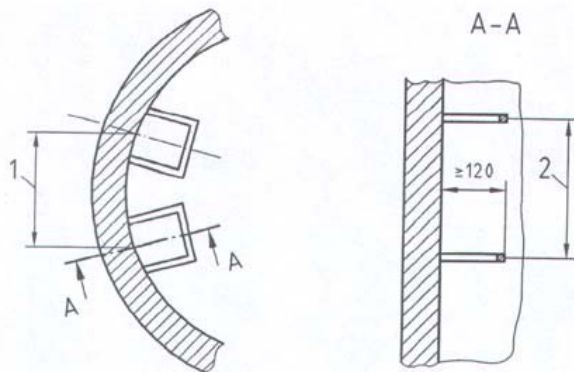


Abb. 7: Anordnung von Steigeisen in Abwasserschächten: Zweiläufige Steigeisengänge in einem kreisrunden oder elliptischen Bauteil (mitte); Aufriss A-A (rechts) (aus [10])



Abb. 8: Zweiläufiger Steigeisengang in einem Schacht aus Betonfertigteilen

Seltener werden auch ortsfeste oder bewegliche Steigleitern nach [20] aus GFK, Aluminium, Stahl oder Edelstahl verwendet (vgl. Abb. 9).

Bei Schächten mit großer Tiefe (über 5 m) müssen zusätzlich betriebliche (z.B. Anseilen) oder bauliche (z.B. Ruhepodeste) Maßnahmen getroffen werden. Ab 10 m Tiefe sind Ruhepodeste zwingend erforderlich. [8], [9]



Abb. 9: Ortsfeste Steigleiter

Die Rohranschlüsse müssen bei allen Rohrmaterialien doppelgelenkig ausgebildet werden, um Bruchschäden durch Scherbeanspruchungen, die z.B. durch gegenseitige Lageänderungen zwischen Schacht und Rohrleitungen auftreten können, auszuschließen. Die anzuschließenden Anschluss- und Gelenkstücke richten sich nach den entsprechenden Rohrnormen. Bzgl. der Gelenkerzeugung haben sich nach [1] besonders zwei Varianten bewährt:

- Bei der ersten Variante wird das doppelte Gelenk vor der Schachtwandung erzeugt. Entsprechend abgelängte Kanalrohre oder -leitungen werden dabei als Anschlussstücke in vorhandene oder nachträglich hergestellte Schachtöffnungen einbetoniert bzw. eingemauert.

- Bei der zweiten Variante wird jeweils ein Gelenk in der Schachtwandung ausgebildet. Dazu werden in der Regel Anschlussstücke in der Form von Muffenverbindungen werksseitig in die Schachtfertigteile einbetoniert oder in nachträglich hergestellte Bohrungen eingeklebt. In diese Muffen können dann entsprechend abgelängte Kanalrohre oder –leitungen gelenkig eingesetzt werden (vgl. Abb. 10).

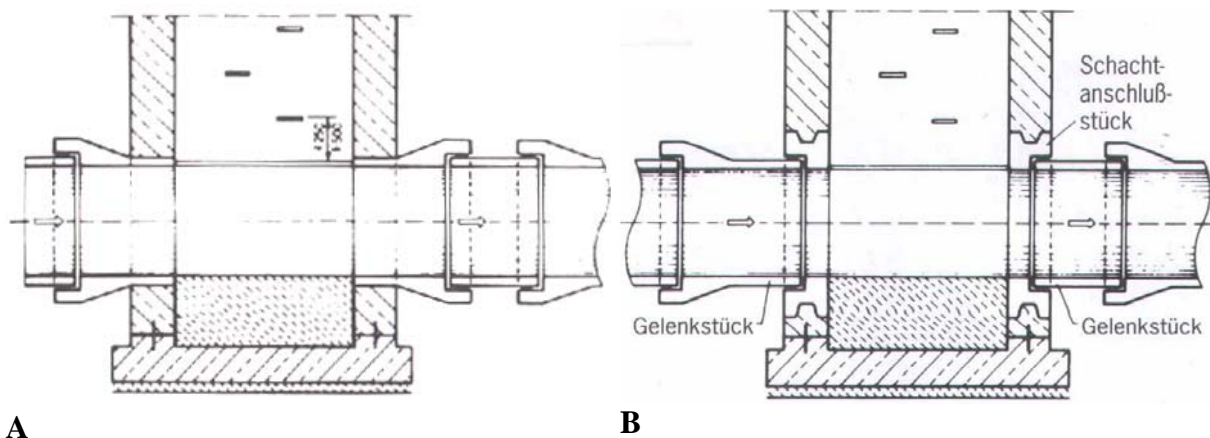


Abb. 10: Beispiel der Ausbildung von Rohranschlüssen an ein Schachtunterteil aus Beton.
A: Variante 1 mit nachträglichem Anschluss. **B:** Variante 2 mit werksseitig hergestellter Muffenverbindung (aus [21])

3.1.2 Dichtsysteme

Zur Abdichtung der Verbindungen zwischen den einzelnen Elementen bei Schächten aus Fertigteilen werden heute i.d.R. Dichtmittel aus Elastomeren eingesetzt. Bei Fertigteilschächten aus Beton wird seit Jahrzehnten vor dem Aufsetzen der Schachtbauteile eine frische Mörtelschicht auf den Lastübertragungsbereich aufgetragen. Nach dem Aufsetzen der Schachtteile wirkt durch das Eigengewicht ein Pressdruck auf die Dichtung. Im ATV-A 241 in der Ausgabe von 1978 [21] wurden unter der Bedingung, dass die Verbindungen der Schachtfertigteile auch vertikale Belastungen übertragen müssen, folgende Dichtmittel zugelassen:

- Zementmörteldichtung (vgl. Abb. 11 und Abb. 13)
 Diese Dichtung konnte verwendet werden, wenn kein Grundwasser ansteht und keine besonderen Anforderungen an die Dichtheit gestellt werden (dies gilt nicht für Spezialmörtel mit besonderen Eigenschaften). Der verwendete Zementmörtel sollte den Anforderungen nach DIN 1045 [22], Abschnitt 6.7 entsprechen. Vor Aufbringen des Zementmörtels waren die Dichtflächen anzunässen.
- Dichtung mit Bitumenbinde (vgl. Abb. 12)
 Bei Schächten im Grundwasser konnte zusätzlich zur Fugendichtung eine stoßüberdeckende Abdichtung von außen unter Verwendung entsprechender Voranstriche ausgeführt werden.

- Elastische Dichtmittel

Elastische Dichtmittel waren einsetzbar bei Fertigteilen mit entsprechender Ausbildung der Verbindungselemente.

ATV-A 241, Ausgabe 1998 [9], ATV-DVWK-A 157 [8] und DIN V 4034, Teil 1 [6] in Verbindung mit DIN EN 1917 [10] lassen die Verwendung plastischer Dichtmittel gemäß DIN 4062 [23] für die Abdichtung von Schachtfertigteilen nicht mehr zu. Stattdessen wird hier die Abdichtung der Fugen mit Dichtmitteln aus Elastomeren nach DIN EN 681, Teil 1 [24] bzw. alternativ die Anwendung von Dichtmitteln, die in den Werksunterlagen angegeben sind, gefordert. Durchgesetzt haben sich Gleitringdichtungen mit Falzmuffenverbindung. Neuere Verbindungssysteme dieser Art zielen darauf ab, die lastübertragende und lastverteilende Funktion nicht mehr einer Zementmörtelschicht, sondern z.B. einem speziellen oder einem mit einer Elastomerdichtung kombinierten Lastübertragungsring zuzuweisen [25]. Ein Produktbeispiel für ein Dichtsystem in Betonfertigteilschächten ist in Abb. 14 bzw. Abb. 15 dargestellt. Weitere Produktbeispiele sowie Untersuchungen zur Dichtwirkung finden sich in [26].

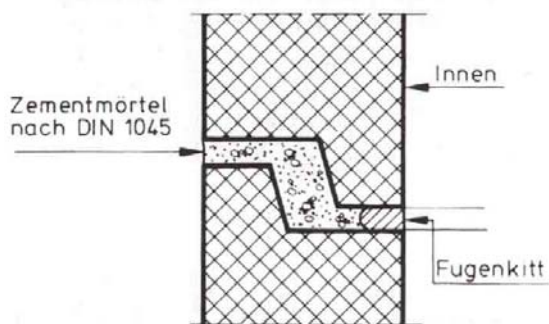


Abb. 11: Abdichtung von Schachtringen mit Zementmörtel (über dem Grundwasser) (aus [21])

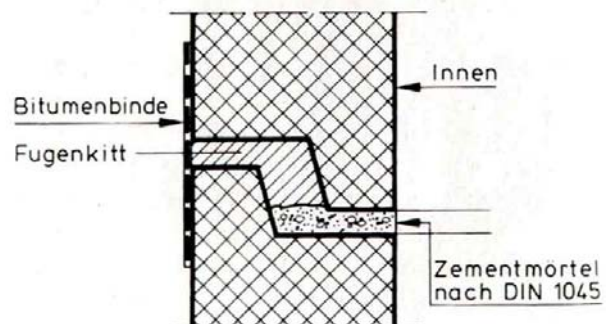


Abb. 12: Abdichtung von Schachtringen mit plastischen Dichtmitteln (im Grundwasser) (aus [21])

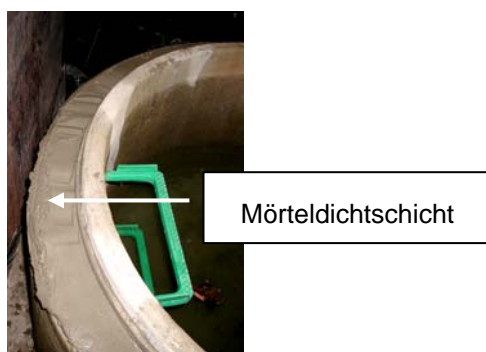


Abb. 13: Abdichtung mit Mörtel

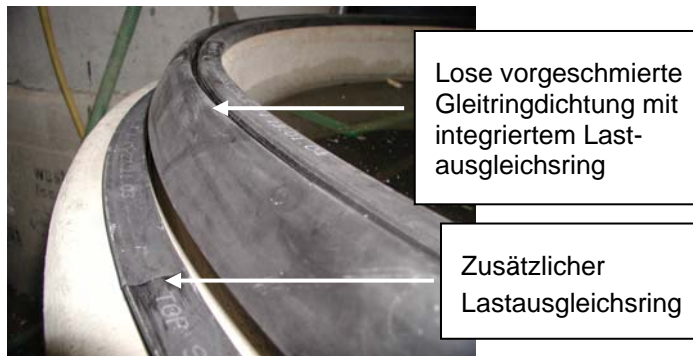


Abb. 14: Eingebautes Elastomer-Dichtsystem

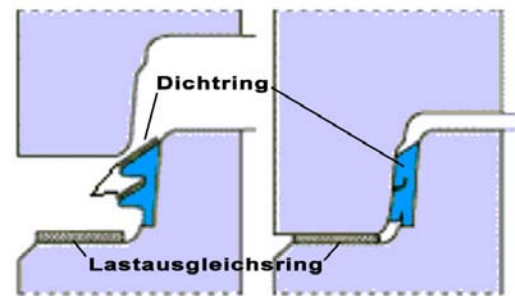


Abb. 15: Systemskizze eines Elastomer-Dichtsystems [27]

Bei Schächten aus Mauerwerk erfolgt die Abdichtung gemäß ATV-A 241 [9] bzw. ATV-DVWK-A 157 [8] durch eine Vollverfugung mit Mörtel der Mörtelgruppe III mit Zusatzmittel. Die Fugen sind außen glatt abzustreichen. Zusätzlich ist ein 2 cm dicker Außenputz und ein mindestens zweifacher Sperranstrich gegen aggressive Böden oder Grundwasser vorzusehen.

3.1.3 Dichtheitsprüfung

Vorgaben zur Durchführung von Dichtheitsprüfungen mit Luft oder Wasser an Abwasser-schächten werden in DIN EN 1610 [28] und ATV-M 143 Teil 6 [29] angeführt. Während die DIN EN 1610 im Wesentlichen für die Prüfung neuerrichteter Schachtbauwerke gilt, bezieht sich das ATV-M 143, Teil 6 auf in Betrieb befindliche Schächte. Natürlich können auch bestehende Abwasserschächte entsprechend den Vorgaben der DIN EN 1610 geprüft werden. In Fachkreisen wird die Anwendbarkeit der Prüfung mit Luftüberdruck aus Gründen der Arbeitssicherheit als kritisch bewertet (Explosionsgefahr bei größerem Prüfvolumen). Zur Luftunterdruckprüfung fehlen Prüfanforderungen in [28], da zur Zeit noch keine ausreichenden Erfahrungen mit diesem Verfahren vorliegen. Daher wird im folgenden nur auf die Prüfung mit Wasser näher eingegangen.

Nach DIN EN 1610 [28] wird der Schacht bis zum Geländeniveau mit Wasser gefüllt (vgl. Abb. 16). Dadurch ergibt sich ein über die Höhe variabler Prüfdruck, welcher an der Schachtoberkante auf Null absinkt. Nach einer Vorbereitungszeit von 60 min ist der Wasserspiegel während der 30-minütigen Prüfzeit konstant zu halten und die erforderliche Wasserzugabemenge zu messen. (nach [26])

Bei einer Wasserdichtheitsprüfung nach ATV-M 143 Teil 6 [29] entspricht die zulässige Wasserzugabemenge mit 0,4 l/m² benetzter Betonoberfläche (inkl. des Schachtbodens) dem Wert nach DIN EN 1610 [28], allerdings werden an den Prüfdruck und die Prüfzeit geringere Anforderungen gestellt. Der Schacht muss nur bis 0,5 m oberhalb des Rohrscheitels der eingehenden Abwasserkanäle mit Wasser gefüllt und der Wasserspiegel ohne Vorbereitungszeit während der Prüfzeit von 15 Minuten konstant gehalten werden (vgl. Abb. 17).



Abb. 16: Dichtheitsprüfung mit Wasser nach DIN EN 1610 an einem in Betrieb befindlichen Schacht



Abb. 17: Dichtheitsprüfung mit Wasser nach ATV-M 143, Teil 6 an einem in Betrieb befindlichen Schacht

3.2 Schäden und Belastungen

3.2.1 Schadensbilder

Schäden an Abwasserschächten können durch plan- und unplanmäßige Belastungen bei Neu-erstellung sowie während des Betriebs eines Abwasserschachtes entstehen. Hier sind vor al-lem mechanische sowie chemisch-biologische Belastungen zu nennen. Die Alterung der Ma-terialien wird an dieser Stelle nicht betrachtet, zu diesem Thema finden sich aber umfangrei-che Ausführungen bspw. in [30] und [31]. Ebenfalls nicht eingegangen wird im Folgenden auf die Beanspruchung der Schachtabdeckung und die besonderen Einflüsse in diesem Be-reich, z.B. aus Bremslasten und Frost-Tausalz-Wirkung. Dies ist Gegenstand anderer Unter-suchungen [7]. Der hier dargestellte Schwerpunkt befasst sich ausschließlich mit Schäden und Belastungen des Schachtkörpers bzw. der Anbindungsbereiche des Schachtes. Tabelle 1 und Tabelle 2 geben in Anlehnung an ATV-M 143, Teil 2 [32] eine Übersicht über mögliche Schäden an Abwasserschächten aus Betonfertigteilen und Mauerwerk.

Tabelle 1: Schäden an Abwasserschächten aus Betonfertigteilen, Beispiele

<p>Schachtring- verbin- dung undicht</p>		
<p>Korrosion der Schachtwan- dung und Steigeisen</p>		

Tabelle 1 (Forts.): Schäden an Abwasserschächten aus Betonfertigteilen, Beispiele

<p>Risse in der Schachtwandung</p>		
<p>Sichtbare Undichtigkeiten im Anschluss an den Schacht (Rohreinbindung undicht)</p>		
<p>Abplatzungen im Muffenbereich / an der Schachtwandung</p>		
<p>Gerinne und Bankette defekt</p>		

Tabelle 2: Schäden an Abwasserschächten aus Mauerwerk, Beispiele

<p>Schachtwandung undicht</p>		
<p>Korrosion der Klinker und des Fugenmörtels</p>		
<p>Fehlende Klinker</p>		
<p>Sichtbare Undichtigkeiten im Anschluss an den Schacht (Rohreinbindung undicht)</p>		

Tabelle 2 (Forts.): Schäden an Abwasserschächten aus Mauerwerk, Beispiele

<p>Auswaschungen in der Schachtwandung / in den Einbindebereichen</p>		
<p>Gerinne und Bankette defekt</p>		

3.2.2 Belastungen

3.2.2.1 Mechanische Belastung

Die Nichtbeachtung der einschlägigen Normen, Vorschriften und Regelwerke kann direkt bei **Neuerstellung** eines Abwasserschachtes zu Schäden und Undichtigkeiten führen. Bei nicht normgerechter Lagerung von Fertigteilelementen, auch auf der Baustelle (vgl. Abb. 18), können Witterungseinflüsse und Verunreinigungen insbesondere die Dichtmittel aus Elastomeren beschädigen. In der DIN EN 1610 [28] wird entsprechend für „alle Materialien eine Lagerung in geeigneter Weise, um sie sauber zu halten und Verunreinigungen oder Beschädigung zu vermeiden“, gefordert.

Auch beim Transport und Umsetzen der Schachtbauteile auf der Baustelle (vgl. Abb. 19) kann es z.B. zu Beschädigungen der Spitzenden und somit u.U. zu Undichtigkeiten am eingebauten Schachtbauwerk kommen. Insbesondere kurze Stahlketten können bei heftigen Bewegungen zu Beschädigungen am Betonteil in Form von Abplatzungen führen. Um in der Baugrube den Einbau zu erleichtern und insbesondere ein Verschieben bzw. Abreißen des Dichtmittels zu vermeiden, werden die Elastomerverbindungen und die Spitzenden an den Gelenkstücken und Rohrendungen i.d.R. eingefettet (vgl. Abb. 20). Trotzdem können sich die Elastomer-Dichtungen bei dem Aufsetzen des nachfolgenden Schachtfertigteilelementes verschieben und im Extremfall in den Schachtkörper einragen. Eine Dichtwirkung ist dann nicht mehr gegeben.

Bei der Erstellung eines Mauerwerk-Schachtes kann die Verwendung von nicht wasserdichten Mörteln oder die nicht vollständige Verfüllung der Kanalklinker zur späteren Undichtigkeit des Schachtes führen [33].

Bei einem nachträglichen Anschluss von Leitungen an einen Abwasserschacht wird die Schachtwandung häufig im Einbindungsbereich aufgestemmt und die verbleibenden Hohlräume werden anschließend verfüllt. Eine dichte Verbindung kann so allerdings meist nicht hergestellt werden.



Abb. 18: Nicht normgerechte Lagerung der Schachtbauerteile auf verschmutztem und nassem Untergrund (aus [26])



Abb. 19: Transport eines Schachtunterteils in die Baugrube (aus [26])



Abb. 20: Einfetten des Gelenkstückes vor dem Einbau des Schachtes (aus [26])

Häufig befinden sich Abwasserschächte im Verkehrsraum und werden durch **Straßenverkehrslasten** stark beansprucht. Während einer erwarteten Lebensdauer der Schächte von 50 Jahren (vgl. [34]) ist für eine Straße der Bauklasse IV nach den Bemessungsansätzen mit ca. 3 Millionen Überfahrten durch Schwerlastverkehr zu rechnen. Durch diese Belastung kann es sowohl zu Setzungen des Schachtbauwerkes als auch zu Schäden an dem Schachtkörper selbst kommen. Eine Setzung des Schachtes kann zu einer verkehrsgefährdenden Absenkung der Schachtabdeckung und des Straßenkörpers führen. Speziell im Falle einer nicht gelenkigen Anbindung von Leitungsanschlüssen (vgl. auch Abschnitt 3.1) können in diesen Bereichen zudem auch Risse und/oder Undichtigkeiten auftreten.

Untersuchungen zeigten allerdings, dass vertikale Radlasten, auch auf Dauer, kein direktes Schadenspotential für Schachtfertigteilelemente aus Beton darstellen (vgl. [35]). Nach 10 Millionen Lastwechseln wies der Beton noch ca. 90 % seiner ursprünglichen Tragfähigkeit auf. Auch auf die Dichtwirkung von Dichtsystemen aus Elastomeren haben Verkehrslasten keinen negativen Einfluss.



Abb. 21: Lage eines Abwasserschachtes auf einer stark befahrenen Straße

Inwieweit vertikale Radlasten unmittelbar Schäden an Abwasserschächten aus anderen Materialien, z.B. an gemauerten Schächten aus Kanalklinkern und Mörtel hervorrufen können, ist bislang unklar.



Abb. 22: Reinigung eines Abwasserkanals mittels Hochdruckspülung

Hochdruckreinigungen werden insbesondere zur Beseitigung von Ablagerungen und Verstopfungen sowie als Vorbereitung für eine Kanalinspektion in Abwasserkanälen durchgeführt. Die Häufigkeit der Durchführung von Kanalreinigungen variiert i.d.R. zwischen 2 und 0,1 pro Jahr [1]. Zur Ermittlung der Betriebskosten gibt das ATV Arbeitsblatt A 147 [36] eine Häufigkeit von 0,33 Reinigungen pro Jahr vor. Eine Reinigung der Schachtwandung wird i.d.R. seltener durchgeführt. Zu der Häufigkeit dieser Art der Reinigung liegen keine Erhebungen vor.

Durch Hochdruckreinigung in den angrenzenden Haltungen können insbesondere Auswaschungen im Gerinne und in den Enbindungsbereichen der Kanäle in den Schacht verursacht werden, die wiederum zu Undichtigkeiten führen können.

Vor allem im unteren Bereich des Schachtes kann es durch mechanischen Verschleiß zu einem Materialabtrag verbunden mit einer Erhöhung der Wandrauheit kommen. Grundsätzlich muss zwischen einem Erosionsverschleiß, der Tropfenschlagerosion, der Kavitationserosion und der Flüssigkeitserosion unterschieden werden (vgl. [2]). Für die Betrachtung von Abwasserschächten sind vor allem der **Erosionsverschleiß** und die **Kavitationserosion** relevant. Ein Erosionsverschleiß erfolgt durch im Abwasser mitgeführte Feststoffe, wie z.B. Sand,

Kies, feste Metallteile, Textilien etc. und tritt dementsprechend vorrangig im Gerinne des Schachtes auf. Speziell im Bereich der Anprallfläche bei der Einleitung von Abwässern oberhalb des Schachtbodens kann es zu einer Kavitationserosion mit lochfraßartigen Zerstörungen und Aushöhlungen der Werkstoffoberfläche kommen.

3.2.2.2 Chemisch-biologische Belastungen

Bei einem aggressiven Kanalklima sind zementgebundene (z.B. Beton und Mörtel) und metallische (z.B. Stahl, Gusseisen) Werkstoffe verstärkt durch Korrosion gefährdet. In der DIN 4030 [37] finden sich Grenzwerte zur Beurteilung des Angriffsgrades von Wässern vorwiegend natürlicher Zusammensetzung. Demnach ist z.B. ein pH-Wert von 6,5 bis 5,5 als schwach angreifend, ein pH-Wert von 5,5 bis 4,5 als stark angreifend und ein pH-Wert von < 4,5 als sehr stark angreifend zu beurteilen. Eine Einstufung der durchschnittlichen pH-Werte von Wässern und Säuren für zementgebundene Werkstoffe zeigt Tabelle 3.

Tabelle 3: Einstufung der pH-Werte von Abwässern und Säuren für zementgebundene Mörtel (nach [38] in Verbindung mit [39])

Medium	pH-Wert	Agressivität
Kommunales Abwasser	10,0 – 6,6	schwacher Angriff
Industrielles Abwasser	14,0 – 1,0	mittlerer bis sehr starker Angriff
Regenwasser	7,0 – 4,5	schwacher bis mittlerer saurer Angriff
Anorganische Säuren	4,5 – 3,0	stark saurer Angriff
Organische Säuren (z.B. Milchsäure)	4,5 – 3,0	stark saurer Angriff
Biogene Schwefelsäure	< 3,0	sehr starker saurer Angriff

Neben der durch die Korrosionsvorgänge bedingten Erhöhung der Wandrauigkeit mit einer damit verbundenen vermehrten Ablagerung von Feststoffen ist vor allem die Reduzierung der Wanddicke kritisch zu betrachten. Durch sie wird die Tragfähigkeit und ggf. die Dichtheit des Schachtes verringert. Die Korrosion von Steigbügel aus Stahl beeinträchtigt die Arbeitssicherheit, da korrodierte Steigbügel unter Last abbrechen können.

Eine direkte Einwirkung aggressiver Abwässer betrifft ausschließlich den benetzten Kanalbereich. Hier kann es zu einem lösenden oder treibenden Angriff kommen.

Durch im Abwasser enthaltene Säuren, bestimmte austauschfähige Salze, starke Basen, organische Fette und Öle wird ein **lösender chemischer Angriff** bei zementgebundenen Werkstoffen (z.B. Mörtel, Beton) ausgelöst. Dabei werden die Calciumsilikat-, -aluminat- und ferrihydrate durch Hydrolyse gespalten und das dabei freigesetzte $CA(OH)_2$ sowie die durch Ionenaustausch gebildeten leichtlöslichen Salze gelöst. Zuschlagstoffe werden angegriffen, wenn sie aus Kalk- oder Dolomitgestein bestehen [40].

Bei einem **treibenden Angriff** bzw. Sulfatangriff bilden die im Abwasser gelösten Sulfate zusammen mit den Aluminathydraten und dem Calciumhydroxid des Zementsteins sehr voluminöse Kristalle. Der dabei entstehende Kristallisationsdruck verursacht ein Treiben im Zementgestein, das u.U. zur vollständigen Zerstörung führen kann (nach [1]).

Bei der Betrachtung von Korrosionsprozessen an Abwasserschächten ist vor allem die **biogene Schwefelsäurekorrosion** von Bedeutung, da deren Auswirkungen im Gasraum, d.h. oberhalb des Wasserspiegels, zu finden sind. Insbesondere bei langen Standzeiten des Abwassers bzw. an den Endpunkten von Kanälen, die das Abwasser im Drucksystem ableiten, ist mit der Entstehung von flüchtigen Schwefelsäureverbindungen zu rechnen. Eine fehlende Be- und Entlüftung verstärkt das Problem. Die Schwefelsäureverbindungen gelangen durch Diffusion und Turbulenzen aus dem Abwasser in die Kanalatmosphäre und von dort an die Kanal- bzw. Schachtwandung. Dort werden die Verbindungen chemisch zu elementarem Schwefel aufoxidiert und anschließend von in der Sielhaut lebenden Thiobazillen bei ausreichender Feuchtigkeit zu Schwefelsäure oxidiert. Schwefelsäure greift zementgebundene Werkstoffe an (nach [41]). Die Korrosionsgeschwindigkeit ist von der Betonzusammensetzung und den verbleibenden Korrosionsprodukten abhängig. Sie wird auf maximal ca. 3 mm / Jahr im Gasraum bei kreisrunden Rohren [42] geschätzt. Der Vorgang ist in Abb. 23 schematisch dargestellt.

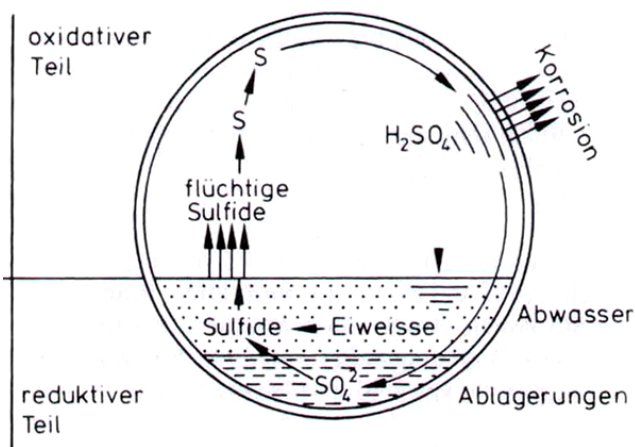


Abb. 23: Prinzipieller Ablauf der biogenen Schwefelsäure- Korrosion [42]

3.3 Beschichtungsverfahren

Ergänzend zu den in Arbeitsblättern und DIN-Normen aufgeführten Anforderungen sind z.B. die Kanalnetzbetreiber in Nordrhein-Westfalen durch die „Verordnung zur Selbstüberwachung von Kanalisationen und Einleitungen von Abwasser aus Kanalisationen im Mischsystem und im Trennsystem“ (Selbstüberwachungsverordnung Kanal – SÜWVKan [3]) verpflichtet, den baulichen und betrieblichen Zustand ihres Kanalnetzes sowie der mit diesem verbundenen Bauwerke der Ortsentwässerung bis spätestens zum 31.12.2005 erstmalig vollständig festzustellen. In Abhängigkeit des Inspektionsergebnisses sind dann entsprechende Betriebs- und Unterhaltungsmaßnahmen zu treffen, die in dem Runderlass [4] des Ministeriums für Umwelt und Naturschutz, Landwirtschaft und Verbraucherschutz des Landes Nordrhein-Westfalen vom 03.01.1995 vorgegeben werden. Bei Undichtigkeiten am Schachtkörper und bei schadhaftem Allgemeinzustand des Schachtes wird eine Sanierung gefordert.

Durch die Sanierungsmaßnahmen muss der Schacht gemäß DIN EN 752, Teil 5 [43] in einen Zustand versetzt werden, in dem er alle Leistungsanforderungen, die an einen neu erstellten Schacht gestellt werden, erfüllt. Je nach Schadensbild des Schachtes können dazu Reparatur-, Renovierungs- bzw. Erneuerungsverfahren zum Einsatz kommen. Nach [43] sind unter dem Begriff **Reparatur** Maßnahmen zur Behebung örtlich begrenzter Schäden zu verstehen. Unter dem Begriff **Renovierung** werden Maßnahmen zur Verbesserung der aktuellen Funktionsfähigkeit von Schächten unter vollständiger Einbeziehung ihrer ursprünglichen Substanz gefasst. Die **Erneuerung**, das heißt die Herstellung eines neuen Schachtes an der gleichen Position, erfolgt ausschließlich in offener Bauweise (nach [44]).

In Abb. 24 ist eine Übersicht über die Verfahrenshauptgruppen zur baulichen Sanierung von Schächten gegeben.

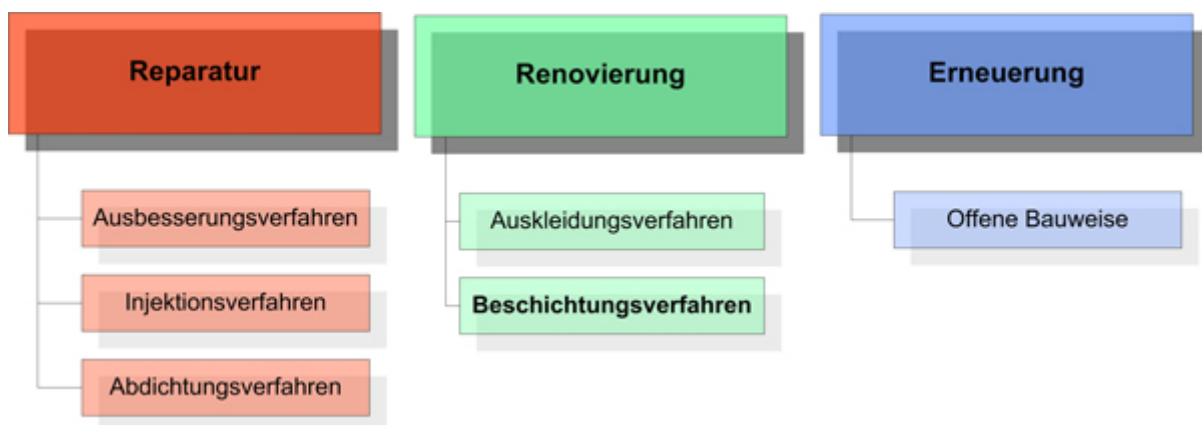


Abb. 24: Übersicht über die Verfahrenshauptgruppen zur baulichen Sanierung von Schächten (nach [1])

Ob ein Schacht repariert, renoviert oder erneuert werden soll, hängt wesentlich von den örtlichen Randbedingungen ab. Nach ATV-M 143, Teil 1 [45] können an derselben Stelle wieder-

holt auftretende und umfangreiche Schäden, bei denen eine Reparatur nicht mehr möglich ist, sowohl durch Renovierung als auch durch Erneuerung behoben werden. Kann eine hydraulische Überlastung oder eine Querschnittsreduzierung durch Reparatur bzw. Renovierungsmaßnahmen nicht in Kauf genommen werden, kommt nur eine **Erneuerung** in Betracht. In der Praxis beeinflussen vor allem die individuellen Randbedingungen vor Ort die Wahl des anzuwendenden Sanierungsverfahrens. Folgende Punkte können bei der Entscheidung für Reparatur- bzw. Renovierungsverfahren und gegen eine Erneuerung in offener Bauweise ausschlaggebend sein (vgl. [45]):

- keine oder nur kleine Baugrube,
- kürzere Bauzeit,
- Reduzierung der Verkehrsbeeinträchtigung,
- kreuzende oder parallel laufende Ver- und Entsorgungsleitungen,
- erhaltenswerter Bewuchs oder Oberflächenbelag und
- Vermeidung einer Grundwasserabsenkung.

Einen Schwerpunkt der **Reparaturverfahren** bildet der Ersatz korrodierter oder zerstörter Steighilfen oder Sicherheitstritte. Darüber hinaus zählen die Ausbesserung von örtlich begrenzten Fehlstellen in Schächten –bei Mauerwerks- und Betonschächten meist mit Reparaturmörteln- und das Einbringen von Injektionsmitteln unter Druck in Risse und Hohlräume zu den dort einsetzbaren Reparaturverfahren. Diese Maßnahmen werden häufig im Vorfeld von **Renovierungsmaßnahmen** durchgeführt, bei denen der gesamte Schachtkörper instand gesetzt wird. Bei den Auskleidungsverfahren wird eine geschlossene Schicht auf die gesamte Schachtinnenwandung in Form vorgefertigter, örtlich hergestellter und erhärtender Rohre, oder auch mit Hilfe vorgefertigter Bauteile und Ortslaminaten aufgebracht [44].

Näher betrachtet wird im Folgenden die Schachtsanierung mittels Beschichtungsverfahren, bei deren Einsatz ein spezielles Beschichtungsmaterial auf die Schachtinnenwandung aufgebracht wird und dort zu einer in sich zusammenhängenden Schicht erhärtet. In Schächten der Ortsentwässerung können Beschichtungen zur Wiederherstellung der Wasserdichtheit, des Widerstandsvermögens gegenüber biogener Schwefelsäurekorrosion und der Wiederherstellung der statischen Tragfähigkeit des Schachtbauwerkes dienen. Bei Sanierungen des Schachtkörpers kommen auch heute vorwiegend **Mörtelbeschichtungen** zum Einsatz. Darüber hinaus werden seit einigen Jahren auch vermehrt organische filmbildende **Beschichtungen aus Polyurethan** in Schächten eingesetzt. In Einzelfällen, wie z.B. im Rahmen des Forschungsvorhabens „Demonstrationsobjekt Hamburger Sammlersystem“ [46], wurden auch Betonkorrosionsschutzmaßnahmen auf der Basis von Epoxidharzen erprobt. Allerdings waren die Erfahrungen hier i.d.R. negativ, so verhinderte z.B. nachdrückendes Grundwasser die Haftung des Harzes in der Aushärtungsphase und zeitliche Verzögerungen beim Aufbringen der einzelnen Schichten reduzierten die Haftung oder es kam zu Blasenbildungen in der Beschichtung bzw. Rissen und Abplatzungen. Entsprechend werden Epoxidharze derzeit kaum eingesetzt und auch im Rahmen der vorliegenden Untersuchung nicht weiter betrachtet.

3.3.1 Mörtelbeschichtung

3.3.1.1 Produkte und Materialeigenschaften

Die in Schächten zur Beschichtung eingesetzten mineralischen Mörtelsysteme sind heute in der Regel kunststoffmodifiziert und werden als Trockenmörtel, z.B. in Säcken, auf die Baustelle geliefert, wo sie in der Regel nur noch mit Wasser unter Beachtung der vorgegebenen Mischzeit angemischt werden müssen. Nach [47] beschränkt sich das Anwendungsspektrum von rein mineralischen Zementmörteln für Instandsetzungen nur auf wenige Ausnahmefälle. Gegenüber kunststoffmodifizierten Zementmörteln weisen sie i.d.R. eine geringere Zugfestigkeit, eine geringere Beständigkeit gegen chemischen bzw. biochemischen Angriff sowie eine stärkere Rissneigung auf (vgl. [48]).

Die Verarbeitungszeit von Mörteln auf der Baustelle beträgt in Abhängigkeit von Umgebungstemperatur, Wassergehalt und Förderdruck zwischen 30 und 45 Minuten. Die heute verwendeten Mörtelsysteme zeichnen sich aus durch ihre hohe Widerstandsfähigkeit gegenüber einem starken chemischen Angriff. Nach Herstellerangaben sind pH-Bereiche angreifender Medien zwischen pH 3 und pH 11 langfristig ohne schädigende Auswirkungen auf den Mörtel. Bei einem kurzzeitigen Angriff liegt der Bereich sogar zwischen pH 1 und pH 14. Wie bei allen mineralischen Mörteln muss der Untergrund vor dem Auftragen mattfeucht vorgegärt werden. Darüber hinaus ist auch in Schächten eine mörtelübliche Nachbehandlung notwendig, um die gewünschte Mörtelqualität zu erzielen. Bereits 4 Stunden (bei 10°C) nach Verarbeitung des Mörtels darf das Abwasser wieder die Beschichtung belasten. [49]

Als Mindestwerte für die Schichtdicke von Mörtelbeschichtungen werden nach [50] 5 mm für reaktionsharzgebundene Mörtel, 10 mm für kunststoffmodifizierte Mörtel und 20 mm für zementgebundene Mörtel vorgeschlagen. Die Schichtdicke sollte außerdem mindestens dem dreifachen Größtkorndurchmesser entsprechen.

Die Standsicherheit eines Schachtes kann durch eine Beschichtung mit mineralischem Mörtel wiederhergestellt werden. Dies ist insbesondere bei Schächten aus korrodiertem Mauerwerk der Fall, wo bereits durch das Füllen der Fugen und der fehlenden Klinker mit Beschichtungsmörtel die Tragfähigkeit des Schachtes, im Vergleich zum geschädigten Zustand, erhöht wird.

In Tabelle 4 sind Beispiele für Zementmörtelprodukte für die Beschichtung in Abwasserbauwerken mit den jeweiligen von den Herstellern angegebenen Anwendungsbereichen und Produkteigenschaften aufgeführt.

Tabelle 4 Zementmörtelprodukte zur Beschichtung, Herstellerangaben, Beispiele

Hersteller	Produktbezeichnung	Anwendungsbereiche	Produkteigenschaften
kunststoffmodifizierte Beschichtungsmörtel			
Ergelit Trockenmörtel und Feuerfest GmbH, D-36304 Alsfeld	Kombina KS1 Kombina KS 2 Kombina KT	<ul style="list-style-type: none"> - häusliche (KS 1) und industrielle (KS 2) Abwässer - großflächige Beschichtung von Abwasserbauwerken - Korrosionsschutz gegen aggressive Abwässer (KS 1, KS 2) - Korrosionsschutz gegen normale Abwässer (KT) - Injektionen (KT) 	<ul style="list-style-type: none"> - einkomponentig - beständig gegen Abwässer - wasserundurchlässig - frost- und tausalzbeständig - langfristig temperaturbeständig bis 90°C - gute Haftzugfestigkeit
Mapei GmbH, D-63906 Erlenbach	Sewament 40 Sewament 100	<ul style="list-style-type: none"> - großflächige Beschichtung von Betonflächen, die aggressiven Medien ausgesetzt sind - Setzen von Sohlshalen (Sewament 40) - geeignet für Untergründe mit niedrigem E-Modul (Sewament 100) 	<ul style="list-style-type: none"> - einkomponentig (Sewament 40) - zweikomponentig (Sewament 100) - Oberflächenrissminimierend durch Kunststofffasern - hohe Haftzugfestigkeit
Heidelberger Bauchemie GmbH; D-45711 Datteln	Polymert Kanalspachtel	<ul style="list-style-type: none"> - Egalisierung von Betonoberflächen - Schutz von Betonflächen und Reparaturmörteln im Abwasserbereich 	<ul style="list-style-type: none"> - einkomponentig - hoher Sulfatwiderstand - sehr gute Haftung - leichte Verarbeitbarkeit - einfach glättbar
Pagel Spezialbeton GmbH & Co. KG, D-45355 Essen	KA 20 Kanalmörtel	<ul style="list-style-type: none"> - Beschichtung und Instandsetzung von Beton- und Mauerwerksflächen von abwasserberührten Bauwerken 	<ul style="list-style-type: none"> - einkomponentig - hoher Widerstand gegen chemische Angriffe - sulfatbeständig - leichte Verarbeitbarkeit
SIKA Deutschland GmbH, D-70439 Stuttgart	Sikagard 720 EpoCem Feinspachtel	<ul style="list-style-type: none"> - Entspannungsschicht gegen aufsteigendes Wasser - Glätten von Bruchstellen und Lunkern - Egalisierung von unebenen Beton- und Mörtelflächen in chemischem Milieu 	<ul style="list-style-type: none"> - dreikomponentig (Zement + Epoxidharz) - gute chemische Beständigkeit - sulfatbeständig - hoher Schutz gegen eindringende Medien
Remmers Baustofftechnik GmbH D-49624 Lönningen	AIDA Elastoschlämme	<ul style="list-style-type: none"> - Abdichtung und Beschichtung von Kellern, Behältern und abwassertechnischen Anlagen 	<ul style="list-style-type: none"> - zweikomponentig - rissüberbrückend - hohe chemische Beständigkeit - gute Untergrundhaftung - frostbeständig
MC-Bauchemie Müller GmbH & Co., D-46238 Bottrop	Ombran W Ombran R Konusit KK-10	<ul style="list-style-type: none"> - Abdichtung von Wassereintrüben (Ombran W) - Nachträgliches Abdichten von schadhafte Schachtringfugen (Ombran W) - Reprofilierung, Partielle Instandsetzung (Ombran R) - Ausbesserung von Fehlstellen an Bauwerken der Abwassertechnik (Ombran R) - vorbeugender und instandsetzender Oberflächenschutz von Betonbauteilen im Einflussbereich von biogener Schwefelsäurekorrosion (Konusit KK-10) 	<ul style="list-style-type: none"> - raumbeständig nach DIN 1164 (Ombran W / Ombran R) - Aufquellen bei Wasserbelastung (Ombran W / Ombran R) - hohe Standfestigkeit (Ombran R) - hohe chemische Beständigkeit (Konusit KK-10) - hoher Verschleißwiderstand (Konusit KK-10)
Ecocanal GmbH, D-58239 Schwerte	Permacast 10,000	<ul style="list-style-type: none"> - es lagen keine Angaben vor 	<ul style="list-style-type: none"> - hohe Dichtigkeit - dampfdurchlässig - korrosionsbeständig - hohe Biegezugfestigkeit

Tabelle 4 (Forts.): Zementmörtelprodukte zur Beschichtung, Herstellerangaben, Beispiele

Hersteller	Produktbezeichnung	Anwendungsbereiche	Produkt-eigenschaften
mineralische Zementmörtel			
PCI Augsburg GmbH, D-86159 Augsburg	Kanahaft Kanament	<ul style="list-style-type: none"> - flächige und partielle Ausbesserung von Wand-, Boden- und Deckenflächen - Instandsetzung und Reprofilierung von Betonbauteilen im Abwasserbereich 	<ul style="list-style-type: none"> - einkomponentig - sulfatbeständig - rissfreie Aushärtung - frost- und tausalzbeständig - schnell aushärtend - hohe Haftzugfestigkeit
Hasit Trockenmörtel GmbH & Co. KG, D-85356 Landshut	Schacht- und Sielbaumörtel	<ul style="list-style-type: none"> - Mauermörtel für Kanalklinker - Putzmörtel P III für Kanäle und Schächte - Gefälleestrich für Entwässerungskanäle 	<ul style="list-style-type: none"> - einkomponentig - hoch sulfatbeständig - hoher Widerstand gegen dynamische Beanspruchung - frost- und tausalzbeständig
SAKRET Trockenbaustoffe Europa GmbH & Co. KG, D-44379 Dortmund	Silica-Spritzmörtel SSM 4 P-HS	<ul style="list-style-type: none"> - Instandsetzung von Abwasserbauwerken 	<ul style="list-style-type: none"> - einkomponentig - beständig gegen starken chemischen Angriff - wasserundurchlässig - frostbeständig - geringer Rückprall
MAXIT Deutschland GmbH, D-41517 Grevenbroich	mur 927 Schacht- und Sielbaumörtel	<ul style="list-style-type: none"> - Neubau und Sanierung von Kanal- und Schachtbauwerken - Ausbesserung von Fehlstellen - Fugenglattstrich 	<ul style="list-style-type: none"> - einkomponentig - hoher chemischer Widerstand - wasserundurchlässig - frostbeständig - hohe Haftzugfestigkeit

3.3.1.2 Anforderungen an Mörtelbeschichtungen

Die an Materialien zur Mörtelbeschichtung zu stellenden Anforderungen richten sich nach den im Einzelfall zu erwartenden Beanspruchungen. Dabei ist zu unterscheiden in

- **Beanspruchungen der Mörtelbeschichtung** selbst (durch physikalischen, chemischen, biologischen oder biochemischen Angriff) und
- **Beanspruchungen des Verbundsystems** aus Mörtelbeschichtung und Untergrund (in der Regel durch Eigenspannungen, z.B. infolge von Schwinden).

Die Beanspruchungen treten in der Praxis nicht einzeln, sondern in zeitlich veränderlichen Überlagerungen auf. Die Haftzone zum Untergrund wird durch Scherspannungen und Abreißzugspannungen (Schälspannungen) beansprucht, wobei die folgenden Einwirkungen dominieren (vgl. Abb. 25):

- Schwinden des Beschichtungsmörtels
- Temperaturwechsel (jahreszeitliche Schwankungen, Heißwassereinleitung)
- Rissbewegung im Untergrund z.B. infolge dynamischer Beanspruchungen durch Verkehrslasten.

Die Adhäsionsfestigkeit kann dabei stark beeinträchtigt werden durch

- chemischen Angriff (biogene Schwefelsäurekorrosion) und
- Feuchtigkeitszutritt aus dem Untergrund.

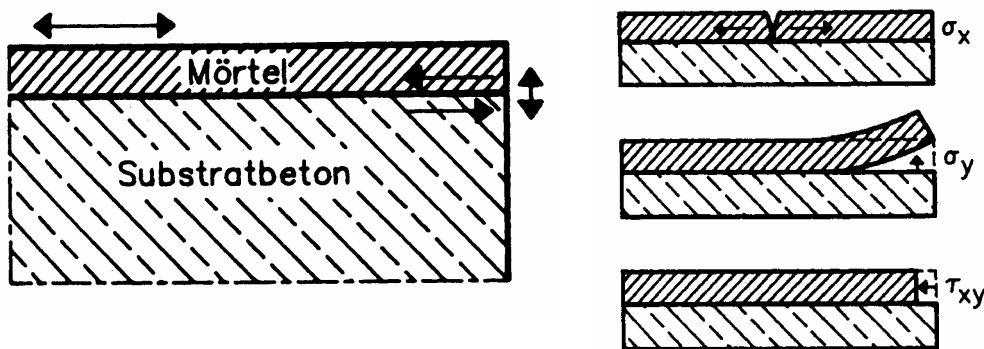


Abb. 25: Versagensarten einer Mörtelbeschichtung auf einem Betonuntergrund infolge von Eigenspannungen aus Temperaturänderung und Schwinden (aus [54])

Einen Überblick über die in der Verbundfuge auftretenden Beanspruchungen infolge Schwindens gibt Abb. 26. Bei den gekrümmten Schachtinnenflächen treten zusätzlich zu den bei ebenen Flächen üblichen Schubspannungen in der Verbundfuge infolge von Schwinden auch Radialspannungen auf, die eine zusätzliche Beanspruchung für den Verbund zwischen Be-

schichtung und Untergrund darstellen und im Fall eines nicht ausreichenden Verbundes zu einem Abheben der Beschichtung vom Untergrund mit der Bildung eines Ringspaltes führen können. Voraussetzung hierfür ist allerdings, dass die Beschichtung selbsttragend ist und eine ausreichende Festigkeit besitzt, um die auftretenden Spannungen rissefrei aufzunehmen.

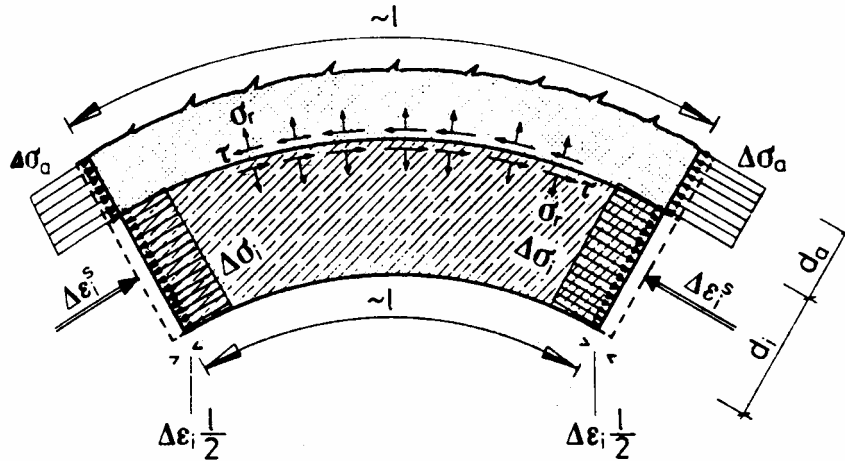


Abb. 26: Spannungen in der Verbundfuge infolge des Schwindens der Beschichtung [51]

Sofern kein Versagen in der Verbundfuge auftritt, besteht - insbesondere bei dünnen Zementmörtelbeschichtungen - die Gefahr der Rissebildung aufgrund der genannten Beanspruchungen.

3.3.1.3 Verfahrenstechniken

In Abhängigkeit von der Art der Aufbringung einer Mörtelbeschichtung unterscheidet man folgende Verfahren:

- **Auftragen von Hand,**
- **Anschleuderverfahren und**
- **Nassspritzverfahren.**

Das **Auftragen von Hand** wird auch heute noch zur Beschichtung von Schächten eingesetzt. Nach Angaben von Verfahrensanbietern lassen sich damit Schachtbeschichtungen bis zu einer Tiefe von ca. 3,5 m wirtschaftlich ausführen. Ein Vorteil des Auftragens von Hand besteht darin, dass die Beschichtung mit einer Kelle aufgetragen und geglättet wird und somit immer eine relativ glatte Oberfläche besitzt.

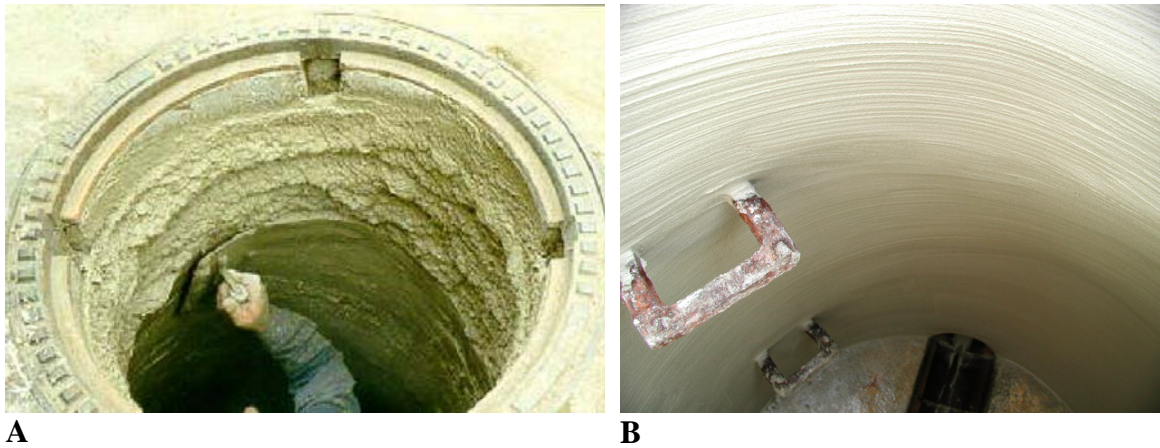


Abb. 27: Mörtelbeschichtung von Hand. A: Auftragen und Glätten einer Beschichtung von Hand [52]. B: Beschichteter Schacht.

Bei dem **Anschleuderverfahren** wird der Beschichtungsmörtel durch einen schnell rotierenden Schleuderkopf gegen die Schachtinnenwand geworfen. Nach Ansetzen und Zentrieren des Schleuderkopfes an der Schachtöffnung wird das Gerät mit konstanter Geschwindigkeit von oben in den Schacht bis zur Sohle herabgelassen und wieder hochgezogen. Dabei erfolgt das Anschleudern des Mörtels an die Schachtwand durch Rotation des Schleuderkopfes. Durch in diesem radial angeordnete und im Außenbereich kammartig ausgebildete Bleche wird der Mörtel fein verteilt. Die gewünschte Schichtdicke wird bei konstanter Mörtelzufuhr und Rotationsgeschwindigkeit des Schleuderkopfes und bei konstanter Ziehgeschwindigkeit durch die Anzahl der Übergänge schichtweise aufgebaut. Die Schichtdicke pro Übergang liegt etwa zwischen 0,5 und 1,3 mm. In der Regel beträgt die Dicke der fertigen Beschichtung bis zu 20 mm. Es sind aber auch schon Beschichtungsdicken von 40 mm und mehr ausgeführt worden [52].

Die Oberfläche der so aufgetragenen Beschichtung besitzt eine gewisse Rauheit, die von Material- und Verfahrensanbietern mit der Struktur einer Apfelsinhaut verglichen wird (vgl. Abb. 28). Löcher, Fugen und Risse sind vor der Sanierung mit geeigneten Materialien zu profilieren, da die Beschichtung die Struktur der Oberfläche abbildet. Da die Anwendung von Anschleuderverfahren nur für die Schachtwände möglich ist, muss die Beschichtung bzw. Reprofilierung im Bereich der Schachtsohle von Hand ausgeführt werden. Darüber hinaus ist darauf zu achten, dass die Steigeisen der Schächte zur Vermeidung von Spritzschatten in diesen Bereichen vor Ausführung der Beschichtung entfernt werden. Obwohl nach Herstellerangaben auch das Glätten einer Beschichtung bei Ausführung des Anschleuderverfahrens prinzipiell möglich ist, wird hierauf heute in der Regel verzichtet (vgl. [33]).



A



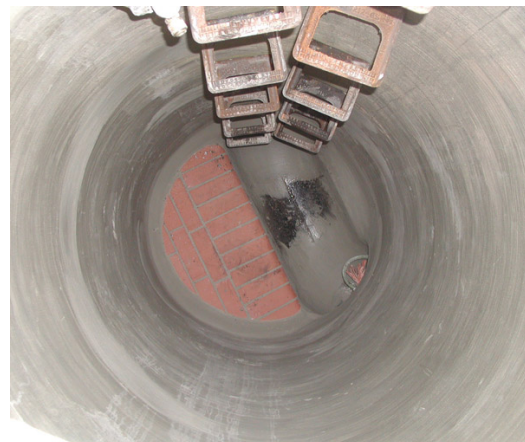
B

Abb. 28: Mörtelbeschichtung im Anschleuderverfahren. **A:** Anschleudermaschine für Schachtbeschichtungen. **B:** Beschichteter Schacht [52].

Beim **Nassspritzverfahren** wird der Mörtel in Zwangsmischgeräten (wie z.B. Tellermischer oder Zwangsmischer) angemischt, über eine Schneckenpumpe zu einer Spritzdüse befördert und mittels an der Spritzdüse eingebrachtem Luftdruck mit 3 bis 5 bar auf die Schachtwandung aufgespritzt. Um eine homogene Schicht zu erhalten, ist es notwendig, die Spritzdüse mit gleichbleibender Geschwindigkeit und gleichbleibendem Abstand zur Wandung zu führen. So wird z.B. für die Aufbringung von Spritzbeton empfohlen (vgl. [53]), den Spritzwinkel möglichst rechtwinklig zur Auftragsfläche zu halten und die Düse mit einem Abstand zur Oberfläche von 50 bis 100 cm zu führen. Dies dürfte bei der Beschichtung von Abwasser-schächten mit üblichen Innendurchmessern von 100 cm in der Praxis selten möglich sein (vgl. Abb. 29). Die Oberflächen der einzelnen Spritzschichten dürfen nicht geglättet werden [52]. Gegenüber dem Anschleuderverfahren ist keine einheitliche Geometrie des Schachtbauwerkes erforderlich, so dass auch die Beschichtung der Schachtsohle und der durch Steigeisen verdeckten Bereiche sowie von Versprünge, Ecken und Kanten mit diesem Verfahren möglich ist.



A



B

Abb. 29: Mörtelbeschichtung im Nassspritzverfahren. **A:** Aufspritzen des Mörtels. **B:** Beschichteter Schacht.

3.3.2 Polyurethanbeschichtung

3.3.2.1 Produkte und Materialeigenschaften

Filmbildende Beschichtungen können aus einer oder mehreren Schichten bestehen, die jeweils eine Dicke zwischen 0,1 mm und 0,3 mm besitzen. Art und Anzahl der einzelnen Schutzschichten richten sich nach der Schutzfunktion, die sich aus den Anforderungen und Beanspruchungen ergeben [54]. Filmbildende Beschichtungen werden ausschließlich aus organischen Materialien hergestellt (z.B. Epoxidharze, Polyurethane etc.). Von diesen Materialien wird für die Schachtbeschichtung heute fast ausschließlich **Polyurethan** verwendet.

Die heute eingesetzten Polyurethansysteme bestehen aus den beiden Rohstoffkomponenten Polyisocyanaten und Polyolen. Ihre Verarbeitung kann auf Niederdruck- oder Hochdruck-spritzmaschinen (vgl. Abb. 30) bei Raumtemperatur erfolgen, wobei die hohe Thixotropie der Reaktionsmischung ein Abfließen des Polyurethans unmittelbar nach dem Aufspritzen verhindert. Bereits 30 Minuten nach dem Auftrag der Beschichtung kann diese begangen werden, nach 4 Stunden (bei 10°C) ist die Beschichtung vollkommen ausgehärtet. [55]



Abb. 30: Auf einen PKW-Anhänger montierte Verarbeitungsmaschine MPS 20 für 2-Komponenten Polyurethansysteme [62]

Nach Herstellerangaben [56] können die wesentlichen Merkmale einer Polyurethanbeschichtung wie folgt zusammengefasst werden:

- kurze Fertigungszeit durch hohe Reaktivität des Materials (Aushärtezeit wenige Minuten),
- gute Haftung auf Beton,
- Temperaturbeständigkeit,
- chemische Beständigkeit gegen saure und basische Medien,
- Witterungsbeständigkeit,
- hoher Wasserdampfdiffusionswiderstand und Wasserundurchlässigkeit,

- hohe Steifigkeit und Schlagzähigkeit.

Nahezu alle der bislang eingesetzten Polyurethane reagieren im nicht ausgehärteten Zustand, also während des Auftragens bis zum Abschluss des Abbindeprozesses, mit Wasser. Dies führt zu Blasenbildung und Aufschäumen des Polyurethans mit der Folge, dass kein Verbund zum Untergrund entsteht. Daher darf die Untergrundfeuchtigkeit für die heute verwendeten Polyurethane in Abhängigkeit des verwendeten Systems nicht über 6 Masse%, und die Temperatur des Untergrundes nicht weniger als 3°C über den vor Ort herrschenden Taupunkttemperaturen liegen.

In Tabelle 5 sind Beispiele für Polyurethanprodukte für die Beschichtung in Abwasserbauwerken mit den jeweiligen von den Herstellern angegebenen Anwendungsbereichen und Produkteigenschaften aufgeführt.

Tabelle 5: Polyurethanprodukte zur Beschichtung, Herstellerangaben, Beispiele

Hersteller	Produktbezeichnung	Anwendungsbereiche	Produkteigenschaften
Relius Coatings GmbH & Co. KG, D-44143 Dortmund	Oldodur WS 56	- Abdichtung von Bauwerksflächen auch in abwasserbelasteten Bereichen	- zweikomponentig - nicht aufschäumend - gute Betonhaftung - chemikalienbeständig - abriebfest
Bayer Polymers Customer Services GmbH & Co. KG D-51368 Leverkusen	Baytec RT	- Korrosionsschutz großflächiger Teile - wasserundurchlässige Versiegelung poröser Materialien	- zweikomponentig - faser- und lösemittelfrei
MC Bauchemie GmbH & Co., D-46238 Bottrop	Konudur Pipe-Grout S	- Schutz von Beton- und Stahloberflächen in Gasleitungen und anderen Medienrohren - Korrosionsschutz von Stahl - Verschleisschutz von Förderleitungen	- zweikomponentig - rissüberbrückend

3.3.2.2 Anforderungen an filmbildende Beschichtungen

In Abhängigkeit von der Konstruktion können an **organischen filmbildenden Beschichtungen** folgende Beanspruchungen wirken (vgl. auch [57]):

- ***Osmotischer Druck hinter der Beschichtung*** bedingt durch das Bestreben zum Konzentrationsausgleich wasserlöslicher Substanzen.
- ***Diffusionsvorgänge von Schwefelwasserstoff*** mit Zerstörung der Beschichtung oder des Beschichtungsträgers durch Korrosion.
- ***Diffusionsvorgänge von Wasser*** mit verhältnismäßig geringen Drücken auf gering durchlässige oder dichte Beschichtungen. Maximal kann der hydrostatische Wasserdruk anstehen.
- ***Kapillardruck durch kapillaren Wassertransport*** in den Porenräumen des beschichteten Betons.

In mehreren Untersuchungen [58], [59], [60] zeigte sich, dass die Beanspruchung durch osmotischen Druck in organischen Beschichtungen zur Bildung zahlreicher kleiner Bläschen führen kann. Dieses Schadensbild tritt allerdings vorwiegend bei sehr dünnen Beschichtungen auf und konnte bei Untersuchungen an Polyurethanbeschichtungen in Schächten, mit den dort üblichen Schichtdicken von mindestens ca. 1 mm, nicht festgestellt werden (vgl. [5]). Ein Aufschäumen des Polyurethans während des Auftrags, mit in der Folge mangelhaftem Verbund zwischen Untergrund und Schachtbeschichtung, wird in der Praxis meist auf eine zu hohe Feuchtigkeit des zu beschichtenden Untergrundes zurückgeführt.

3.3.2.3 Verfahrenstechnik

Die zur Sanierung von Schächten mit Polyurethanen konzipierten Zweikomponenten-Spritzanlagen zeichnen sich durch einen verhältnismäßig kleinen, gut handhabbaren Mischkopf aus (vgl. Abb. 31), in dem beide Komponenten vor Austritt aus der Düse in einem Statikmischer (vgl. Abb. 32) vermischt werden. Zweikomponenten-Polyurethan besitzt eine hohe Reaktivität, so dass in wenigen Minuten nach dem Aufspritzen bereits ein geschlossener Film vorliegt [56].



Abb. 31: Mischkopf und Spritzdüse

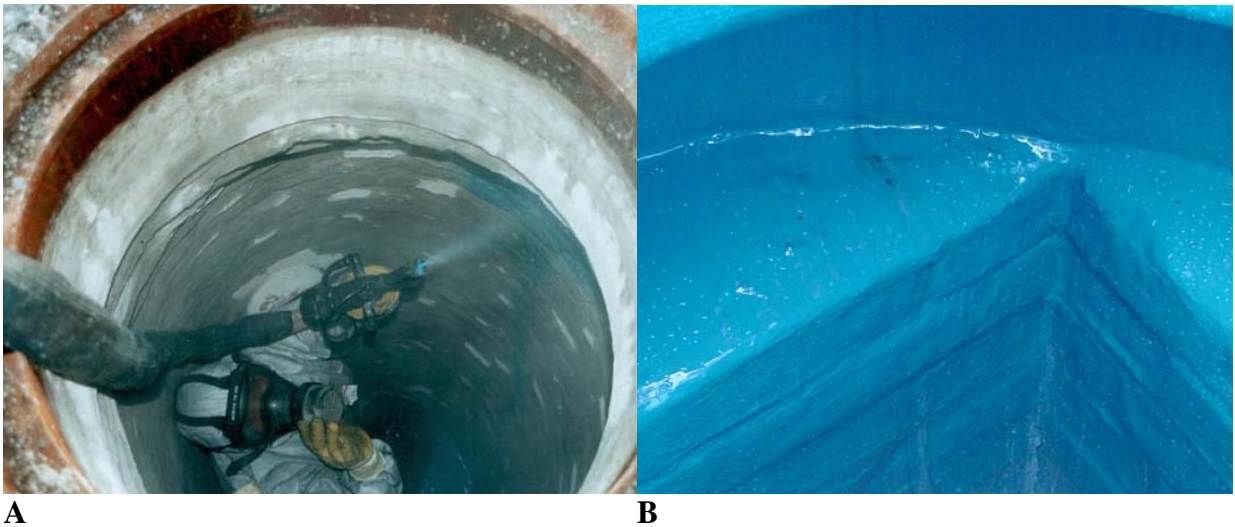


Abb. 32: Detailansicht Statikmischer

In Abhängigkeit von der Art der Aufbringung einer Polyurethanbeschichtung unterscheidet man folgende Spezialverfahren:

- **Anspritverfahren und**
- **Sprüh- Schleuderverfahren.**

Beim *Anspritverfahren* wird das Polyurethanmaterial mit einem Druck von ca. 4,5 bar händisch auf den Untergrund gesprüht. In einem Arbeitsgang können Schichtdicken von ca. 0,5 mm aufgebracht werden, ohne dass das Material stark verläuft [61].



A

B

Abb. 33: Polyurethanbeschichtung im Anspritzverfahren. **A:** Anspritzen des Polyurethans.
B: Beschichteter Schacht.

Für Polyurethan existiert darüber hinaus ein sogenanntes **Sprüh - Schleuderverfahren**, bei dem das flüssige Polyurethan auf einen rotierenden Teller gespritzt und durch die Rotation auf die Schachtwand geschleudert wird (siehe Abb. 34). Hierbei gelten allerdings die gleichen Einschränkungen wie beim Anschleuderverfahren für mineralische Mörtel, so dass ein Teil der Beschichtung (z.B. im Bereich der Steigeisen und Schachtsohle) immer mit dem Aufspritzverfahren aufgetragen werden muss.



A



B

Abb. 34: Polyurethanbeschichtung mittels Sprüh – Schleudertechnik. **A:** Halterung und Führung der Schleuderscheibe. **B:** Schleuderscheibe mit Teller, Misch- und Aufsprüh-einheit [62].

3.3.3 Qualitätssicherungsmaßnahmen

In verschiedenen Richtlinien (vgl. [50], [63]) finden sich Hinweise zum Vorgehen sowie zur Sicherstellung bzw. Kontrolle der Qualität einer Sanierung mittels Beschichtungsverfahren. Zusätzlich werden in Informationsschriften bzw. Sachstandsberichten (vgl. [38], [64]) Anforderungen und Prüfungen an Beschichtungsmaterialien aufgeführt. In der Regel werden von den Herstellern der Beschichtungsmaterialien Verarbeitungsrichtlinien herausgegeben und in Qualitätshandbüchern der Verarbeiter Qualitätssicherungsmaßnahmen für den vorliegenden Anwendungsfall beschrieben.

3.3.3.1 Planung und Vorbereitung

Vor Beginn der Sanierungsarbeiten ist der **Ist-Zustand** (Umgebungs- und Nutzungsbedingungen, Bauwerks- und Baustoffeigenschaften) des zu sanierenden Schachtes durch entsprechende Untersuchungen bzw. Prüfungen festzustellen.

Aufzunehmen sind dabei z.B. (nach [38], [50])

- mechanische Einwirkungen (wie z.B. Verkehrsbelastung),
- physikalische und chemische Einwirkungen (z.B. aus Temperatur, Feuchte, Frost, Tausalzen, biogener Schwefelsäure etc.),
- Abmessungen und Zugänglichkeit,
- optischer Eindruck (z.B. Abplatzungen, Risse, Rostfahnen, Ausblühungen, Verschmutzungen, fehlende Teile etc.),
- Druckfestigkeit des Untergrundes sowie
- Oberflächenzugfestigkeit des Untergrundes.

Darüber hinaus empfiehlt es sich, im Rahmen der Sanierungsvorbereitung die

- Einwirkungen aus Betrieb (z.B. Reinigung, Wartung),
- Notwendigkeit / Einsetzbarkeit einer Wasserhaltung,
- Aushärtebedingungen und den
- Zeitpunkt der erneuten Belastung des Schachtes nach Sanierung zu dokumentieren.

Bei allen Beschichtungsarbeiten kommt dem **Untergrund** und seiner Beschaffenheit eine wesentliche Bedeutung zu. Er muss z.B. Spannungen aus dem Schwinden der Beschichtungsstoffe und nach deren Aushärtung auch Eigenspannungen im Beschichtungssystem aus Temperatur- und Feuchteänderungen sowie die auf die Beschichtung einwirkenden äußeren Kräfte aufnehmen können.

In der Regel ist jeder Untergrund so vorzubereiten, dass zwischen ihm und der aufzubringenden Beschichtung ein fester und dauerhafter Verbund erzielt wird. Der Beschichtungswerk-

stoff muss die Oberfläche gut benetzen, fest auf ihr haften und sich mit ihr „verzahnen“ können. Insbesondere Schachtinnenflächen mit ihren spezifischen Verschmutzungen aus dem Abwasser sollten daher vor jeder Art von Beschichtung vorbereitet werden, um einen tragfähigen Untergrund sicherzustellen. Nach [50] muss ein Untergrund für eine Beschichtung

- frei sein von losen und mürben Teilen (z.B. auch von minderfesten Risskanten) und von sich leicht ablösenden arteigenen Schichten (z.B. Zementhaut) und darf nicht abmehlen oder absanden,
- frei sein von Graten (in zu begründenden Fällen können sie belassen werden),
- eine dem zu verwendenden Beschichtungsstoff angepasste Rauheit aufweisen,
- frei sein von artfremden Stoffen (wie Trennmittel, ungeeigneten Altbeschichtungen, Ausblühungen, Öl, Bewuchs u.ä.).

Vor einer Schachtbeschichtung wird die Schachtwandung in der Regel mit Hochdruckwasserstrahlen gereinigt. Hierbei werden von den meisten Firmen herkömmliche Hochdruckreiner mit Handlanzen eingesetzt (vgl. Abb. 35). Bei der Mörtelbeschichtung im Anschleuderverfahren kommen auch rotierende Schachtreinigungsdüsen, ein Spezialverfahren zur Reinigung von Schachtinnenwänden, zum Einsatz (vgl. Abb. 36). Bei diesem Verfahren wird ein horizontal rotierender Düsenarm, an dessen Enden zwei Düsen angebracht sind, mit einer Winde durch den Schacht geführt. Es kann ein Arbeitsdruck von 300 bar erreicht werden. Der Düsenarm ist von 500 bis 1.100 mm stufenlos verstellbar, so dass der Düsenabstand von der Schachtwandung für verschiedene Schachtdurchmesser individuell eingestellt werden kann [52].



Abb. 35: Wasserhochdruckreinigung mit Handlanze



Abb. 36: Wasserhochdruckreinigung mittels rotierender Schachtreinigungsdüse [52]

Ein besonderes Augenmerk gilt möglichen Fettablagerungen, die sich in der Regel nur sehr schwer entfernen lassen. Korrodierte Fugen, fehlende Klinker und andere Hohlstellen sind sachgerecht auszuarbeiten und auszufüllen.

Undichte Stellen mit ständigem Wasserzutritt müssen im Vorfeld mit geeigneten Materialien bzw. Verfahren geschlossen werden [55].

In Tabelle 6 sind für einige Mörtel- und Polyurethanprodukte Herstellerangaben über notwendige Untergrundvorbereitungsmaßnahmen vor Auftrag der Beschichtung aufgelistet.

Tabelle 6: Herstellerangaben über Maßnahmen zur Untergrundvorbereitung vor dem Auftrag einiger Mörtel- und Polyurethanprodukte

Hersteller	Beschichtungsprodukte	erforderliche Maßnahmen zur Untergrundvorbereitung*
Mörtel		
Ergelit	Kombina (KT, KS1, KS 2, KS 2a, KS 2b) Schachtbaumörtel SBM	Der Untergrund muss fest und frei von losen oder absandenden Teilen sein. Sämtliche Ablagerungen und besonders fettige oder auch trennende Bestandteile (z.B. Kunststoffbeschichtung) sind zu entfernen. Wasserstrahlen oder Sandstrahlen ist notwendig. Der Untergrund muss vorgenässt werden. Fließendes Wasser darf nicht vorhanden sein.
Mapei	Sewament (40, 100)	Lose bzw. minderfeste Bereiche des Untergrundes sind bis auf den rauhen und tragfähigen mineralischen Kernbeton zu entfernen. Hierbei sind neben losen oder minderfesten Bestandteilen auch Verschmutzungen, Zonen mit Sulfatanreicherungen und sonstige artfremde bzw. sich haftungsmindernd auswirkende Substanzen komplett zu entfernen.
PCI	Kanahaft, Kanament	Der Untergrund muss frei von haftungsfeindlichen Bestandteilen und Rissen sowie fest und tragfähig sein. Der Untergrund muss mattheucht, darf jedoch nicht nass sein. Geschädigter Beton und Bereiche mit schädlichen Salzen (z.B. Nitrate, Gips und andere Sulfate) sind mit geeigneten Verfahren abzutragen.
Hasit	Schacht- und Sielbaumörtel	Der Untergrund muss tragfähig, trocken, staubfrei, frei von Mörtelresten und Verunreinigungen aller Art sein. Stark saugende Untergründe sind vorzunässen.
Pagel	KA 20 Kanalmörtel	Der Untergrund ist gründlich zu reinigen. Lose und hafthemmende Teile sowie Zementschlämme durch Druckwasserstrahlen o.Ä. bis zum tragfähigen Korngefüge entfernen. Der Untergrund ist vor dem Auftrag bis zur Sättigung vorzunässen.
Polyurethan		
Relius Coatings	Oldodur WS 56	Der Untergrund darf mattheucht, aber nicht nass sein. Alte Farbanstriche unbekannter Zusammensetzung sind in jedem Fall vorher restlos entfernen. Der Untergrund muss frei von Dichtungs- und Trennmitteln sein. Verschmutzungen, Zementschlämme und nicht tragfähige Schichten sind durch geeignete Strahlverfahren zu entfernen.
Bayer	Baytec RT	Der Untergrund muss vor der Beschichtung mit Hochdruckwasserdampf gereinigt werden. Auf eine vollständige Austrocknung des Untergrundes kann verzichtet werden.
MC-Bauchemie	Konudur Pipe-Grout S	Der Untergrund ist vor der Beschichtung sorgfältig zu reinigen. Die Oberflächen müssen durch geeignete Verfahren so vorbereitet werden, dass sie frei von Zementschlämmen, Staub, Öl und sonstigen trennend wirkenden Stoffen sind.

* Herstellerangaben aus Verarbeitungsrichtlinien, Materialdatenblättern, Broschüren

Nach der Vorbereitung des Untergrundes ist zu prüfen, ob die zu beschichtende Fläche die erforderlichen Eigenschaften besitzt. Das wichtigste Kriterium hierfür ist **die Oberflächenzugfestigkeit** (auch als Abreißfestigkeit bezeichnet) des Untergrundes. Bei Beschichtungen aus Polyurethan ist darüber hinaus das Einhalten der Grenzwerte für die **Untergrundfeuchtigkeit** von entscheidender Bedeutung.

Nahezu alle der bislang eingesetzten Polyurethane reagieren im nicht ausgehärteten Zustand, also während des Auftragens bis zum Abschluß des Abbindeprozesses, mit Wasser. Dies führt zu Blasenbildung und Aufschäumen des Polyurethans mit der Folge, dass kein Verbund zum Untergrund entsteht. Aus diesem Grund muss vor dem Auftragen eines Polyurethans immer die Feuchtigkeit des Untergrundes gemessen werden. Die Untergrundfeuchtigkeit darf für die heute verwendeten Polyurethane in Abhängigkeit des verwendeten Systems die von den Herstellern vorgegebenen Grenzwerte, z.B. 6 Masse%, nicht überschreiten.

Die an einen Betonuntergrund zu stellenden Anforderungen an die mechanischen Eigenschaften sind u.a. in [50] aufgeführt. Für Mörtelbeschichtungen und filmbildende Beschichtungen wird dort eine Oberflächenzugfestigkeit der Betonunterlage von im Mittel $1,5 \text{ N/mm}^2$ mit einem kleinsten Einzelwert von $1,0 \text{ N/mm}^2$ gefordert. Die Übertragbarkeit dieser Werte auf die Bedingungen von Beschichtungen in Abwasserschächten ist fraglich.

In den Informationen Nr. 18 des Arbeitskreises Nr. 3 der GSTT „Anforderungen an Mörtel für Abwasserkanäle und Bauwerke der Ortsentwässerung, Teil1: Zementgebundener Mörtel“ [38] werden mechanische Anforderungen an den Untergrund für den Anwendungsfall in Schächten der Ortsentwässerung in Abhängigkeit des Schachtdurchmessers, des Untergrundmaterials und der aufzubringenden Schichtdicke exemplarisch dargestellt (vgl. Tabelle 7). Zusätzlich geben die Hersteller der Beschichtungsprodukte Mindestuntergrundfestigkeiten für den Einsatz der Produkte vor (vgl. Tabelle 8).

Tabelle 7: Mechanische Anforderungen an den Untergrund vor der Beschichtung (aus [38])

Anforderungen an den Untergrund					
	Bei Rohren und Schächten bis 1,50 m Durchmesser und Vollauskleidung (unabhängig vom Untergrund)		Bei allen anderen Fällen		
	Schichtdicken [mm]		Beton	Mauerwerk	
	< 15	15 – 40			Mittelwert
Oberflächenzugfestigkeit [MPa]	wie „Bei allen anderen Fällen“		> 1,0	> 0,5	≥ 0,3
Druckfestigkeit [MPa]	> 20	> 15	> 20	> 20	

Tabelle 8: Herstellerangaben über Mindestuntergrundfestigkeiten für den Einsatz einiger Mörtel- und Polyurethanprodukte

Hersteller	Produkt	Mindestuntergrundfestigkeit*
Mörtel		
Ergelit	Kombina KT, KS 1, KS 2, KS 2a, KS 2b	keine Angabe
Mapei	Sewament 40, 100	$\geq 1,5 \text{ N/mm}^2$
Pagel	KA 20 Kanalmörtel	$\geq 1,5 \text{ N/mm}^2$
Sika	Sikagard 720 EpoCem Feinspachtel	$\geq 1,5 \text{ N/mm}^2$
Polyurethan		
Relius Coatings	Oldodur WS 56	$\geq 1,5 \text{ N/mm}^2$
Bayer	Baytec RT	keine Angabe

* Herstellerangaben aus Verarbeitungsrichtlinien, Materialdatenblättern

Weist der Beton bzw. das Mauerwerk Schäden infolge eines chemischen Angriffs auf, so sind die Tiefe der Einwirkung und die Verteilung eventuell vorhandener Fremdstoffe zu ermitteln und die erforderliche Vorgehensweise (z.B. in Bezug auf den Abtrag des geschädigten Teils) festzulegen. Bei chemischen Reaktionen innerhalb der Schachtwand (z.B. Ausblühungen, Alkalitreiben) sind eingehende Untersuchungen über Art, Ursache und mögliche Auswirkungen zu empfehlen. [50]

3.3.3.2 Sanierungsausführung

Während der Sanierungsausführung können insbesondere widrige Witterungsbedingungen, falsche Materialauswahl sowie Nichtbeachtung der Verarbeitungsrichtlinien der Materialhersteller zu qualitativ schlechten Sanierungsergebnissen führen.

In Tabelle 9 sind die in [50] geforderten Grenzwerte für die **klimatischen Bedingungen** bei der Beschichtung mit zement- und kunststoffgebundenen Stoffen dargestellt. Diese sind einzuhalten, sofern für die einzusetzenden Stoffe keine abweichenden Herstellerangaben bestehen.

Tabelle 9: Grenzwerte für die klimatischen Bedingungen bei der Beschichtung mit zement- und kunststoffgebundenen Stoffen [50]

Exposition	Zementgebundene Stoffe, auch mit Kunststoffzusatz	Kunststoffgebundene Stoffe
Relative Luftfeuchte	Keine Forderung	Bauteiltemperatur muss mindestens 3 K über dem Taupunkt liegen
Niederschlag	Kein Regen	Kein Regen oder Nebelnässen
Wind	Windstärke ≤ 3 Beaufort ¹⁾ , entsprechend ca. 5 m/s	Staub muss ferngehalten werden
Sonne	Austrocknung durch Sonneneinstrahlung muss verhindert werden	Keine Anforderung

¹⁾ Blätter und dünne Zweige bewegen sich

Zusätzlich müssen die Umgebungstemperaturen während des Auftrags und in einem angemessenen Zeitraum danach bei zementgebundenen Beschichtungsstoffen zwischen 5°C und 30°C sowie für Reaktionsharze zwischen 8°C und 40°C liegen.

Während der **Beschichtung mit Mörteln** sollten nach [38] folgende **qualitätssichernde Maßnahmen** durchgeführt werden:

- Überprüfung des w/z – Wertes durch Notieren der Mischungsverhältnisse,
- Überprüfung der Mischdauer und bei maschineller Verarbeitung auch des Luftdrucks, des Düsenabstandes sowie Kontrolle des Schichtaufbaus,
- visuelle Überprüfung der Konsistenz des Frischmörtels auf der Baustelle, ggf. Messung des Ausbreitmaßes mit dem Haegermann-Tisch,
- Dokumentation der Mörtelsorten, Lagerungsart- und ggf. -dauer,
- Aufzeichnung, Kontrolle von Außentemperatur, Temperatur des Bauwerks, relativer Luftfeuchtigkeit, Temperatur des Anmachwassers und der Frischmörteltemperatur.

Vor dem Auftragen der meisten Mörtel muss der Untergrund mattfeucht vorgehästet werden [65], [66]. Auch bei einem Auftragen von mehreren Mörtelschichten sollte die jeweilige Untergrundsicht stets feucht sein.

In Tabelle 10 sind Herstellerangaben über einzuhaltende w/z – Werte einiger Mörtelprodukte beispielhaft dargestellt.

Tabelle 10: Herstellerangaben über einzuhaltende w/z – Werte einiger Mörtelprodukte

Mörtelprodukt	Herstellerangaben*	aus den Herstellerangaben berechneter w/z-Wert
Ergelit Kombina KT	keine Angaben	keine Angaben
Ergelit Kombina KS 1	5,6 - 7,2 Liter Wasser pro Verpackungseinheit (40 kg Sack)	0,14 - 0,18
Ergelit Kombina KS 2b	6,4 - 10,0 Liter Wasser pro Verpackungseinheit (40 kg Sack)	0,16 - 0,25
Mapei Sewament 40	2,85 - 3,1 Liter Wasser pro Verpackungseinheit (25 kg Sack)	0,114 – 0,124 (max. 0,15)
Mapei Sewament 100	Mischung Pulver : Flüssigkeit 5,3 : 1	0,19 (2-Komponentenmörtel)
PCI Kanahaft	ca. 5,5 Liter pro Verpackungseinheit (25 kg Sack)	0,22
PCI Kanament	3,5 l (händisch) - 4,5 l (maschinell) auf 25 kg Sack	0,14 – 0,18

* Herstellerangaben aus Verarbeitungsrichtlinien, Materialdatenblättern

Routinekontrollen während der **Beschichtung mit Polyurethanen** betreffen z.B. (nach [55])

- die Umgebungs- und Untergrundtemperatur (Kontrolle mit Stab- oder Digitalthermometer),
- die Überwachung der Luftfeuchtigkeit mit Thermohygrographen,
- die Verarbeitungszeiten,
- die Oberfläche der einzelnen Schichten nach Augenschein auf Gleichmäßigkeit und Fehlstellen,
- die Beschaffenheit der mit Reaktionsharz behandelten Untergrundfläche nach Augenschein,
- die Schichtdicken während der Ausführung,
- den Aushärtungszustand der Schichten.

Grundsätzlich sollte bei der Schachtbeschichtung mit Polyurethanen für die Dauer des Auftrags und der Aushärtung des Materials ein trockener Untergrund sichergestellt sein. Dazu sind in Abhängigkeit der Randbedingungen umfangreiche Maßnahmen erforderlich. Bei der Verarbeitung ist strikt darauf zu achten, dass der Verarbeiter keine Spritznebel einatmet. Der Einsatz von Frischluftmasken mit ausreichender Frischluftzufuhr ist erforderlich. [67]

An das **Baustellenfachpersonal** sind besondere **Anforderungen** zu stellen. Nach [50] muss „auf der Baustelle ... ein geschulter, insbesondere handwerklich ausgebildeter Fachmann des Unternehmens ständig anwesend sein, der je nach Umfang, Art und Schwierigkeitsgrad der

Schutz- und Instandsetzungsmaßnahme betontechnische und entsprechende andere baustofftechnische Kenntnisse, Fertigkeiten und praktische Erfahrungen besitzt.“

Die Befähigung für Beschichtungsarbeiten muss gemäß [50] der Überwachungsstelle durch eine entsprechende Bescheinigung (z.B. durch eine Bescheinigung des Ausbildungsrates „Verarbeiten von Kunststoffen im Betonbau“ beim Deutschen Beton- und Bautechnik-Verein e.V.) nachgewiesen werden. Das Unternehmen hat nachzuweisen, dass das maßgebende Baustellenfachpersonal in Abständen von höchstens drei Jahren über Schutz- und Instandsetzungsmaßnahmen so unterrichtet und geschult wird, dass es in der Lage ist, alle Maßnahmen für eine ordnungsgemäße Durchführung der Instandsetzungsmaßnahme einschließlich der Prüfungen zu treffen.

3.3.3.3 Nachbehandlung und Nachuntersuchungen

Nach Abschluss der Sanierungsarbeiten sollten speziell Mörtelbeschichtungen entsprechend nachbehandelt werden. Durch Untersuchungen am sanierten Schachtkörper lässt sich die Qualität der ausgeführten Sanierung überprüfen.

Alle mineralischen Mörtel sollten nach Abschluss der Arbeiten vor einem zu schnellen Austrocknen geschützt werden, da hierdurch das Schwinden begünstigt wird. Eine **Nachbehandlung**, z.B. durch Befeuchtung der Beschichtung, Abdecken oder Abhängen mit Folien, wirkt sich günstig auf deren Schwindverhalten aus [47]. Nach [63] ist „die Nachbehandlung ... nach Art und Dauer entsprechend den Angaben des Stoffherstellers in den Ausführungsanweisungen unter Beachtung der jeweiligen Umgebungstemperaturen, jedoch mindestens 5 Tage, durchzuführen.“ Bei Polyurethanbeschichtungen müssen entstandene Blasen entfernt und nach Klärung der Ursache erneut verschlossen werden. Weitere Nachbehandlungsmaßnahmen sind nicht notwendig (nach [55]).

In Tabelle 11 sind Herstellerangaben über Nachbehandlungsmaßnahmen einiger Mörtel- und Polyurethanbeschichtungsprodukte beispielhaft dargestellt.

Tabelle 11: Herstellerangaben über Nachbehandlungsmaßnahmen bei einigen Mörtel- und Polyurethanprodukten

Hersteller	Produkt	empfohlene Nachbehandlungsmaßnahmen*
Mörtel		
Ergelit	Kombina (KT, KS 1, KS 2b)	mörtelübliche Nachbehandlung
Mapei	Sewament 40, 100	vor Verdunstung schützen (Curingmittel)
PCI	Kanahaft	keine Angaben
	Kanament	vor starker Zugluft, Wind oder Sonneneinstrahlung schützen
Polyurethan		
Relius Coatings GmbH & Co.KG	Oldodur WS 56	entstandene Blasen müssen entfernt werden, nach Klärung der Ursache mit Handmasse Oldodur WS 56 schließen
Bayer AG	Baytec RT	keine konkreten Angaben („schon nach wenigen Minuten bildet sich eine feste, nahtlose Haut, die von Regen nicht mehr zerstört werden kann“)

* Herstellerangaben aus Verarbeitungsrichtlinien, Materialdatenblättern

Nach [38] sollten z.B. folgende **Untersuchungen am sanierten Schachtkörper** nach Abschluss der Arbeiten durchgeführt werden, um die Qualität der Sanierung zu überprüfen:

- visuelle Kontrolle der Oberfläche, z.B. auf Risse, Durchfeuchtungen,
- Überstreichen der Flächen mit Hammer und Abklopfen auf Hohlstellen,
- Messung der Schichtdicke,
- Prüfung der Haftzugfestigkeit,
- Entnahme von Bohrkernen.

Zusätzlich kann durch Dichtheitsprüfungen nach [28] oder [29] die Dichtheit des sanierten Schachtes kontrolliert werden (siehe auch Abschnitt 3.1.3).

In [38], [50] und [63] wird eine Haftzugfestigkeit von Mörtelbeschichtung auf Betonuntergründen von im Mittel $1,5 \text{ N/mm}^2$ mit einem kleinsten Einzelwert von $1,0 \text{ N/mm}^2$ (28 Tage nach Auftrag der Beschichtung) gefordert. In [50] und [63] werden für Oberflächenschutzsysteme der Klasse OS 11 (OS-F) (Beschichtung mit erhöhter dynamischer Rissüberbrückungsfähigkeit für begeh- und befahrbare Flächen), die in einer Mindestschichtdicke von ca. 2,5 mm ($2.500 \mu\text{m}$) aufgebracht werden (und für die zwei-komponentige Polyurethanbeschichtungen eingesetzt werden können), die gleichen Werte angegeben. In [38] wird ein niedrigerer Wert für die Haftzugfestigkeit einer Mörtelbeschichtung auf Mauerwerk angegeben, im Mittel $0,5 \text{ N/mm}^2$ an mindestens 5 Stellen.

In Tabelle 12 sind Herstellerangaben über erreichbare Haftzugfestigkeiten einiger Mörtel- und Polyurethanbeschichtungsprodukte beispielhaft dargestellt.

Tabelle 12: Herstellerangaben über erreichbare Haftzugfestigkeiten einiger Mörtel- und Polyurethanprodukte (nach 28 Tagen)

Hersteller	Produkt	erreichbare Haftzugfestigkeiten, Herstellerangaben*
Mörtel		
Ergelit	Kombina KT, KS 1, KS 2, KS 2a, KS 2b	$\geq 2,0 \text{ N/mm}^2$
Mapei	Sewament 40	$\geq 1,5 \text{ N/mm}^2$
	Sewament 100	$\geq 2,0 \text{ N/mm}^2$
Pagel	KA 20 Kanalmörtel	$\geq 2,0 \text{ N/mm}^2$
Sika	Sikagard 720 Epo-Cem Feinspachtel	3,0 – 4,0 N/mm ² (nach 7 Tagen)
Polyurethan		
Relius Coatings	Oldodur WS 56	1,4-2,61 ¹⁾ N/mm ²
Bayer	Baytec RT	1,56 N/mm ² (Mittelwert), 1,22-1,81 ²⁾ N/mm ²

* Herstellerangaben aus Verarbeitungsrichtlinien, Materialdatenblättern

1) Angaben gemäß Prüfbericht 2511 des Polymer-Instituts (Forschungsinstitut für polymere Baustoffe Dr. R. Stenner GmbH)

2) Prüfung der Haftzugfestigkeit des Materials auf mit TMA-Trennmittel bestrichenen Gehwegplatten

3.3.3.4 Materialprüfungen

Zusätzlich zu den o.a. Maßnahmen werden in [38], [50], [63] und [64] Prüfungen an den verarbeiteten Materialien empfohlen. Nach [38] sollte der Auftraggeber „ein Institut bzw. Prüflabor oder einen unabhängigen Sachverständigen mit der Durchführung der Prüfungen beauftragen, wenn Zweifel an der Gleichmäßigkeit des Mörtels bestehen.“

An **Frishmörtelproben** kann beispielsweise das Ausbreitmaß, z.B. gemäß DIN EN 196 [68] oder DIN 18555 [69], und der Erstarrungsanfang und das Erstarrungsende, z.B. nach Vicat gemäß DIN EN 480 [70] bestimmt werden.

An den **gemischten Stoffen eines Polyurethans** kann nach [50] z.B. der Härungsverlauf nach DIN EN ISO 868 [71], die Topfzeit in Anlehnung an den Entwurf der DIN EN ISO 9514 [72] sowie der Gehalt an nichtflüchtigen Anteilen in Anlehnung an DIN EN ISO 3251 [73] bestimmt werden.

An ***Festmörtelproben*** bietet sich beispielsweise die Bestimmung der Biegezugfestigkeit und der Druckfestigkeit nach DIN EN 196 [68] und des E-Moduls, z.B. in Anlehnung an DIN 1048 Teil 5 [74] an.

An den ***gemischten und erhärteten Stoffen eines Polyurethans*** kann nach [50] z.B. der Diffusionswiderstand gegen Wasserdampf nach DIN EN ISO 7783 [75], die Zugfestigkeit in Anlehnung an DIN EN ISO 527 [76] sowie die Biegezug- und Druckfestigkeit in Anlehnung an DIN EN 196 [68] bestimmt werden.

4 In-situ-Maßnahmen

Insgesamt wurden 42 Beschichtungsmaßnahmen in situ begleitet. Die Sanierungsmaßnahmen wurden durch die beteiligten Netzbetreiber beauftragt. An die vor Ort tätigen Fachfirmen wurden seitens der Netzbetreiber übliche Vertragsanforderungen gestellt und lediglich Vorgaben zur Verfahrensauswahl (Material, Verfahrenstechnik) geäußert. Auf Hinweise zur Sanierungsdurchführung wurde bewusst verzichtet, um die üblichen Arbeitsprozesse, die tatsächliche Sanierungsqualität sowie mögliche Fehlerquellen und Verbesserungspotenziale wirklichkeitsgetreu erkennen zu können. Die Schächte wurden nach den Kriterien Schadensart, Lage im Straßenraum sowie Grundwasserstand aus insgesamt ca. 150 Schächten bei 16 Netzbetreibern ausgewählt. Der Zustand der Schächte wurde vor der Sanierungsmaßnahme aufgenommen, der Sanierungsablauf dokumentiert und die beschichteten Schächte zahlreichen Qualitätsprüfungen unterzogen. Im Ergebnis können aus den hier dargestellten Erfahrungen insbesondere Ansatzpunkte für eine zuverlässigere Ausführung und Qualitätssicherung von Beschichtungsmaßnahmen abgeleitet werden. Dies betrifft sowohl das Erkennen möglicher Schwachstellen der einzelnen Verfahren als auch die Auswahl und Umsetzung geeigneter Prüfmethoden in situ.

4.1 Auswahl der Schächte, Produkte und Verfahren

4.1.1 Anwendungsfälle und Randbedingungen

Die Schadensarten „**Undichtigkeiten**“ und „**Korrosion**“ stellen sowohl in **Mauerwerks-** als auch **Betonschächten** typische Schadensbilder dar (vgl. Abschnitt 3.2). Als Beschichtungsmaterialien werden insbesondere **Zementmörtel** und **Polyurethane** eingesetzt. Schachtkörper und Schachtabdeckungen unterliegen vielfältigen Belastungen, insbesondere **Verkehrslasten**. Mit diesen wesentlichen Parametern ergeben sich insgesamt 16 Anwendungsfälle für Beschichtungsverfahren, die in Tabelle 13 zusammengefasst sind und im Mittelpunkt der In-situ-Untersuchungen stehen.

Tabelle 13: Anwendungsfälle für den In-situ-Einsatz

Schachtwerkstoff	Schadensbild	Beschichtungswerkstoff	Verkehrsbelastung
Betonfertigteile	Undichtigkeit	Mörtel	hoch
Betonfertigteile	Undichtigkeit	Mörtel	niedrig
Betonfertigteile	Undichtigkeit	Polyurethan	hoch
Betonfertigteile	Undichtigkeit	Polyurethan	niedrig
Betonfertigteile	Korrosion	Mörtel	hoch
Betonfertigteile	Korrosion	Mörtel	niedrig
Betonfertigteile	Korrosion	Polyurethan	hoch
Betonfertigteile	Korrosion	Polyurethan	niedrig
Mauerwerk	Undichtigkeit	Mörtel	hoch
Mauerwerk	Undichtigkeit	Mörtel	niedrig
Mauerwerk	Undichtigkeit	Polyurethan	hoch
Mauerwerk	Undichtigkeit	Polyurethan	niedrig
Mauerwerk	Korrosion	Mörtel	hoch
Mauerwerk	Korrosion	Mörtel	niedrig
Mauerwerk	Korrosion	Polyurethan	hoch
Mauerwerk	Korrosion	Polyurethan	niedrig

Diese Anwendungsfälle können unter wechselnden Randbedingungen ausgeführt werden, die auf die Dauerhaftigkeit und Funktionsfähigkeit von Beschichtungen einen Einfluss haben können (vgl. Abschnitt 3.3). In diesem Zusammenhang werden in der Praxis häufig die folgenden Einflussfaktoren diskutiert:

- Oberflächenvorbereitung, durch Reinigung mit Handlanze oder rotierender Reinigungsdüse,
- Auftragsart der Beschichtung, z.B. Anschleudern, Aufspritzen oder von Hand,
- anstehendes Grundwasser.

Weitere variierende Randbedingungen, die im Rahmen der o.a. Aufzählung nicht berücksichtigt werden, sind z.B. die Tiefenlage des Schachtes (z.B. < 3,0 m bzw. > 3,0 m), die Geometrie des Schachtes (rund bzw. eckig), der Einsatz von Beschichtungswerkstoffen verschiedener Hersteller sowie der anstehende Baugrund und die Witterung. Diese Vielfalt der örtlichen Randbedingungen unterstreicht, dass es sich stets um nur **schwer vergleichbare Einzelbauwerke** handelt. In der Folge kann auch nicht die statistische Auswertung der aufgenommenen Daten im Vordergrund der Betrachtung stehen. Ziel der Untersuchung ist vielmehr die Einbeziehung einer möglichst großen Bandbreite praxisrelevanter Einflussfaktoren, um grundsätzliche Zusammenhänge zu erkennen und die in der Praxis zu erwartenden Anwendungsfälle, Lösungsmöglichkeiten und Qualitätssicherungsmaßnahmen vor einem gemeinsamen Hintergrund darzustellen. Um dieses Ziel zu erreichen, wurden mit den beteiligten Netzbetreibern in

einem ersten Schritt relevante Schachtbauwerke auf der Basis von Datenbankabfragen eingegrenzt, ca. 150 grundsätzlich geeignete Schächte unterschiedlichster Randbedingungen vor Ort besichtigt und schließlich 42 Schächte für die weiteren Untersuchungen so ausgewählt, dass eine möglichst große Bandbreite der o.a. Randbedingungen abgedeckt war.

Bemerkenswert war, dass kaum korrodierte Schächte aus Betonfertigteilen durch die Netzbetreiber identifiziert wurden. Selbst nach einem bundesweiten Aufruf über den IKT-eNewsletter, der sich vorrangig an Mitarbeiter öffentlicher Netzbetreiber und Ingenieurbüros (insgesamt ca. 10.000 Adressaten) wendet, gab es keine nennenswerten Rückmeldungen. Alle in die Untersuchung einbezogenen Schächte mit dem Schadensbild „Korrosion“ befanden sich in ländlichen Gebieten an Endpunkten von Druckentwässerungsleitungen und waren größtenteils mit geruchsdichten Deckeln verschlossen. Keiner der Schächte befand sich in einer Straße mit hoher Verkehrsbelastung.

Für die Untersuchungen wurden zunächst jeweils eine am Markt verbreitete Mörtel- bzw. Polyurethanproduktgruppe ausgewählt. Für die Mörtelbeschichtungen kamen die einkomponentigen kunststoffvergüteten Mörtel der Ergelit-Kombina-Produktgruppe zum Einsatz. Das jeweilige Produkt wurde je nach Anwendungsfall durch den Verfahrensanbieter bestimmt. Zur Bestätigung bzw. Relativierung dieser Ergebnisse wurden auch Ergänzungsmaßnahmen mit Mörteln einer anderen Produktgruppe durchgeführt, den zweikomponentigen, kunststoffvergüteten und mit synthetischen Fasern versetzten Mörteln der Mapei-Sewament-Produktgruppe. Als Polyurethan-Produkt wurde Oldodur WS 56 eingesetzt, das laut Herstellerangaben eine geringe Reaktionsfähigkeit mit Wasser aufweist [77]. Im Rahmen früherer Untersuchungen (vgl. [5]) war bei vielen Polyurethanbeschichtungen in Schächten ein Ablösen der Beschichtungen vom Untergrund bzw. eine Blasenbildung in der Beschichtung im Zusammenhang mit Feuchtigkeit festgestellt worden (vgl. Abschnitt 3.3.2.1), so dass an zwei In-situ-Schächten auch ein weiteres Polyurethan-Produkt (Baytec RT) zur Bestätigung bzw. Relativierung der Ergebnisse in die Untersuchung einbezogen werden sollte. Allerdings konnte die einzige vom Produkthersteller empfohlene Fachfirma trotz mehrfacher Aufforderung während des Projektes über einen Zeitraum von ca. drei Monaten keinen Termin für die Ausführung der Beschichtungsmaßnahmen zusagen.

Aus Gesprächen mit verschiedenen Sanierungsfirmen [78], [79], [80] wurde ersichtlich, dass eine Reinigung mit Wasserhochdruckstrahlen unter Verwendung einer rotierenden Reinigungsdüse (vgl. Abschnitt 3.3.3.1) in der Praxis nicht in Kombination mit einer Mörtelbeschichtung von Hand eingesetzt wird. Hintergrund ist, dass die Vorrichtung zum Ablassen und Hochziehen der Schleudertechnik i.d.R. in die Sanierungsfahrzeuge integriert ist und ebenfalls für die rotierende Reinigungsdüse benutzt wird. Daher ist für die Sanierungsfirmen der Einsatz der rotierenden Reinigungsdüse unter wirtschaftlichen Gesichtspunkten nur in Kombination mit einer Mörtelbeschichtung im Anschleuderverfahren sinnvoll. Unabhängig von der Auftragsart werden bei der Beschichtung mit Polyurethan rotierende Reinigungsdüsen derzeit nicht eingesetzt.

In zwei Fällen wurde für die Ausführung vor Ort eine von der ursprünglichen Planung abweichende Verfahrensart gewählt (Schacht Nr. 31, 32: händischer Auftrag anstatt Anschleuderverfahren). In einem weiteren Fall wurde durch die Sanierungsfirma anstelle des ausgeschriebenen Beschichtungsmörtels ein Vergussmörtel (Pagel VB3P Schnellverguss) in Kombination mit einer Dichtschlämme (Köster NB) eingesetzt.

4.1.2 Ausgewählte Anwendungsfälle

Abb. 37 und Abb. 38 geben jeweils eine Übersicht über die im Rahmen des Forschungsvorhabens untersuchten Maßnahmen mit Mörtel- und Polyurethan-Schachtbeschichtungen. Die Nummerierung der Schächte wurde nach dem zeitlichen Ablauf der Untersuchungen gewählt. In Tabelle 14 bis Tabelle 20 sind alle untersuchten Schächte ausführlich dargestellt. Tabelle 21 gibt einen Überblick über die im Rahmen der Beschichtungsmaßnahmen beauftragten Fachfirmen.

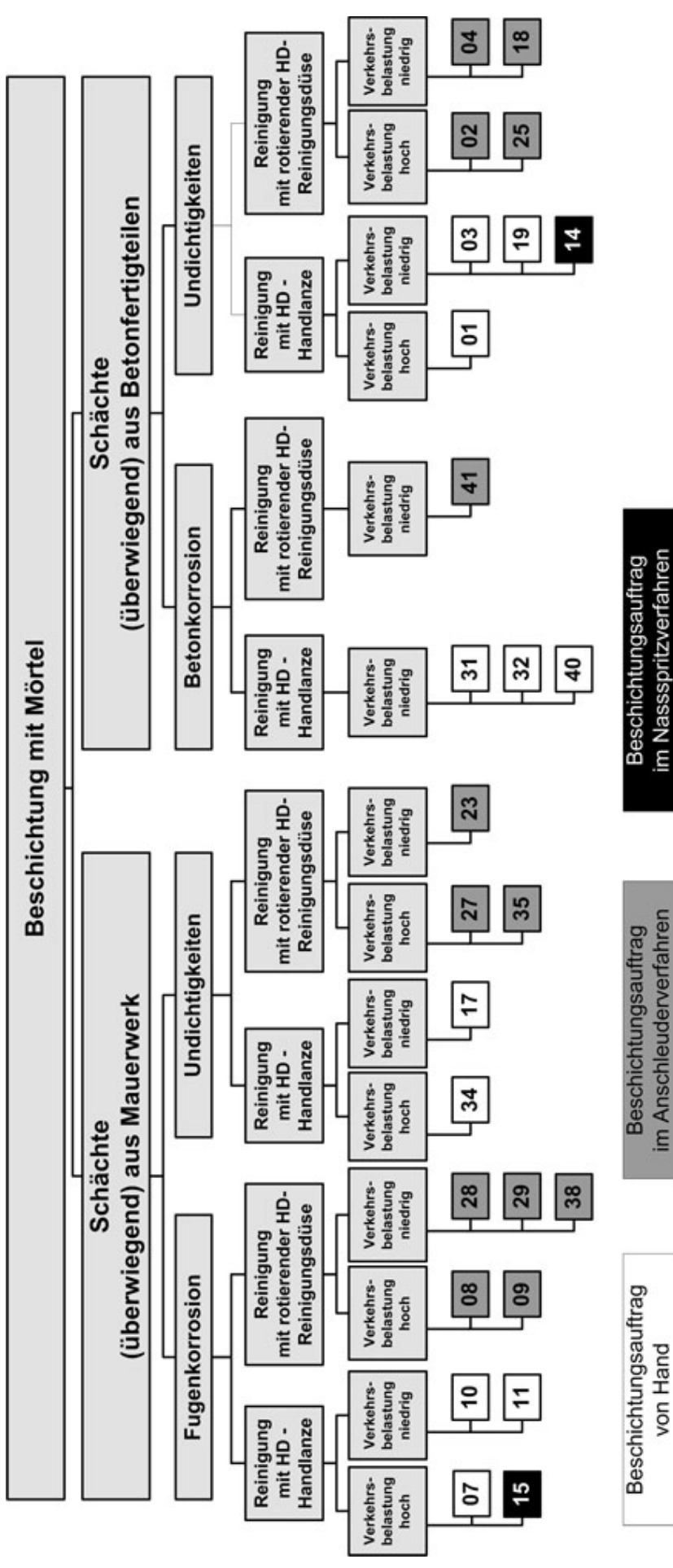


Abb. 37: Übersicht über die im Rahmen des Forschungsvorhabens untersuchten Anwendungsfälle und Randbedingungen, Mörtelbeschichtung (dargestellt sind die Nummern der untersuchten Schächte)

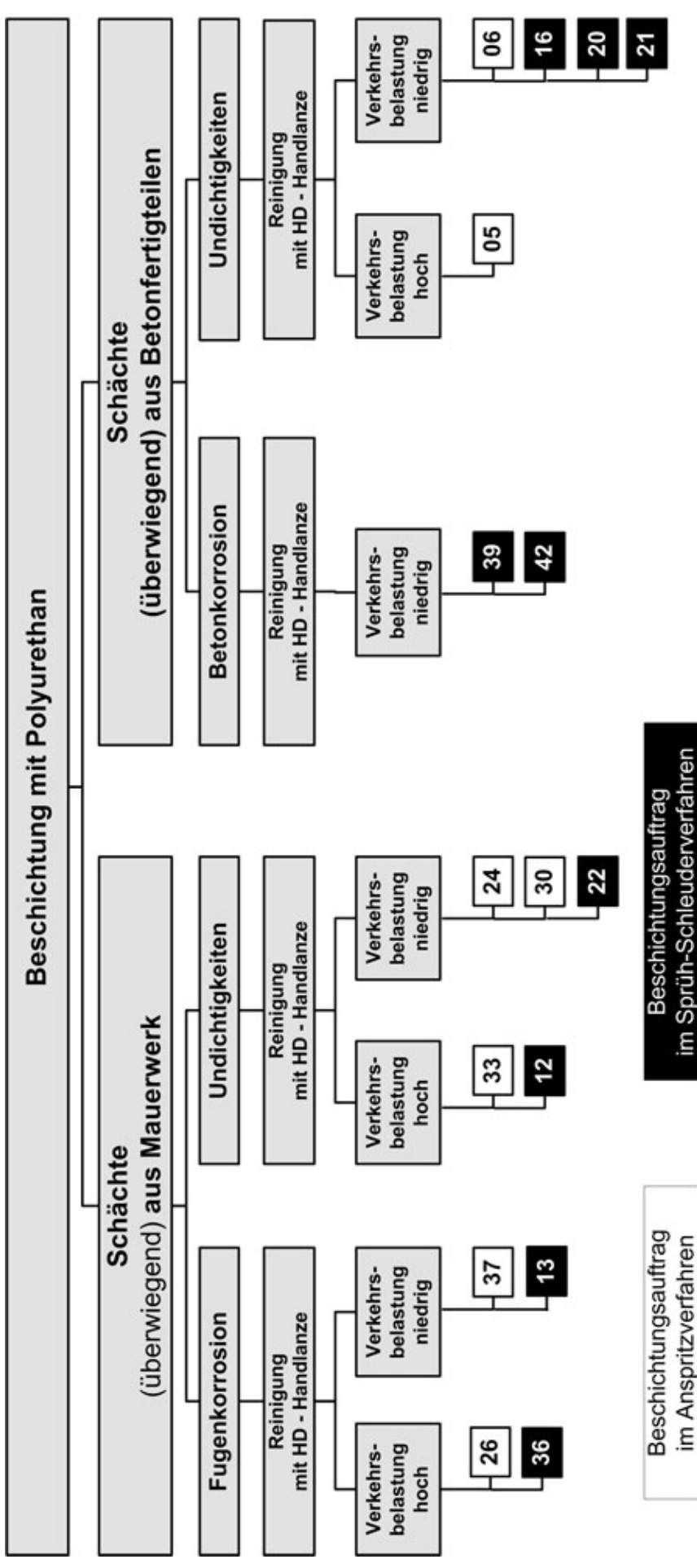


Abb. 38: Übersicht über die im Rahmen des Forschungsvorhabens untersuchten Anwendungsfälle und Randbedingungen, Polyurethanbeschichtung (dargestellt sind die Nummern der untersuchten Schächte)

Tabelle 14: Sanierungsmaßnahmen: Mauerwerksschächte, Fugenkorrosion, hohe Verkehrsbelastung

Schächte aus Mauerwerk								
Schadensbild: Fugenkorrosion / Verkehrsbelastung: hoch								
	Nr.	Lage des Schachtes	Schachtansicht vor Sanierung	Schachtansicht nach Sanierung	Geometrie	Netzbedingungen	Zustand vor Beschichtung	Beschichtungswerkstoff
Mörtelbeschichtung	07	in vielbefahrener Straße im Zentrum mit intensivem Busverkehr (Straßen - BK III)			Betonkonus, Tiefe: ca. 4,0 m Ø: 1,0 m	Schmutzwasser, Zu- und Ablauf Beton Eiprofil 600/400, zusätzlich ein Zulauf Stzg. DN 300	Klinker an der Oberfläche porös, Mauerwerk flächig feucht, Fugen stark korrodiert (bis ca. 3 cm) Störung der Wandung durch Versorgungsleitung	Ergelit Kombina KS 1
	08	in vielbefahrener Straße im Zentrum mit intensivem Busverkehr (Straßen - BK III)			Betonkonus, Tiefe: ca. 3,8 m Ø: 1,0 m	Schmutzwasser, Zu- und Ablauf Stzg. Beton 500, zusätzlich ein Zulauf Stzg. DN 250	Mauerwerk ist stark flächig feucht, Fugen stark korrodiert (bis ca. 3 cm), starke Verschmutzungen und Inkrustierungen	Ergelit Kombina KS 1
	09	in vielbefahrener Straße im Zentrum (Straßen - BK III)			Betonkonus, Tiefe: ca. 3,3 m Ø: 1,0 m	Schmutzwasser, starkes Gefälle der Haltungen Zu- und Ablauf Stzg. DN 250	Fugen stark korrodiert, einzelne Klinker fehlen, Übergang Betonkonus – Mauerwerk kritisch, Treppenartiger Vorsprung unterhalb des Überganges	Ergelit Kombina KS 1
	15	in vielbefahrener Straße im Zentrum mit intensivem Busverkehr (Straßen - BK III)			Betonkonus, Tiefe: ca. 4,3 m Ø: 1,0 m	Schmutzwasser, Zu- und Ablauf Beton. DN 400, zusätzlich ein Zulauf PVC DN 150	nachträglich hergestellter Zulauf, Abplatzungen an Klinker, Mauerwerk ist stark flächig feucht, Fugen stark korrodiert (bis ca. 3 cm)	Ergelit Kombina KT
Polyurethanbeschichtung	26	in vielbefahrener Ausfahrtsstraße mit Busverkehr (Straßen - BK III)			Tiefe: ca. 2,7 m, rechteckig, 1,0 x 1,0 m	Schmutzwasser, Beton, Zulauf: DN 300, Ablauf: DN 600	Fugen besonders an den Kanalanbindungen stark ausgewaschen, zugemauerter Zulauf	Oldodur WS 56
	36	im Kreuzungsbereich einer viel befahrenen Straße (Straßen - BK III)			Tiefe: ca. 2,3 m, Ø: 0,85 m	Schmutzwasser, Zu- und Ablauf Stzg. DN 300	Fugen sehr stark korrodiert, an Kanalanbindungen große Hohlstellen, überstehende Bitumenmasse	Oldodur WS 56

Tabelle 15: Sanierungsmaßnahmen: Mauerwerksschächte, Fugenkorrosion, niedrige Verkehrsbelastung












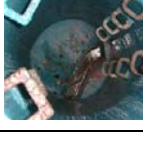


Schächte aus Mauerwerk								
Schadensbild: Fugenkorrosion / Verkehrsbelastung: niedrig								
	Nr.	Lage des Schachtes	Schachtansicht vor Sanierung	Schachtansicht nach Sanierung	Geometrie	Netzbedingungen	Zustand vor Beschichtung	Beschichtungswerkstoff
Mörtelbeschichtung	10	in einer Seitenstraße / Nähe Zentrum, niedriges Verkehrsaufkommen (Straßen - BK V)			Betonkonus, Tiefe: ca. 2,4 m, rechteckig: 0,85 x 0,85 m	Schmutzwasser, Zu- und Ablauf Stzg. DN 200	Fugen sehr stark korrodiert, einzelne Klinker herausgebrochen, Steigeisen stark korrodiert, Sohle sanierungsbedürftig	Ergelit Kombina KT
	11	in der Fußgängerzone der Innenstadt, nur Anlieferverkehr (Straßen - BK IV)			Betonkonus, Tiefe: ca. 4,2 m, Ø: 1,0 m	Schmutzwasser, Zu- und Ablauf Beton Eiprofil 600/ 900 Zulauf Stzg. DN 200 und Beton DN 400	Betonkonus sehr rauhe Oberfläche, Fugen stark korrodiert, Klinker porös, Wandung stark flächig feucht, Wasser läuft über Oberfläche, zwei alte Mörtel- Ausbesserungstellen	Ergelit Kombina KT
	28	in einem Fußgängerweg			Oberteil aus Beton, Tiefe ca. 4,8 m, Ø: Beton: 1,0 m, Ø: MW: 0,95 m	Schmutzwasser, Zu- und Ablauf Stzg. DN 250, zwei zusätzliche Zuläufe DN 150, Stzg.	Schacht an einigen Stellen extrem undicht, Fugen stark korrodiert, starke Ablagerungen und Mörtelrückstände um und unter den Zuläufen	Mapei Sewament 100
	29	in der Fußgängerzone der Innenstadt, nur Anlieferverkehr (Straßen - BK IV)			Oberteil aus Beton50, Tiefe: ca. 3,2 m, Ø: 1,0 m	Schmutzwasser, Zu- und Ablauf Eiprofil DN 400 / 600, drei zusätzliche Zuläufe Stzg. DN 150	Mauerwerk stark inkrustiert, teilweise Mörtelverspachtelungen, Fugen stark korrodiert, Anbindungen der Ein- und Abläufe stark ausgewaschen	Mapei Sewament 100
	38	in einer Seitenstraße mit Anliegerverkehr (Straßen - BK V)			Tiefe: ca. 2,6 m, Ø: 1,0 m	Schmutzwasser, Zu- und Ablauf Stzg. DN 300, zwei zusätzliche Zuläufe Stzg. DN 150	Fugen stark korrodiert, Schachtwandung mit Pilzen übersät, Kanalanbindungen rundherum stark ausgewaschen, Bodeneintrag durch fehlenden Klinker	Ergelit Kombina KS 1
Polyurethanbeschichtung	13	auf einem Kirchenvorplatz, keine Verkehrsbelastung			Tiefe: ca. 4,5 m, Ø: 0,9 m	Schmutzwasser, Zu- und Ablauf Stzg. DN 250	Klinker an der Oberfläche sehr porös, nachträglich hergestellter Zulauf	Oldodur WS 56
	37	in einer Seitenstraße mit Anliegerverkehr (Straßen - BK V)			Tiefe: ca. 3,3 m, Ø: 1,0 m	Schmutzwasser, Zu- und Ablauf Stzg. DN 300, zwei zusätzliche Zuläufe Stzg. DN 200	Fugen stark korrodiert, Kanalklinker leicht inkrustiert, Anbindungen der Ein- und Abläufe stark ausgewaschen.	Oldodur WS 56

Tabelle 16: Sanierungsmaßnahmen: Mauerwerksschächte, Undichtigkeiten ohne Korrosion, hohe Verkehrsbelastung











Schächte aus Mauerwerk								
Schadensbild: Undichtigkeiten ohne Korrosion / Verkehrsbelastung: hoch								
	Nr.	Lage des Schachtes	Schachtansicht vor Sanierung	Schachtansicht nach Sanierung	Geometrie	Netzbedingungen	Zustand vor Beschichtung	Beschichtungswerkstoff
Mörtelbeschichtung	27	in vielbefahrener Straße im Zentrum mit intensivem Busverkehr (Straßen - BK III)			Betonkonus, Tiefe: ca. 3,9 m, Ø: 0,95 m	Schmutzwasser, Zu- und Ablauf Eiprofil DN 400/ 600 Beton	Übergang Betonkonus – Mauerwerk kritisch, Mauerwerksfugen leicht korrodiert	Mapei Sewament 100
	34	in vielbefahrener Hauptverkehrsstraße (Straßen - BK III)			Tiefe: ca. 5,2 m, rechteckig: 1,0 x 1,0 m	Schmutzwasser, Zu- und Ablauf Mauerwerk Eiprofil 800 / 1200	Mauerwerk speziell im unteren Bereich sehr feucht, Straßenschmutz an der Wandung, vertikaler Riss über Kanalscheitel Ablauf	Ergelit Kombina KS 1
	35	in vielbefahrener Hauptverkehrsstraße (Straßen - BK III)			Tiefe: ca. 5,2 m, rechteckig: 1,0 x 1,0 m	Schmutzwasser, Zu- und Ablauf Mauerwerk Eiprofil 800 / 1200	Mauerwerk speziell im unteren Bereich sehr feucht, Strassenschmutz an der Wandung, vertikaler Riss über Kanalscheitel Ablauf	Ergelit Kombina KS 1
Polyurethanbeschichtung	12	in vielbefahrener Straße im Zentrum mit intensivem Busverkehr (Straßen - BK III)			Betonkonus, Tiefe: ca. 4,5 m, Ø: 1,0 m	Schmutzwasser, drei Zuläufe Beton DN 400 und 300, Stzg. 250, Ablauf Beton DN400	Mauerwerksfugen leicht korrodiert, Schachtwandung sehr feucht, Sohle ist stark ausgewaschen	Oldodur WS 56
	33	in vielbefahrener Hauptverkehrsstraße (Straßen - BK III)			Tiefe: ca. 5,2 m, rechteckig: 0,88 x 0,88 m	Schmutzwasser, Zu- und Ablauf Mauerwerk Eiprofil 800 / 1200	Mauerwerk speziell im unteren Bereich sehr feucht, Straßenschmutz an der Wandung, Eckbereiche sind leicht inkrustiert	Oldodur WS 56

Tabelle 17: Sanierungsmaßnahmen: Mauerwerksschächte, Undichtigkeiten ohne Korrosion, niedrige Verkehrsbelastung










Schächte aus Mauerwerk								
Schadensbild: Undichtigkeiten ohne Korrosion / Verkehrsbelastung: niedrig								
	Nr.	Lage des Schachtes	Schachtansicht vor Sanierung	Schachtansicht nach Sanierung	Geometrie	Netzbedingungen	Zustand vor Beschichtung	Beschichtungswerkstoff
Mörtelbeschichtung	17	in der Zufahrt zu einem Campingplatz (Straßen - BK V)			Betonkonus Tiefe ca. 2,5 m, Ø: 1,0 m	Schmutzwasser, Zu- und Ablauf Stzg. DN 300, zwei Zuläufe Stzg. DN200	Mauerwerksfugen leicht korrodiert, seitlicher Zulauf schlecht angebunden	Ergelit Kombina KS 1
	23	in der Seitenbankette einer Landstraße			Oberteil aus Beton Tiefe ca. 4,0 m, Ø: 1,0 m	Schmutzwasser, Zu- und Ablauf Stzg. DN 300	Schachtwandung ist stark flächig feucht, ca. 0,5 m über der Berme ist die Schachtwandung mit einem Versatz gemauert worden	Ergelit Kombina KS 1
Polyurethanbeschichtung	22	in der Seitenbankette einer Landstraße			Oberteil aus Beton, Tiefe ca. 4,0 m, Ø: 1,0 m	Schmutzwasser, Zu- und Ablauf Stzg. DN 300	Grundwassereindring an mehreren Stellen der Schachtwandung, leichte Korrosion der Mauerwerksfugen im unteren Bereich des Schachtes	Oldodur WS 56
	24	in der Zufahrt zu einem Wohngebiet (Straßen - BK V)			Oberteil aus Beton Tiefe ca. 4,0 m, Ø: 1,0 m	Schmutzwasser, Zu- und Ablauf Stzg. DN 300, zwei Zuläufe Stzg. DN200	Schachtwandung ist stark flächig feucht, eine alte Mörtel- Ausbesserungsstelle (ca. 03 x 0,5 m), oberer Zulauf im Übergang Mauerwerk – Beton, Schacht rechteckig aufgestemmt	Oldodur WS 56
	30	in der Seitenbankette einer Landstraße		Beschichtung wurde durch die Sanierungsfirma entfernt	Betonkonus Tiefe ca. 2,7 m, Rechteck 1,0 x 1,0 m	Schmutzwasser, Zu- und Ablauf Mauerwerk DN 900	ein runder Betonschachtring wurde auf ein rechteckiges Mauerwerksunterteil gesetzt, sehr feuchtes Mauerwerk, starke Wassereinbrüche im Gerinne	Oldodur WS 56

Tabelle 18: Sanierungsmaßnahmen: Schächte aus Betonfertigteilen, Korrosion, niedrige Verkehrsbelastung








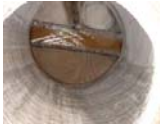



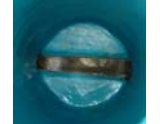
Schächte aus Betonfertigteilen								
Schadensbild: Korrosion/ Verkehrsbelastung: niedrig								
	Nr.	Lage des Schachtes	Schachtansicht vor Sanierung	Schachtansicht nach Sanierung	Geometrie	Netzbedingungen	Zustand vor Beschichtung	Beschichtungswerkstoff
Mörtelbeschichtung	31	in einer Wiese			Tiefe ca. 3,8 m, Ø:1,0 m, unterer Teil H=1,2 m, Ø:1,5 m	Schmutzwasser, hinter einer Druckleitung im Klärwerkszulauf gelegen, Zu- und Ablauf Stzg. DN 600, ein seitlicher Zulauf Stzg. DN 200	Sehr starke Betonkorrosion, bis zu 4 cm Abtrag der Schachtwandung im unteren Bereich des Schachtes, Oberfläche stark porös, Steigbügel ebenfalls stark korrodiert, Klinker auf der Berme lose	Vorbesch. Ergelit Kombina KT Ergelit Kombina KS2b
	32	in einer Wiese			Tiefe ca. 3,8 m, Ø:1,0 m	Schmutzwasser, hinter einer Druckleitung im Klärwerkszulauf gelegen, Zu- und Ablauf Stzg. DN 600	Starke Betonkorrosion, bis zu 2 cm Abtrag der Schachtwandung im unteren Bereich des Schachtes, Oberfläche stark porös, Steigbügel ebenfalls stark korrodiert, Klinker auf der Berme lose	Vorbesch. Ergelit Kombina KT Ergelit Kombina KS2b
	40	in einer Seitenstraße mit Anlieger- und gelegentlichem landwirtschaftlichen Verkehr (Straßen - BK V)			Tiefe ca. 1,8 m, Ø:1,0 m	Schmutzwasser, hinter einer Druckleitung gelegen, Zu- und Ablauf Stzg. DN 250	Sehr starke Betonkorrosion, bis zu 7 cm Abtrag der Schachtwandung, Oberfläche stark porös, Mauerwerksfugen ebenfalls stark korrodiert, Steigisen sehr stark korrodiert, Berme fast nicht mehr vorhanden	PAGEL VB3P mit Dichtschlämme: KÖSTER NB
	41	in einer Seitenstraße mit Anlieger- und gelegentlichem landwirtschaftlichen Verkehr (Straßen - BK V)			Tiefe ca. 1,7 m, Ø:1,0 m	Schmutzwasser, hinter einer Druckleitung gelegen, Zu- und Ablauf Stzg. DN 250, ein seitlicher Zulauf DN 200	Sehr starke Betonkorrosion, bis zu 6 cm Abtrag der Schachtwandung, Oberfläche stark porös, Mauerwerksfugen ebenfalls stark korrodiert, Steigisen sehr stark korrodiert, Berme fast nicht mehr vorhanden	Ergelit Kombina KS2b
Polyurethanbeschichtung	39	in einer Landstraße mit gelegentlichem Schwer- und landwirtschaftlichem Verkehr (Straßen - BK V)			Tiefe ca. 2,5 m, Ø:1,0 m	Schmutzwasser, hinter einer Druckleitung gelegen, Zu- und Ablauf Stzg. DN 250/300, ein seitlicher Zulauf DN 150	Sehr starke Betonkorrosion, bis zu 7 cm Abtrag der Schachtwandung, Oberfläche stark porös, Mauerwerksfugen ebenfalls stark korrodiert, Steigisen stark korrodiert, Klinker auf der Berme lose	Oldodur WS 56
	42	in Bankette neben Fußweg			Tiefe ca. 2,0 m, Ø:1,0 m	Schmutzwasser, hinter Druckleitung gelegen, Zu- und Ablauf Stzg. DN 250	Starke Betonkorrosion, bis zu 4 cm Abtrag der Schachtwandung, Oberfläche porös, Steigisen ebenfalls stark korrodiert	Oldodur WS 56

Tabelle 19: Sanierungsmaßnahmen: Schächte aus Betonfertigteilen, Undichtigkeiten ohne Korrosion, hohe Verkehrsbelastung









Schächte aus Betonfertigteilen								
Schadensbild: Undichtigkeiten ohne Korrosion / Verkehrsbelastung: hoch								
	Nr.	Lage des Schachtes	Schachtansicht vor Sanierung	Schachtansicht nach Sanierung	Geometrie	Netzbedingungen	Zustand vor Beschichtung	Beschichtungswerkstoff
Mörtelbeschichtung	01	im Kreuzungsbereich von zwei mittelstark befahrenen Straßen (Straßen - BK IV)			Tiefe ca. 2,7 m, untere 0,3 m aus Mauerwerk, Ø:1,0 m	Schmutzwasser, zwei Zuläufe und ein Ablauf Stzg. DN 200	Undichte Ringfugen, Berme fast komplett zerstört, die Fugen des Mauerwerks sind korrodiert	Ergelit Kombina KS1
	02	im Kreuzungsbereich von zwei mittelstark befahrenen Straßen (Straßen - BK IV)			Tiefe ca. 2,2 m, Ø:1,0 m	Schmutzwasser, zwei Zuläufe und ein Ablauf Stzg. DN 200	Undichte Ringfugen, Nachträglich hergestellter Zulauf im mittleren Schachtring, mit Mörtel verspachtelt	Ergelit Kombina KS1
	25	im Kreuzungsbereich von zwei mittelstark befahrenen Straßen (Straßen - BK IV)			Oberteil aus Beton Tiefe ca. 2,8 m, untere 1,0 m aus Mauerwerk, Ø:1,0 m	Schmutzwasser, Zwei Zuläufe und ein Ablauf Beton DN 300 zwei seitliche Zuläufe Beton DN500 und Stzg. DN150	Schachtteil aus Beton in gutem Zustand, Mauerwerkfugen sind korrodiert, Zuläufe sind undicht	Mapei Sewament 100
Polyurethanbeschichtung	05	in mittelstark befahrener Straße mit Busverkehr (Straßen - BK IV)			Tiefe ca. 6,0 m, Ø:1,0 m	Schmutzwasser, Zu- und Ablauf Stzg. DN 200, ein seitlicher Zulauf Stzg. DN150	Nachträglich hergestellter Zulauf, durchgehender Riss in Schachtring, Bitumendichtungen stehen in den Ringfugen über, sehr feuchte Wandungsfläche im unteren Bereich des Schachtes	Oldodur WS 56

Tabelle 20: Sanierungsmaßnahmen: Schächte aus Betonfertigteilen, Undichtigkeiten ohne Korrosion, niedrige Verkehrsbelastung

Schächte aus Betonfertigteilen								
Schadensbild: Undichtigkeiten ohne Korrosion / Verkehrsbelastung: niedrig								
	Nr.	Lage des Schachtes	Schachtansicht vor Sanierung	Schachtansicht nach Sanierung	Geometrie	Netzbedingungen	Zustand vor Beschichtung	Beschichtungswerkstoff
Mörtelbeschichtung	03	in Bankette einer Landstraße			Tiefe ca. 1,6 m Ø:1,0 m	Schmutzwasser, Zu- und Ablauf PVC DN 200	Schachtwandung flächig feucht, starker Wassereindrang durch untere Schachtringfuge	Ergelit Kombina KT
	04	im Grünstreifen neben einer Hauptverkehrsstraße			Tiefe ca. 4,6m, Ø:1,0 m	Schmutzwasser, Zu- und Ablauf Stzg. DN 500, ein seitlicher Zulauf Stzg. DN 200	Nachträglich hergestellter Zulauf im unteren Schachtring, seitlicher Zulauf gerissen, perament zulaufendes Wasser aus angrenzendem Freibad	Ergelit Kombina KS1
	14	im Wendehammer einer Buslinie			Tiefe ca. 3,7m, Ø:1,0 m	Schmutzwasser, Zu- und Ablauf Stzg. DN 200	Betonoberfläche sehr glattwandig, bei Voruntersuchung trocken	Ergelit Kombina KT
	18	in Bankette einer Landstraße			Tiefe ca. 4,2m, Ø:1,0 m	Schmutzwasser, Zu- und Ablauf Stzg. DN 300, ein seitlicher Zulauf Stzg. DN100	Leichte Betoninkrustationen, Betonfugen sind undicht, Wandung speziell im unteren Bereich des Schachtes feucht, Auflagering um ca. 20 cm seitlich verschoben	Ergelit Kombina KS1
	19	in Bankette einer Landstraße			Tiefe ca. 4,3 m, Ø:1,0 m	Schmutzwasser, Zu- und Ablauf Stzg. DN 300, ein seitlicher Zulauf Stzg. DN150	Unterster gemauerte Ring undicht, leichte Inkrustation der Betonoberfläche	Ergelit Kombina KS1
Polyurethanbeschichtung	06	in Gehweg neben einer Hauptverkehrsstraße			Tiefe ca. 2,4 m, Ø:1,0 m	Schmutzwasser, Zu- und Ablauf Stzg. DN 250	Ringfugen und Einläufe waren bereits mit Mörtel verspachtelt, Schacht macht relativ guten optischen Eindruck	Oldodur WS 56
	16	in einem Gehweg			Tiefe ca. 3,0 m, Ø:1,0 m	Schmutzwasser, Zu- und Ablauf Stzg. DN 250, ein seitlicher Zulauf Stzg. DN200	aus den Ringfugen ragt viel Bitumen-Dichtmasse in den Schacht, der Auflagering ist gerissen, die Wandungsoberfläche des Konus ist sehr rau	Oldodur WS 56
	20	im Grünstreifen neben einer Landstraße			Tiefe ca. 4,1 m, untere 0,4 m aus Mauerwerk, Ø:1,0 m	Schmutzwasser, Zu- und Ablauf Stzg. DN 300, ein seitlicher Zulauf Stzg. DN100	Betonfugen undicht, ansonsten Schacht in relativ gutem Zustand, das Mauerwerk ist stark durchfeuchtet, die Mauerwerksfugen sind korrodiert	Oldodur WS 56
	21	in einem Gehweg			Tiefe ca. 3,9 m, untere 0,4 m aus Mauerwerk, Ø:1,0 m	Schmutzwasser, Zu- und Ablauf Stzg. DN 300, zwei seitliche Zuläufe Stzg. DN200/100	Auflagering gerissen, Betonkörper relativ trocken, nachträglich eingebaute Zulauf undicht, das Mauerwerk ist stark durchfeuchtet	Oldodur WS 56

Tabelle 21: Im Rahmen der Beschichtungsmaßnahmen beauftragte Fachfirmen

Firma	Eingesetzte Beschichtungswerkstoffe	Eingesetzte Verfahrenstechniken	Haupttätigkeitsbereiche der Firma*
Rainer Kiel Kanalsanierung GmbH, Blomberg	kunststoffvergütete, einkomponentige Mörtel (Ergelit Kombina KT, KS 2B)	Beschichtung von Hand Nassspritzverfahren	➤ Rohr-sanierungen aller Art; Sanierung von Schächten (Steigeisentauch, Abdichtungen, Beschichtungen etc..)
Hermes Technologie GmbH & Co.KG Schwerte	kunststoffvergütete, einkomponentige Mörtel (Ergelit Kombina KS 1, KS 2b)	Anschleuderverfahren (KS-ASS)	➤ Entwicklung von Sanierungskonzepten in der Trinkwasserversorgung und Kanalsanierung; Untersuchung der Bausubstanz; Schulungen und Seminare für die Anwendung von zementgebundenen Baustoffen
Fleer-Tech GmbH, Hannover	kunststoffvergütete, einkomponentige Mörtel (Ergelit Kombina KS 1)	Beschichtung von Hand, Anschleuderverfahren (KS-ASS) ¹⁾	➤ Rohr-sanierung mittels Schlauchliner, Kurzliner, Roboterverfahren; Schachtsanierung
KUT Kanal- & Umwelttechnik GmbH, Leuna	kunststoffvergütete, einkomponentige Mörtel (Ergelit Kombina KS 1)	Beschichtung von Hand, Anschleuderverfahren (KS-ASS) ¹⁾	➤ Ausbesserungsarbeiten (Beschichtung, Auskleidung); Hausanschlusssanierung; Injektionen (Hohlraumverfüllung, Rissinjektion, Rohrverbindungen)
KS-Kanalsanierung, Freudenberg	kunststoffvergütete, ein- und zweikomponentige Mörtel (Mapei Sewament 40, 100)	Anschleuderverfahren	➤ Verpressen von Rissen und Muffen; Haus-Lining für private Anschlüsse; Lining mit PE-HD- oder PVC-U-Rohren, GFK Schlauch-Lining; Schachtsanierung durch Beschichtung
Firma Redu Umwelt Service GmbH, Niederlangen	kunststoffvergüteter Vergussmörtel (PAGEL VB3P) + Dichtschlämme KÖSTER NB	Beschichtung von Hand	➤ TV-Inspektion; Sanierung mit Part- und Langlinern; Fräsarbeiten; Schachtbeschichtung mit mineralischem Mörtel
Loos PUR Technik e.K., Neuenrade	Polyurethan (Oldodur WS 56)	Aufspritzverfahren, Sprüh-Schleuderverfahren	➤ Vertrieb von Oldodur WS 56; Herstellung und Vertrieb der Maschinenteknik für Beschichtungen mit Oldodur WS 56; Beschichtungen mit Oldodur WS 56
PUR Technologie Hegemann, Hattingen ²⁾	Polyurethan (Oldodur WS 56)	Aufspritzverfahren	➤ Ausbesserung (Beschichtung, Auskleidung); Hausanschlusssanierung; Injektion (Hohlraumverfüllung, Rissinjektion, Rohrverbindungen)
Glomsda Oberflächentechnik, Reken	Polyurethan (Oldodur WS 56)	Anschleuderverfahren	➤ Kanalreinigung, Reingung von Fettabscheidern; Stutzensanierung; Schacht- und Kanalsanierung; Fräsarbeiten
Achternbosch Gruppe Reinigung und Beschichtungstechnik, Kaarst	Polyurethan (Oldodur WS 56)	Aufspritzverfahren, Sprüh-Schleuderverfahren	➤ Korrosionsschutz Stahlbau und Stahlbetonbau; Sanierung Kläranlagen und Abwasserbauten
KSX Kanalsanierung Xanten OHG ²⁾	Polyurethan (Baytec RT)	Aufspritzverfahren	➤ Instandsetzung und Auskleidung von Schächten und begehbaren Rohrleitungen; Sanierung von Pumpstationen und Regenrückhaltebecken

* Angaben in Firmeninformationen

1) Ausführung durch Firma Hermes Technologie GmbH & Co. KG

2) Firma führte im Rahmen des Forschungsvorhabens nur Maßnahmen in der IKT-Versuchshalle durch

4.2 Untersuchungsprogramm

Vor der Sanierungsausführung wurde der IST-Zustand der zu sanierenden Schächte aufgenommen. Dabei wurden alle Schächte detailliert optisch inspiziert, die wesentlichen klimatischen Kennwerte, wie z.B. die Oberflächenfeuchte der Schachtwandung, gemessen, der Sulfat- und Carbonatgehalt sowie die Abreißfestigkeit der Schachtwandung bestimmt und an 4 ausgewählten Schächten die Dichtheit im unsanierten Zustand mittels Wasserdichtheitsprüfungen überprüft.

Der gesamte **Sanierungsablauf** wurde durch Mitarbeiter des IKT begleitet. Dabei wurden die Baustellenbedingungen und sämtliche Arbeitsschritte der Untergrundvorbehandlung, Abdichtung, Beschichtung und Nachbehandlung sowie die eingesetzten Materialien und technischen Hilfsmittel dokumentiert. Zusätzlich wurden die Frischmörtelkonsistenz überprüft und Materialproben während des Beschichtungsvorgangs entnommen, an denen anschließend wesentliche **Materialkennwerte**, wie z.B. 3-Punkt-Biegezugfestigkeit und Druckfestigkeit, bestimmt wurden. An die vor Ort tätigen Fachfirmen wurden seitens der Netzbetreiber übliche Vertragsanforderungen gestellt und lediglich Vorgaben zur Verfahrensauswahl (Material, Verfahrenstechnik) geäußert. Auf Hinweise zur Sanierungsdurchführung wurde bewusst verzichtet, um die üblichen Arbeitsprozesse, die tatsächliche Sanierungsqualität sowie mögliche Fehlerquellen und Verbesserungspotenziale wirklichkeitsgetreu erkennen zu können. Das ausführende Personal wurde hinsichtlich Qualifikation sowie Erfahrungen bei der Beschichtung von Schächten befragt. Alle wesentlichen klimatischen Kennwerte, wie z.B. die Oberflächenfeuchte der Schachtwandung, Temperatur und Luftfeuchte, wurden erneut aufgenommen.

Nach der Sanierungsausführung wurde die Qualität aller Schachtbeschichtungen vor Ort untersucht. **Ca. 28 Tage nach der Sanierung** wurden die Schächte optisch inspiziert, die Dichtheit von 37 Schächten mittels Wasserdichtheitsprüfungen überprüft und die Verbundfestigkeit der Beschichtung mit dem Untergrund bestimmt. Zusätzlich wurde die aufgetragene Beschichtungsdicke kontrolliert. Bei 4 Schächten wurden die klimatischen Kennwerte innerhalb und außerhalb des Schachtkörpers über einen Zeitraum von mehreren Tagen aufgezeichnet. **Ca. 6 Monate nach der Sanierung** wurden die Schächte erneut optisch inspiziert. Die Einbindungsbereiche von zwei Schächten, in denen PU-Kurzliner während der Sanierung eingebaut worden waren, wurden mit Wasserhochdruck in Anlehnung an den Hamburger Spülversuch [81] belastet.

Bei 5 Schächten war eine Untersuchung nach 6 Monaten innerhalb der Projektlaufzeit nicht möglich. Die Schächte Nr. 33, 36, 37, 38 und 40 wurden daher jeweils 3 Monate nach Ausführung der Sanierung untersucht. Die Beschichtung des Schachtes Nr. 30 zeigte nach Aussagen des Verfahrensanbieters bereits drei Wochen nach Ausführung so starke Schäden, dass die komplette Beschichtung bereits vor den Nachuntersuchungen durch die ausführende Fachfirma entfernt worden war.



Abb. 39: Übersicht über das Untersuchungsprogramm: **A:** Untersuchung des IST-Zustands der zu sanierenden Schächte. **B:** Dokumentation der Baustellenbedingungen und Sanierungsausführung. **C:** Untersuchung der Qualität der ausgeführten Sanierungen vor Ort, Prüfung der Verbundfestigkeit. **D:** Untersuchung der Qualität der ausgeführten Sanierungen vor Ort, optische Inspektion mit Klangprobe. **E:** Prüfung der Materialkennwerte an Probestücken, 3-Punkt-Biegezugprüfung an einer Mörtelprobe. **F:** Prüfung der Materialkennwerte an Probestücken, Zugprüfung an einer Polyurethanprobe

In Tabelle 22 ist dargestellt, wieviele Schächte in die einzelnen Untersuchungsschritte einbezogen wurden. Tabelle 23 beschreibt Ziel, Umfang und Ausführung der einzelnen Prüfungen.

Tabelle 22: Übersicht über die in den einzelnen Untersuchungsschritten durchgeführten Prüfungen

		Untersuchung des Ist-Zustands	Sanierungs- ausführung	Nach- untersuchung nach 28 Tagen	Nach- untersuchung nach 6 (3) Monaten
1	Optische Inspektion	42 Schächte		41 Schächte	41 Schächte
2	Klimatische Kennwerte	42 Schächte	42 Schächte	4 Schächte über mehrere Tage	
3	Sulfat/ Carbonat- gehalt	42 Schächte			
4	Abreiß-/ Haftzug- festigkeit	42 Schächte		41 Schächte	
5	Dichtheit	4 Schächte		31 Schächte	
6	Dokumentation Vorgehensweise		42 Schächte		
7	Befragung Sanierungsfirmen		7 Firmen		
8	Frischmörtel- konsistenz		26 Schächte		
9	Entnahme von Materialproben		42 Schächte		
10	Beschichtungs- dicken			41 Schächte	
11	Spülversuche				2 Schächte

Tabelle 23: Übersicht über die im Rahmen der In-situ-Untersuchungen durchgeführten Prüfungen

Prüfung		Ziel	Umfang / Ausführung
1	Optische Inspektion	<ul style="list-style-type: none"> ➤ Beurteilung der Randbedingungen sowie des Allgemeinzustandes vor Sanierung ➤ Aufnahme von kritischen Bereichen vor Sanierung ➤ Beurteilung der Sanierungsqualität ➤ Bewertung der Auswirkungen verschiedener Vorgehensweisen und Randbedingungen auf die Sanierungsqualität 	<ul style="list-style-type: none"> ➤ Optische Untersuchung aller 42 Schächte vor Sanierungsausführung sowie 28 Tage und 6 Monate nach der Sanierung ➤ Aufnahme der Umgebungs- und Nutzungsbedingungen ➤ Dokumentation mit Fotos ➤ Vermessung von Rissbreiten ➤ Kontrolle der Beschichtungsoberfläche, z.B. auf Risse, Durchfeuchtungen 28 Tage und 6 (3) Monate nach der Sanierung ➤ Überprüfung der im Vorfeld festgestellten kritischen Bereiche sowie der Einbindungsstellen 28 Tage und 6 (3) Monate nach der Sanierung ➤ Abklopfen der Beschichtungsoberfläche zur Feststellung von Hohlstellen hinter der Beschichtung 28 Tage und 6 (3) Monate nach der Sanierung
2	Bestimmung der klimatischen Kennwerte	<ul style="list-style-type: none"> ➤ Ermittlung des Taupunktabstandes ➤ Vergleich der gemessenen Werte mit den Grenzwerten der Hersteller sowie der maßgebenden Richtlinien ➤ Überprüfung des Einflusses des Außenklimas auf das Klima in einem geschlossenen Abwasser-schacht ➤ Bewertung der Auswirkungen auf die Sanierungsqualität ➤ Beurteilung der Genauigkeit und Anwendbarkeit von elektronischen Messgeräten bzw. der Messung mittels CM-Gerät 	<ul style="list-style-type: none"> ➤ Messung der Temperaturen sowie der rel. Luftfeuchtigkeit bei geöffnetem Schachtdeckel im oberen Drittel der Schächte bei allen 42 Schächten (vor und während der Sanierungsausführung) mit „Elcometer 319“ ➤ Langzeitmessung der Schachtinnenraumtemperatur an zwei Stellen (mitte / oben) über einen Zeitraum von mehreren Tagen an 4 Schächten nach Sanierung mit 4-Kanal Feuchte/Temperaturlogger „Testo 177-H1“ ➤ Langzeitmessung der rel. Luftfeuchtigkeit im Schacht über einen Zeitraum von mehreren Tagen an 4 Schächten nach Sanierung ➤ Elektronische Messung des Feuchtigkeitsgehaltes der Schachtwandung an drei Stellen (oben / mitte / unten) bei allen 42 Schächten vor Sanierungsausführung mit „Elcometer 118“ ➤ Kontrolle der elekt. Messungen mit einem CM-Gerät an einer Stelle bei allen 42 Schächten vor Sanierungsausführung ➤ Vergleichende Prüfung der Messung mittels CM-Gerät bei verschiedenen Arten der Probenentnahme bei einem Schacht vor Sanierungsausführung
	➤ Lufttemperatur		
	➤ relative Luftfeuchtigkeit		
	➤ Oberflächentemperatur der Schachtwandung		
	➤ Feuchtigkeitsgehalt der Schachtwandung		

Tabelle 23 (Forts.): Übersicht über die im Rahmen der In-situ-Untersuchungen durchgeführten Prüfungen

Prüfung		Ziel	Umfang / Ausführung
3	Bestimmung des Sulfat- und Carbonatgehalts in der Schachtwandung	<ul style="list-style-type: none"> ➤ Feststellung schadensbegünstigender Fremdstoffe in der Schachtwandung (Sulfate / Carbonate) ➤ Überprüfung der Auswirkung auf den Beschichtungserfolg 	<ul style="list-style-type: none"> ➤ Entnahme und Analyse von Bohrmehlproben als Tiefenprofil über die Schachtwandtiefe (1,5 cm / 3,0 cm / 4,5 cm) an drei Stellen (oben / mitte / unten) bei allen 42 Schächten vor Sanierungsausführung
4	Bestimmung der Haftzugfestigkeit	<ul style="list-style-type: none"> ➤ Vergleich der ermittelten Werte mit den Anforderungen der Hersteller sowie der maßgebenden Richtlinien ➤ Beurteilung des Erfolgs der ausgeführten Sanierung ➤ Beurteilung der Auswirkungen der Untergrundvorbereitung, Sanierungsausführung, Nachbehandlung sowie der sonstigen Randbedingungen auf die Haftzugfestigkeit ➤ Bewertung der Prüfung der Haftzugfestigkeit als Methode zur Feststellung der Qualität einer Schachtbeschichtung 	<ul style="list-style-type: none"> ➤ Prüfung der Abreissfestigkeit der Schachtwandung an drei Stellen (oben / mitte / unten) bei allen 42 Schächten in Anlehnung an ZTV-SIB 90 [63] bzw. DAfStB Instandsetzungs-Richtlinie [50] ➤ Prüfung der Haftzugfestigkeit der Beschichtungen an drei Stellen (oben / mitte / unten) bei allen 42 sanierten Schächten in Anlehnung an ZTV-SIB 90 [63] bzw. DAfStB Instandsetzungs-Richtlinie [50] ➤ Vergleichende Prüfung der Haftzugfestigkeit mit anderem Prüfaufbau bei 4 Schächten ➤ Vergleichende Prüfung der Haftzugfestigkeit von im Labor erstellten Mörtel- und Polyurethanbeschichtungsproben auf 7 Versuchsplatten mit verschiedenen Prüfaufbauten
5	Dichtheitsprüfung	<ul style="list-style-type: none"> ➤ Überprüfung der Dichtigkeit von schadhaften Beton- und Mauerwerksschächten vor und nach der Sanierung zur Bewertung des Sanierungserfolges ➤ Bewertung der Dichtheitsprüfung als Methode zur Feststellung der Qualität einer Schachtbeschichtung 	<ul style="list-style-type: none"> ➤ Dichtheitsprüfungen mit Wasser nach ATV-M143, T6 [29] und DIN EN 1610 [28] an 4 Schächten vor Ausführung der Sanierung sowie an sämtlichen 42 Schächten ca. 28 Tage nach Ausführung der Sanierung
	<ul style="list-style-type: none"> ➤ nach ATV-M143, Teil 6 		
	<ul style="list-style-type: none"> ➤ nach DIN EN 1610 		
6	Dokumentation der Vorgehensweise	<ul style="list-style-type: none"> ➤ Vergleich der Vorgehensweisen in der Praxis mit den Angaben in Verfahrens- und Qualitätshandbüchern der ausführenden Firmen und Materialhersteller sowie den maßgeblichen Richtlinien ➤ Auswertung der Zeitabläufe ➤ Bewertung des Einflusses der Vorgehensweisen auf die Qualität der Sanierung 	<ul style="list-style-type: none"> ➤ Begleitung der Sanierungsmaßnahmen inkl. aller vor- und nachbereitenden Arbeiten an sämtlichen 42 Schächten ➤ Dokumentation des Arbeitsablaufes, der Baustellenbedingungen, des verwendeten Materials und der eingesetzten Geräte
	<ul style="list-style-type: none"> ➤ Untergrundvorbereitung 		
	<ul style="list-style-type: none"> ➤ Abdichtung 		
	<ul style="list-style-type: none"> ➤ Beschichtung 		
	<ul style="list-style-type: none"> ➤ Nachbehandlung 		

Tabelle 23 (Forts.): Übersicht über die im Rahmen der In-situ-Untersuchungen durchgeführten Prüfungen

Prüfung		Ziel	Umfang / Ausführung
7	Befragung des ausführenden Personals	<ul style="list-style-type: none"> ➤ Erfassung der Qualifikation des ausführenden Personals ➤ Vergleich der Erfahrungen des ausführenden Personals mit den Vorgaben in den Verfahrens- und Qualitäts-handbüchern der ausführenden Firmen und Materialhersteller 	<ul style="list-style-type: none"> ➤ Befragung des ausführenden Personals bei sämtlichen 42 Sanierungsmaßnahmen hinsichtlich Qualifikation, Erfahrungen bei der Beschichtung von Schächten etc.
8	Prüfung der Frischmörtelkonsistenz	<ul style="list-style-type: none"> ➤ Vergleich der gemessenen Werte mit den Grenzwerten der Hersteller sowie der maßgebenden Richtlinien ➤ Bewertung der Abweichung bei mehreren Mischvorgängen 	<ul style="list-style-type: none"> ➤ Messung des Ausbreitmaßes des Frischmörtels bei 20 Mörtelbeschichtungsmaßnahmen während der Sanierungsausführung in Anlehnung an DIN 18555 [69]
9	Entnahme von Werkstoffproben	<ul style="list-style-type: none"> ➤ Gewinnung von Materialproben unter Baustellenbedingungen zur Prüfung der Materialeigenschaften 	<ul style="list-style-type: none"> ➤ Entnahme von Werkstoffproben während der Sanierungsausführung bei sämtlichen 42 Sanierungsmaßnahmen
10	Prüfung der Beschichtungsdicken	<ul style="list-style-type: none"> ➤ Bewertung der Gleichmäßigkeit des Materialauftrages ➤ Beurteilung des Zusammenhangs zwischen Schichtdicke und Haftzugfestigkeit / Rissbildung etc. 	<ul style="list-style-type: none"> ➤ Entnahme von Kernbohrungen an 5 Stellen der Schachtwandung bei sämtlichen 42 Schächten nach Sanierungsausführung ➤ Vermessung der Proben und Dokumentation der Beschichtungsdicken
11	Wasserhochdruckspülversuche	<ul style="list-style-type: none"> ➤ Überprüfung der Betriebstauglichkeit von Polyurethan-Kurzlinern zur Abdichtung der Einbindungsbereiche bei PU-Beschichtungen 	<ul style="list-style-type: none"> ➤ Durchführung von 30 Reinigungsdurchläufen an den Einbindungsbereichen der angrenzenden Kanalhaltungen bei zwei mittels Polyurethanbeschichtung und PU-Kurzlinern sanierten Schächten in situ in Anlehnung an den Hamburger Spülversuch [81]

An den während der Sanierungsausführung entnommenen Werkstoffproben (vgl. Tabelle 23, „Entnahme von Werkstoffproben“) wurden wesentliche Materialkennwerte ermittelt und diese mit den Angaben bzw. Anforderungen der Hersteller sowie der maßgebenden Richtlinien verglichen. Gegebenenfalls sollten Zusammenhänge zwischen den Ergebnissen und den unterschiedlichen Randbedingungen erkannt werden.

Prüfungen an Probekörpern

An jeweils drei Proben aus 24 **Mörtelbeschichtungsmaßnahmen** wurde die 3-Punkt-Biegezugfestigkeit sowie die Druckfestigkeit des Mörtels in Anlehnung an DIN EN 196, Teil 1 [68] ca. 28 Tage nach Ausführung der Sanierungsarbeiten bestimmt. Zusätzlich wurden vergleichende Prüfungen bei Probennahme mit unterschiedlichen Schalungen (Stahl- und Styroporschalung) an 12 Probekörpern durchgeführt.

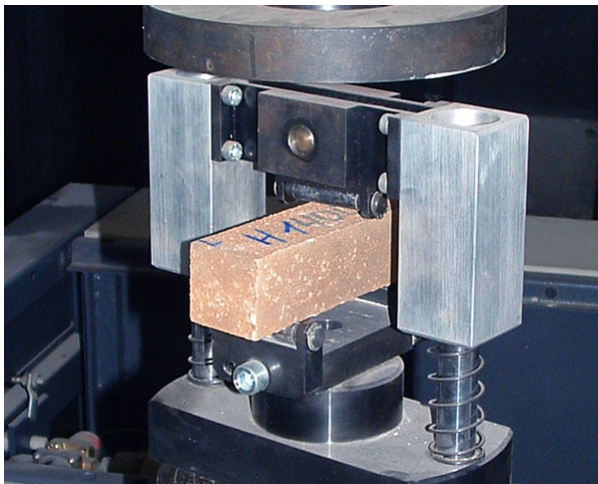


Abb. 40: Ermittlung der 3-Punkt-Biegezugfestigkeit

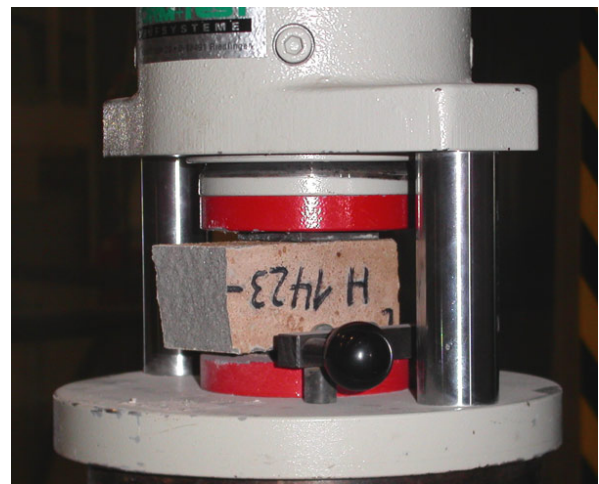


Abb. 41: Ermittlung der Druckfestigkeit

Ebenfalls an drei Proben pro Mörtelbeschichtungsmaßnahme wurde die Rohdichte des Festmörtels ca. 28 Tage nach Ausführung der Sanierung bestimmt. Dazu wurden die Probekörper vermessen, gewogen und die Rohdichte errechnet. An Proben von drei Mörtelbeschichtungsmaßnahmen wurde beispielhaft der E-Modul in Anlehnung an DIN 18555, Teil 4 [69] bestimmt.

Die Wassereindringtiefe wurden an jeweils drei Proben sämtlicher 26 Mörtelbeschichtungsmaßnahmen in Anlehnung an DIN 1048, Teil 5 [74] ca. 28 Tage nach Ausführung der Sanierungsarbeiten bestimmt. Dazu wurde auf die Prüfkörper ein Wasserdruck von 0,5 bar aufgebracht und während 72 Stunden konstant gehalten (vgl. Abb. 42). Nach Ablauf der Prüfzeit wurden die Probekörper mittig gebrochen, so dass die Wassereindringtiefe gemessen werden konnte (vgl. Abb. 42).

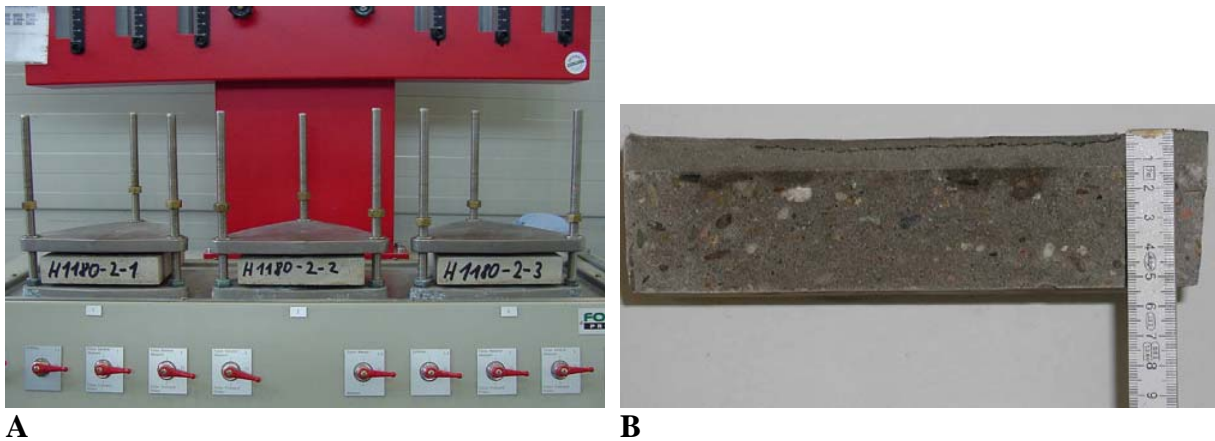


Abb. 42: Ermittlung der Wassereindringtiefe. **A:** Beaufschlagung der Proben mit 0,5 bar Wasserdruck. **B:** Mittig gebrochener Probekörper mit eingezeichnetem Verlauf der Wassereindringtiefe.

An Proben von sämtlichen 16 in situ ausgeführten **Polyurethanbeschichtungen** wurde die Zugfestigkeit und der Zug-E-Modul in Anlehnung an DIN EN ISO 527 [82] bestimmt. Zusätzlich wurde die Abriebfestigkeit einer Polyurethanbeschichtung an einem beschichteten Halbrohr im „Darmstädter Kipprinnenversuch“ gemäß DIN 19565 [83] untersucht.

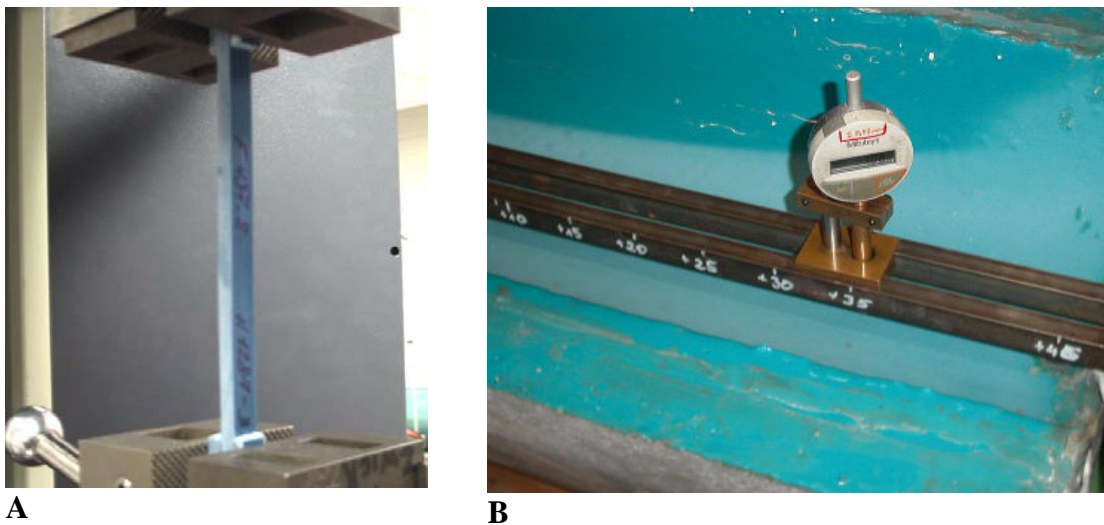


Abb. 43: Materialprüfungen an Polyurethan. **A:** Bestimmung der Zugfestigkeit und des Zug-E-Moduls an Polyurethanproben. **B:** Bestimmung der Abriebfestigkeit einer Polyurethanbeschichtung im Darmstädter Kipprinnenversuch

4.3 Untersuchungsergebnisse

4.3.1 Qualitätssicherung: Einflussfaktoren und Optimierungspotentiale

Die in Richtlinien, Informationsschriften, Sachstandsberichten bzw. Verarbeitungsrichtlinien aufgeführten Methoden zur Qualitätssicherung von Beschichtungsmaßnahmen orientieren sich grundsätzlich an den im Betonbau üblichen Bedingungen des Hoch- und Brückenbaus (vgl. Abschnitt 3.3.3). Nur in Einzelfällen finden sich ergänzende Ausführungen für den Einsatz in Bauwerken der Ortsentwässerung, z.B. in [38] mit Blick auf zementhaltige, mineralische Mörtel. Vor diesem Hintergrund stellt sich die grundsätzliche Frage, inwieweit mögliche Methoden zur Qualitätssicherung von Beschichtungsmaßnahmen tatsächlich auch auf den vorliegenden Anwendungsfall mit vertretbarem Aufwand und ausreichender Aussagekraft übertragbar sind. Dies betraf vor allem die **Bestimmung der Oberflächenfeuchte**, die **Bestimmung der Abreißfestigkeit des Untergrundes** bzw. der **Haftzugfestigkeit der Beschichtungen** sowie die **Entnahme von Frischmörtelproben** und die Bestätigung des Sanierungserfolgs durch **Wasserdichtheitsprüfungen**. Im Folgenden werden beispielhaft einzelne Prüfverfahren vorgestellt, deren In-situ-Einsatz beschrieben, die Aussagekraft der Prüfergebnisse hinterfragt und ggf. Optimierungspotentiale aufgezeigt.

4.3.1.1 Bestimmung der Oberflächenfeuchte

Vor Ausführung der Sanierungsmaßnahmen wurde für alle Schächte der Feuchtigkeitsgehalt der Schachtwand mittels **CM-Methode** bestimmt (vgl. [84]). Die CM-Methode bietet, ebenso wie die aufwändigere Darr-Methode^a, die Möglichkeit einer quantitativen Bestimmung der Baustofffeuchte ohne weitere Vergleichsmessungen. Dazu wird jeweils eine Baustoffprobe aus der Schachtwand entnommen, zerkleinert und mit einer definierten Menge Calciumcarbid (CaC_2) sowie Rührkugeln unterschiedlicher Größe in eine Druckflasche eingefüllt. Durch Schütteln der Druckflasche vermischt sich das Calciumcarbid mit der Baustoffprobe und reagiert mit dem darin vorhandenen Wasser. Bei dieser Reaktion entsteht Calciumhydroxid ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) und das Gas Acetylen (C_2H_2). Da die Menge des gasförmigen Reaktionsproduktes Acetylen proportional zur umgesetzten Menge an Wasser ist, lässt die Höhe des Gasdrucks auf den Feuchtegehalt der Baustoffprobe schließen.

Zur Plausibilitätskontrolle und um näherungsweise die Feuchteverteilung über die Schachtwand zu bestimmen, wurde neben der punktuell eingesetzten CM-Methode auch eine dreimalige Widerstandsmessung (oben, mitte, unten) mit einem analogen **Oberflächenfeuchte-**

a Bei der Darr-Methode wird der massebezogene Wassergehalt u_m ermittelt. Dazu wird eine feuchte Baustoffprobe gewogen, getrocknet und nach Abkühlung der Probe bei 0 % relativer Luftfeuchte erneut gewogen. Mit diesen Angaben kann dann der massebezogene Wassergehalt u_m rechnerisch bestimmt werden (nach [84])

Messgerät („Elcometer 118“ der Firma Elcometer Instruments GmbH, Aalen, vgl. Abb. 44) durchgeführt. Dabei wird eine mit zwei Stiftelektroden bestückte Messsonde gegen die Prüfoberfläche gedrückt und in Abhängigkeit des Untergrundes der Feuchtegehalt des Materials angezeigt. Der Messbereich für Beton liegt zwischen 5 % und 14 % Feuchtegehalt und für Mauerwerk zwischen 8 % und 20 %, jeweils bei einer Genauigkeit von $\pm 2 \%$ [85].



Abb. 44: Messung des Feuchtegehaltes der Schachtwandung. **A:** Analoges Oberflächenfeuchte-Messgerät „Elcometer 118“ [aus 85]. **B:** Probenentnahme im Schacht mit Hammer und Meißel für Messung nach CM-Methode. **C:** Probenentnahme im Schacht mit Bohrer für Messung nach CM-Methode. **D:** CM-Gerät mit Druckmanometer.

Die Widerstandsmessung konnte in allen Fällen mit sehr geringem Aufwand eingesetzt werden, die Messergebnisse waren stets direkt ablesbar. Allerdings können sich insbesondere bei Änderung des Anpressdrucks deutliche Schwankungen in den Messwerten ergeben. Tendenziell lagen die Messergebnisse der Widerstandsmessungen über denen der Messungen nach CM-Methode. In Einzelfällen zeigte das Widerstands-Messgerät sogar einen Vollausschlag, wenn sich direkt auf der Oberfläche der Wandung Wasser befand.

Besondere Schwierigkeiten ergaben sich bei der Probennahme im Schacht für die Prüfung nach der CM-Methode. So setzt die Probenentnahme mit Hammer und Meißel sowohl eine ausreichende Standfläche für den Probennehmer als auch eine Abstellmöglichkeit für den Probenbehälter unmittelbar unter der Entnahmestelle voraus. Stehen hierzu keine Steigeisen zur Verfügung, ist die Probenahme nur mit einem Spiralbohrer möglich. Dabei wird die Wandungsoberfläche an mehreren Stellen kurz angebohrt und das herunterfallende Bohrmehl direkt in dem darunter gehaltenen Behälter aufgefangen. Da bei Vergleichsmessungen die Abweichungen in den Messergebnissen für diese Probenahmearten unter 10 % lagen, wurde grundsätzlich eine Probennahme mit Spiralbohrer durchgeführt.

Als **Fazit** kann festgehalten werden, dass die CM-Methode eine zuverlässigere Beurteilung des Feuchtegehaltes der Schachtwandungen zulässt, da sie auf Bohrmehlproben eines mehrere Millimeter tiefen oberflächennahen Bereichs zurückgreift. Die Messergebnisse des analogen Widerstandsmessgerätes, dessen Elektroden nur an die Materialoberfläche gedrückt werden, zeigten deutliche Schwankungen und tendenziell höhere Werte. Eine Probennahme in tiefen Schächten und Bereichen ohne Steigeisen ist für die CM-Methode letztlich nur bei Einsatz eines handgeführten Bohrers möglich. Der beidhändige Einsatz von Hammer und Meißel ist schon aus Arbeitssicherheitsgründen kaum zu empfehlen. Insbesondere bei feuchtigkeitsempfindlichen Beschichtungsmaterialien scheint der höhere Aufwand für die CM-Methode jedoch gerechtfertigt.

4.3.1.2 Bestimmung der Abreißfestigkeit des Untergrundes und des Haftverbundes der Beschichtung

Um die Oberflächenzugfestigkeiten der zu beschichtenden Schachtwandungen bzw. den Verbund zwischen Beschichtungsmaterial und Untergrund zu überprüfen, wurden an allen Schächten Abreiß- bzw. Haftzugversuche in Anlehnung an ZTV-SIB90 [63] bzw. DAfStb Instandsetzungs-Richtlinie [50] einige Tage vor und 28 Tage nach Ausführung der Sanierungsarbeiten durchgeführt. In jedem Schacht wurde die Oberflächenzugfestigkeit bzw. der Haftverbund jeweils im oberen, mittleren und unteren Drittel des Schachtkörpers gemessen. Alle Untersuchungen wurden von demselben Prüfer mit dem Haftzugprüfgerät DYNA16 der Firma Proceq SA, Zürich vorgenommen.

In einem ersten Schritt wird die Schachtwandung bzw. die Beschichtung mittels einer hohlen Diamantbohrkrone (Innendurchmesser 50 mm) ca. 10 mm tief angebohrt (Kernbohrung). Anschließend wird die Prüffläche gereinigt und getrocknet und ein zylindrischer Aluminiumstempel (Ø ebenfalls 50 mm) mit einem schnellhärtenden zweikomponentigem Epoxidkleber (MC-Quicksolid) zentrisch auf die gereinigte Fläche gesetzt und in den Bohrfugen mit mehreren Holzstäbchen in seiner Position fixiert. Nach einer Aushärtezeit von mindestens einer Stunde wird mit der Abreiß- bzw. Haftzugprüfung begonnen. Das Haftzugprüfgerät wird dazu zentrisch über dem angeklebten Stahlstempel positioniert, mit diesem verbunden und rechtwinklig zur angebohrten Fläche gegen die Schachtwandung bzw. die Beschichtung abge-

stützt. Anschließend wird die Last kontinuierlich bis zum Bruch gesteigert und die Bruchlast im Prüfgerät aufgezeichnet. Der gesamte Prüfablauf ist in Abb. 45 dargestellt. Für die Einzelschritte werden im Folgenden das Vorgehen detailliert beschrieben und mögliche Schwachstellen und Optimierungspotentiale aufgezeigt.



A



B



C



D



E



F

*Abb. 45: Durchführung von Abreiß- bzw. Haftzugprüfungen. **A:** Anbohren einer Betonschachtwand. **B:** Anbohren einer Beschichtung aus Polyurethan. **C:** Trocknen der Bohrfläche sowie der unmittelbaren Umgebung. **D:** Auf eine Beschichtung aus Mörtel geklebter Aluminiumstempel. **E:** Durchführung einer Abreißprüfung an einer Schachtwand aus Beton. **F:** Durchführung einer Haftzugprüfung an einer Beschichtung aus Polyurethan.*

Kernbohrung

Maßgebend für die Ausführung einer Kernbohrung an Beschichtungsmaterialien sind die ZTV-SIB 90 [63] bzw. die Instandsetzungs-Richtlinie des Deutschen Ausschusses für Stahlbeton [50]. In der ZTV-SIB 90 [63] werden keine speziellen Vorgaben zur Ausführung des Bohrvorgangs gemacht. In der Instandsetzungs-Richtlinie des Deutschen Ausschusses für Stahlbeton [50] wird lediglich darauf hingewiesen, dass „der Zylinderstumpf nicht vorgeschädigt werden darf“. Um Schädigungen der vorgebohrten Zylinderstumpfe ggf. zu erkennen, wurden diese in allen hier betrachteten Fällen nach Beendigung des Bohrvorgangs optisch inspiziert.

Demgegenüber werden in genormten Laborprüfungen, z.B. bei der Prüfung an Probekörpern nach DIN EN 1542 [86], auch weitergehende Anforderungen gestellt, die auch seitens einiger Hersteller für die In-situ-Prüfung diskutiert werden. In DIN EN 1542 [86] wird nach Absatz 7.1 gefordert, dass „der Kernbohrer und die Prüfkörper so zu befestigen sind, dass sie sich nicht bewegen oder lösen können. Der Bohrer sollte keine erheblichen Vibrationen aufweisen und seitliche Bewegungen der Bohrkronen verhindern.“ Im Rahmen des Projektverlaufes wurde daher hinterfragt, inwieweit diese Bedingungen auch auf Haftzugprüfungen in Abwasser-schächten übertragen werden können. Dabei zeigte sich allerdings, dass eine Fixierung des Kernbohrers an der Schachtwandung mit vertretbarem Aufwand weder mit einer handelsüblichen Unterdruck-Saugplatte noch schadensfrei mit mechanischen Befestigungsmitteln (z.B. Dübel) möglich ist. Darüber hinaus bestätigten auch vergleichende Laborprüfungen an Mörtel- und Polyurethanbeschichtungen, die auf sandgestrahlte Probekörpern hergestellt worden waren (vgl. [50]), den geringen Einfluss des Bohrverfahrens auf die Haftzugwerte (vgl. Tabelle 24).



A



B



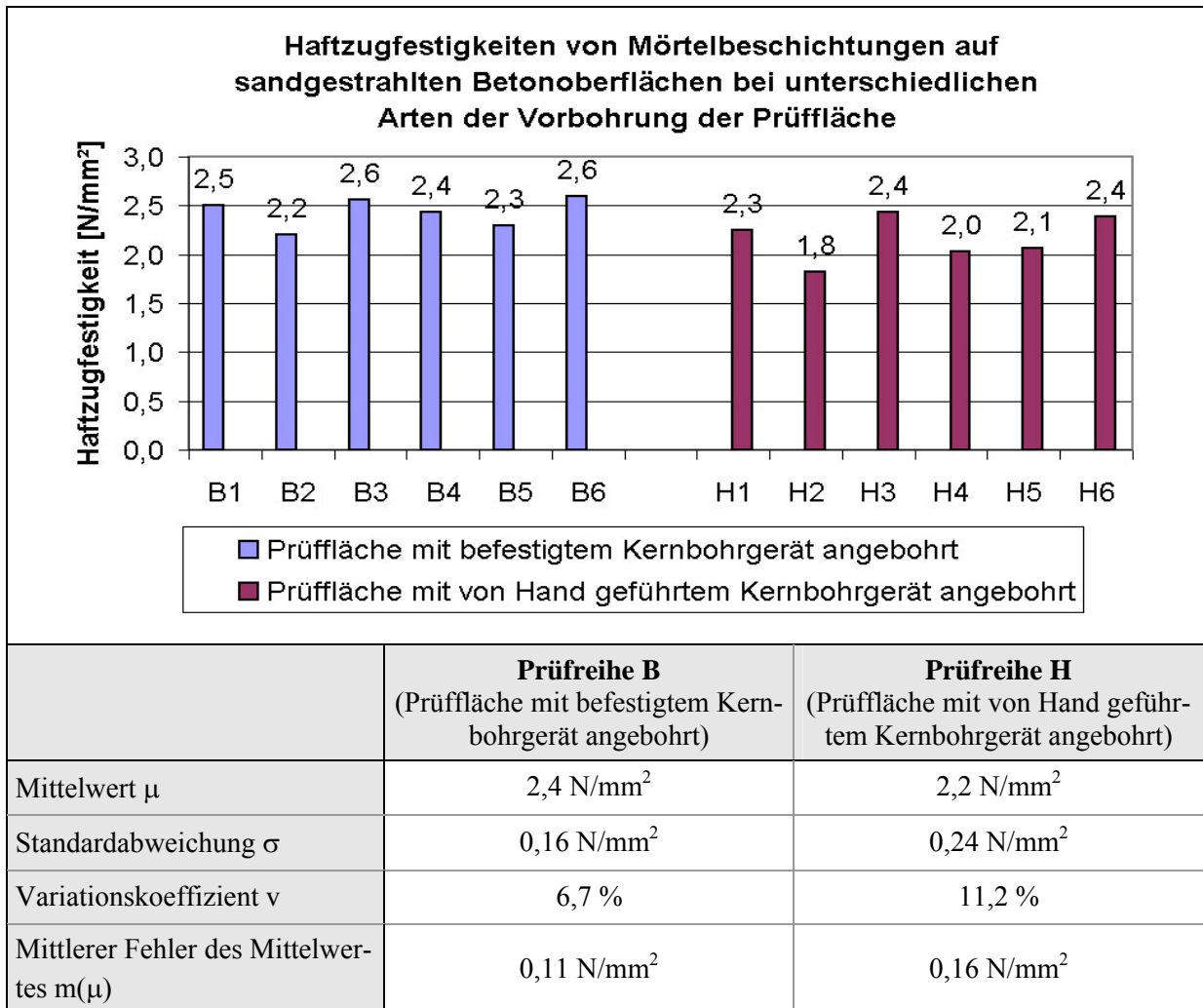
C



D

Abb. 46: Haftzugprüfungen an Beschichtungen, die unter Laborbedingungen auf sandgestrahlte Betonprobekörper gemäß den Vorgaben in [50] aufgetragen worden sind. **A:** Mit Ergelit Kombina KS 1 beschichteter Betonprobekörper. **B:** Durchführung der Haftzugprüfung an einer Mörtelbeschichtung. **C:** Mit Oldodur WS 56 beschichteter Betonprobekörper. **D:** Durchführung der Haftzugprüfung an einer Polyurethanbeschichtung

Tabelle 24: Ergebnisübersicht zur Messung der Haftzugfestigkeiten von Mörtelbeschichtungen auf sandgestrahlten Betonoberflächen bei unterschiedlichen Arten der Vorbohrung der Prüffläche



Anmerkung: Bei den Proben B2 und H2 versagte der Beschichtungsmörtel, alle anderen Proben lag die Bruchstelle in der Trennfuge zwischen Beschichtung und Untergrund

Vor diesem Hintergrund empfiehlt es sich, die Kernbohrungen vor Ort mittels handgeführtem Bohrer durch stets denselben, speziell ausgewiesenen Ingenieur bei nachträglicher Sichtkontrolle des Zylinderstumpfes durchzuführen.

Reinigung und Trocknung der Prüffläche

Die Prüffläche sollte nach ZTV-SIB 90 [63] „staub-, fettfrei und trocken sein.“ Bei den Prüfungen im Rahmen des Projektes zeigte sich, dass eine Reinigung mittels Wasserhochdruck direkt vor den Haftzugprüfungen die Aushärtung des Klebers durch die verbleibende hohe Oberflächenfeuchte stark beeinträchtigen kann. Grundsätzlich empfiehlt es sich, den Schacht mindestens einen Tag vor Ausführung der Prüfungen zu reinigen. Auch ohne Wasserhochdruck-Reinigung war in allen Fällen allerdings eine Trocknung der Prüffläche sowie der unmittelbaren Umgebung notwendig. Hierzu wurde ein Industriefön für wenige Minuten in eini-

gen Zentimetern Abstand vor die Prüffläche gehalten und anschließend die Oberfläche optisch kontrolliert. Erfolgte keine vorbereitende Reinigung des Schachtes mittels Wasserhochdruck, wurde der Bereich der Prüffläche mit einer Drahtbürste und anschließend mit einem fettlösenden Reinigungsmittel gereinigt. Speziell bei den Schächten aus Betonfertigteilen mit dem Schadensbild Korrosion war es so allerdings kaum möglich, die geschädigte Betonschicht komplett abzutragen.

Aushärtung des Klebers

Die Aushärtezeit des verwendeten Klebers (MC-Quicksolid) beträgt nach Herstellerangaben mindestens eine Stunde. Aufgrund des i.d.R. feuchten Schachtklimas und häufigen Versagens des Klebers in der Prüfung wurde die Aushärtezeit – je nach Zugänglichkeit und Verkehrssituation – zu ca. 3 Stunden gewählt. Insbesondere eintretendes Grundwasser verhinderte das Aushärten des Klebers im Rahmen der Untersuchung der Abreißfestigkeit der Schachtwandungen. Auch nach Trocknung der Oberfläche durchfeuchtete die Prüffläche wieder rasch. Bei Regenereignissen war der Schacht grundsätzlich vor zulaufendem Regenwasser zu schützen.

Aufbringen der Last

In der ZTV-SIB 90 [63] und der Instandsetzungs-Richtlinie des Deutschen Ausschusses für Stahlbeton [50] ist festgelegt, dass die Prüfstempel mit annähernd konstanter Belastungsgeschwindigkeit abzureißen sind. Die Belastungsgeschwindigkeit sollte bei Prüfungen an Betonunterlagen bzw. harten Schichten (Beton, Mauerwerk, Mörtelbeschichtung) ca. 100 N/s und bei Prüfungen an elastischen und thermoplastischen bzw. weichen Schichten (Polyurethanbeschichtung) ca. 300 N/s betragen.

Bei den Prüfungen der Untergrundfestigkeit der Beton- und Mauerwerkswandungen sowie der Haftzugfestigkeit der Mörtelbeschichtungen wurde die geforderte Belastungsgeschwindigkeit von ca. 100 N/s durch Einsatz eines Elektroantriebes sichergestellt (vgl. Abb. 47). Für die Prüfungen an den Polyurethanbeschichtungen stand zum Zeitpunkt der ersten In-situ-Untersuchungen (September 2003) kein marktreifes Gerät zur Verfügung, das unter Praxisbedingungen auch in tieferen Abwasserschächten angewendet werden und eine ruckfreie Laststeigerung von ca. 300 N/s gewährleisten konnte. In diesen Fällen wurde die Laststeigerung mit einer Handkurbel aufgebracht und ein Lastanstieg von ca. $0,15 \text{ N}/(\text{s mm}^2)$ (Prüffläche \varnothing 50 mm) manuell mittels digitaler Spannungsanzeige angesteuert.



Abb. 47: Haftzugprüfgerät DYN16 der Firma Proceq SA, Zürich mit Elektroantrieben zur Gewährleistung einer konstanten Lastanstiegsgeschwindigkeit von 100 N/s (links), Elektroantrieb zur Sicherstellung einer konstanten Lastanstiegsgeschwindigkeit, u.a. von 300 N/s (rechts)

4.3.1.3 Entnahme von Frischmörtelproben

Entnahme von Proben zur Bestimmung der Biegezug- und Druckfestigkeiten

Um die Biegezug- und Druckfestigkeit der vor Ort angemischten Mörtelmischungen mit den Angaben bzw. Anforderungen der Hersteller sowie der maßgebenden Richtlinien vergleichen zu können, wurden bei insgesamt 24 Mörtelbeschichtungsmaßnahmen Frischmörtelproben entnommen. Die Proben wurden nach der Entnahme abgedeckt, feucht gehalten und nach 24 h für die restlichen 27 Tage bis zur Prüfung unter Wasser gelagert^a.

Um eine praxisnahe und zuverlässige Entnahme von Mörtelproben einschließlich Verdichtung in situ zu unterstützen, wurden grundsätzlich Einweg-Styroporschalungen eingesetzt. Vergleichsprüfungen mit verschiedenen Schalungstypen bestätigten die gute Übereinstimmung der Prüfergebnisse. So weichen die an den jeweils 6 bzw. 12 Probekörpern gemessenen **Biegezug- und Druckfestigkeiten** bei den unterschiedlichen Arten der Probennahme nur geringfügig voneinander ab (vgl. Tabelle 25). Die Differenzen der Mittelwerte der gemessenen Biegezug- bzw. Druckfestigkeiten entsprechen in ihrer Größenordnung jeweils der Summe der mittleren Abweichungen gerade dieser Mittelwerte.

a Nach DIN EN 196, Teil 1 [68]) werden darüber hinaus für speziell gewonnene Probekörper (Labor) auch direkt nach Entnahme konkrete Anforderungen an die Klimabedingungen (Temperatur: $20^{\circ} \pm 2^{\circ}$ C, rel. Luftfeuchte: mind. 50 %) gestellt.

Tabelle 25: Ergebnisübersicht der Biegezugfestigkeiten eines Beschichtungsmörtels bei unterschiedlichen Arten der Probennahme und Verdichtung

	Prüfreihe Styropor (Prüfkörper in den ersten 24 h nach Herstellung in Styroporschalungen gelagert, händische Fixierung der Formen bei der Verdichtung)						Prüfreihe Stahl (Herstellung und Verdichtung der Prüfkörper gemäß DIN EN 196, Teil 1)					
Einzelwerte [N/mm ²]	12,29	11,77	12,43	11,51	12,25	12,50	12,47	11,26	12,20	9,36	10,66	11,23
Mittelwert μ	12,13 N/mm ²						11,20 N/mm ²					
Standardabweichung σ	0,40 N/mm ²						1,12 N/mm ²					
Variationskoeffizient v	3,3 %						10,0 %					
Mittlerer Fehler des Mittelwertes $m(\mu)$	0,26 N/mm ²						0,73 N/mm ²					

Tabelle 26: Ergebnisübersicht der Druckfestigkeiten eines Beschichtungsmörtels bei unterschiedlichen Arten der Probennahme und Verdichtung

	Prüfreihe Styropor (Prüfkörper in den ersten 24 h nach Herstellung in Styroporschalungen gelagert, händische Fixierung der Formen auf dem Rütteltisch)						Prüfreihe Stahl (Herstellung und Verdichtung der Prüfkörper gemäß DIN EN 196, Teil 1)					
Einzelwerte [N/mm ²]	70,58	57,54	60,04	69,53	63,54	66,98	65,92	72,56	65,38	68,45	71,34	70,96
	62,58	60,20	54,44	55,15	53,44	51,97	66,84	76,78	73,03	79,41	77,12	67,70
Mittelwert μ	60,50 N/mm ²						71,29 N/mm ²					
Standardabweichung σ	6,29 N/mm ²						4,66 N/mm ²					
Variationskoeffizient v	10,4 %						6,5 %					
Mittlerer Fehler des Mittelwertes $m(\mu)$	4,09 N/mm ²						3,03 N/mm ²					

Entnahme von Proben zur Bestimmung der Wassereindringtiefe

Um Prüfkörper zur Messung der Wassereindringtiefe des Mörtels in Anlehnung an DIN 1048, Teil 5 [74] auf der Baustelle entnehmen zu können, waren im Vorfeld Betonkörper gemäß DIN EN 1766 [87] hergestellt worden. Der Beschichtungsmörtel wurde vor Ort mit dem jeweils eingesetzten Auftragsverfahren in einer Schichtdicke von ca. 10 mm Stärke auf diese Betonkörper aufgebracht (vgl. Abb. 48). Zur praxisnahen Probenentnahme beim Auftragen des Mörtels im Anschleuderverfahren wurde eine Hilfskonstruktion angefertigt. In dieser Hilfskonstruktion konnte der Schleuderkopf so auf und ab bewegt werden, dass der Mörtel auf die an den seitlichen Wandungen der Hilfskonstruktion befestigten Schalungen geschleudert wurde.



A



B



C

Abb. 48: Mörtelprobennahme in situ. **A:** Befüllung von Hand. **B:** Anspritzen des Mörtels.
C: Anschleudern des Mörtels

4.3.1.4 Dichtheitsprüfung

Vier unsanierte Schächte wurden bereits einige Tage vor Sanierungsausführung einer Wasserdichtheitsprüfung unterzogen. An allen Schächten wurden ca. 28 Tage nach der Sanierungsausführung Dichtheitsprüfungen mit Wasser angestrebt und in 31 Fällen ausgeführt. In 11 Fällen hätte die Wasserdichtheitsprüfung nur mit unverhältnismäßig großem Aufwand durchgeführt werden können. Um die Durchführung der Prüfung und Aussagekraft der Prüfkriterien vergleichen zu können, wurden die Schächte einheitlich zunächst nach ATV-M 143, Teil 6 [29] (Dichtheitsprüfung an bestehenden Schächten) und im Anschluss nach den Prüfkriterien gemäß DIN EN 1610 [28] (Dichtheitsprüfung im Rahmen der Bauausführung) geprüft (vgl. Abschnitt 3.1.3).

Zunächst wurden alle einbindenden Leitungen mit Dichtblasen abgesperrt und eine Markierung ca. 50 cm über dem Scheitel der untersten Rohreinbindung an die Schachtwandung angebracht (vgl. Abb. 49). Anschließend wurde der Schacht unter Einsatz eines Spülfahrzeugs bis zu dieser Markierung mit Wasser befüllt und eine Prüfung gemäß ATV-M 143, Teil 6 [29] durchgeführt. Nach Ablauf der Prüfzeit wurde der gemessene Wasserverlust notiert, der Schacht bis zu den Auflagern mit Wasser befüllt und der Schacht gemäß DIN EN 1610 [28] ge-

prüft (vgl. Abb. 50). Bei beiden Prüfungen wurde der Wasserstand während der Prüfzeit mit einem Druckfühler gemessen.



Abb. 49: Setzen einer Markierung 50 cm über dem Scheitel der untersten Rohreinbindung



Abb. 50: Füllen des Schachtes bis zu den Auflagerungen für eine Prüfung gemäß DIN EN 1610

Im Gesamtblick der Ergebnisse zeigte sich, dass Wasserdichtsprüfungen im Rahmen der Abnahme von Sanierungsmaßnahmen grundsätzlich nicht geeignet sind, um mit vertretbarem Aufwand Ausführungsmängel zweifelsfrei zu identifizieren. Es ist insbesondere zu vermuten, dass die Prüfergebnisse z.B. aufgrund von Umläufigkeiten im Bereich der Absperrblasen nur in seltenen Fällen verwertbar sind. Im vorliegenden Fall wurden z.T. nach der Sanierung sogar größere Wasserverluste gemessen als vor Ausführung der Maßnahme (Tabelle 27).

Tabelle 27: Vergleich der Ergebnisse der Wasserdichtheitsprüfungen an den unsanierten Schächten mit denen der Prüfungen nach Ausführung der Sanierungen

Schacht Nr.*	Prüfung gemäß ATV-M 143, Teil 6				Prüfung gemäß DIN EN 1610			
	Prüfung im unsanierten Zustand		Prüfung nach Ausführung der Sanierung		Prüfung im unsanierten Zustand		Prüfung nach Ausführung der Sanierung	
	Wasserzugabe [l]	Ergebnis	Wasserzugabe [l]	Ergebnis	Wasserzugabe [l]	Ergebnis	Wasserzugabe [l]	Ergebnis
36	>> 100	nicht bestanden	30,8	nicht bestanden	>> 100	nicht bestanden	>> 100	nicht bestanden
37	22,9	nicht bestanden	50,1	nicht bestanden	>> 100	nicht bestanden	>> 100	nicht bestanden
38	35,7	nicht bestanden	37,7	nicht bestanden	>> 100	nicht bestanden	>> 100	nicht bestanden
42	1,2	bestanden	2,0	nicht bestanden	43,3	nicht bestanden	50,2	nicht bestanden

* weitere Informationen zu den Schächten sowie zu der Untergrundvorbehandlung und der Auftragsart der Mörtel bzw. Polyurethane finden sich in Abb. 37, Abb. 38 und Tabelle 16

Lediglich die Dichtheit des Schachtes, nicht aber dessen Undichtigkeit, lässt sich somit durch eine Wasserdichtheitsprüfung zuverlässig bestätigen. Nach der Sanierung wurden bei 13 von 31 Schächten die Kriterien nach ATV-M 143, Teil 6 und bei 7 von 29 Schächten die Kriterien nach DIN EN 1610 erfüllt. Die übrigen Prüfungen mussten z.T. schon nach wenigen Minuten abgebrochen werden, da der Wasserstand auch durch Nachfüllen über einen Schlauch kaum aufrechterhalten werden konnte. Entsprechend kam es in diesen Fällen auch zu großen Unterschieden in den Ergebnissen der einzelnen Prüfverfahren.

Im einzelnen ergaben sich die folgenden technischen Schwierigkeiten:

- Wurden der Gerinnebereich und die Berme des Schachtes nicht in die Sanierungsmaßnahme einbezogen, ist eine Dichtheitsprüfung allein des sanierten Bereichs technisch derzeit nicht umsetzbar. Undichtigkeiten, z.B. im Gerinne, können dann zu Fehlinterpretationen des Prüfergebnisses führen.
- Wurden die **Zu- und Abläufe** bzw. die einbindenden Kanalhaltungen nicht bzw. nicht fachgerecht saniert, erhöht sich die Gefahr von Umläufigkeiten an den Absperrblasen. Allerdings ist eine Kontrolle der Dichtwirkung der Absperrblasen insbesondere im Zufluss kaum möglich, da sich das Abwasser dort hinter der Dichtblase aufstaut und eine Kamerabefahrung zur Erkennung von Undichtigkeiten ausschließt. Werden die Blasen weit in die Leitungen eingeschoben (z.B. aufgrund von Inkrustationen), können darüber hinaus auch Undichtigkeiten in den angeschlossenen Leitungen zu Wasserverlust führen. Bei den Schächten Nr. 8 und Nr. 29 waren die anbindenden Betonkanäle so stark korrodiert, dass eine Dichtheitsprüfung ohne eine Beschichtung der einbindenden Leitungsbereiche nicht möglich war. Aufgrund der scharfkantigen Oberfläche des

Kanals in diesen Bereichen wurde eine Absperrblase während des Befüllvorgangs zerstört und die Prüfung abgebrochen.

Darüber hinaus überstiegen die **Kosten** für die Dichtheitsprüfung des Schachtes in einigen Fällen sogar die zu erwartenden Sanierungskosten. Dies war im Wesentlichen auf die folgenden Umstände zurückzuführen:

- Bei großen Kanälen (z.B. \geq DN 800) ist mit Schwierigkeiten beim Einbringen der Prüfblasen durch den Schachthals zu rechnen. Sonderprofile (z.B. Eiquerschnitt) erfordern z.T. spezielles Equipment.
- Die Wasserhaltung kann bei hohem Trockenwetterabfluss mit besonderem Aufwand verbunden sein. In einem Einzelfall wurden von zwei Fachfirmen für die Ausführung einer Dichtheitsprüfung und den Aufbau einer Wasserhaltung hinter der Mündung einer Sammeldruckrohrleitung im Zulauf einer Kläranlage Angebote in Höhe von € 4.740,00 bzw. € 10.062,00 zzgl. MwSt. abgegeben.
- Müssen die technischen Randbedingungen für die Prüfung (vgl. technische Schwierigkeiten oben) in großem Umfang verbessert werden, entstehen ebenfalls bereits im Vorfeld der Prüfung erhebliche Kosten. Um dies beispielhaft zu belegen, wurde für die Schächte Nr. 34 und 35 trotz hohen Trockenwetterabflusses, unzureichender Ausbildung der Zu- und Abläufe, mangelhafter Gerinne und großer Leitungsquerschnitte eine Fachfirma mit der Dichtheitsprüfung und dem Aufbau einer Wasserhaltung beauftragt. Die veranschlagten Kosten lagen bei € 3.159,00 (1. Bieter) bzw. € 3.360,00 (2. Bieter) zzgl. MwSt. Nachdem ein Mitarbeiter der beauftragten Fachfirma die Schächte inspiziert hatte, wurden seitens der Fachfirma zahlreiche Hinderungsgründe für eine Dichtheitsprüfung im vorgesehenen Umfang angeführt. Da zwangsläufig das unbeschichtete Gerinne und ein Teil des einmündenden, ebenfalls unsanierten Mauerwerkskanals hätten mitgeprüft werden müssen, wären Fehlinterpretationen und Umläufigkeiten wahrscheinlich, wenn die einmündenden Kanäle nicht vor Durchführung der Dichtheitsprüfung ebenfalls mindestens auf einer Länge von zwei Metern beschichtet werden. Auch seien die Steigeisen im oberen Bereich des Schachtes vor der Prüfung abzumontieren, um die Absperrblasen für die Eiprofile DN 800/1200 in den Schacht einsetzen zu können. Im Ergebnis wurde im Einvernehmen mit dem Anbieter auf die Durchführung einer Dichtheitsprüfung verzichtet.

Als **Fazit** kann festgestellt werden, dass eine Wasserdichtheitsprüfung im Schacht nicht immer zuverlässige Aussagen zum Erfolg einer Beschichtungsmaßnahme liefert. Oft stehen die Kosten nicht im Verhältnis zum Nutzen. Nur wenn auch der Sohlenbereich einschließlich Gerinne sowie die einbindenden Kanalhaltungen saniert wurden, kann eine Prüfung mit Luft- bzw. Wasserdruck in Einzelfällen zielführend sein. Grundsätzlich scheint dann eine Wasserdichtheitsprüfung gemäß ATV-M 143, Teil 6 kombiniert mit einer optischen Inspektion des oberen Schachtbereiches sinnvoll. In allen anderen Fällen bietet eine umfassende optische Inspektion zuverlässigere Informationen zur Wasserdichtheit der Schachtwandung als eine Prüfung mit Wasserinnendruck. Der Zustand einer Beschichtung sollte dann durch Inaugen-

scheinnahe des gesamten Schachtbauwerkes einschließlich Einbindungsbereichen, Gerinne und Steigeisen erfasst und fotografisch dokumentiert werden. Idealerweise sollte diese Untersuchung bei hohen Grundwasserständen durchgeführt werden, damit Fehlstellen in der Beschichtung auch durch Wassereintritt erkannt werden können.

4.3.2 Ist-Zustand der Schächte vor Sanierung

Vor der Sanierung wurde der Ist-Zustand sämtlicher Schächte detailliert aufgenommen. Zunächst wurden im Rahmen einer **optischen Inspektion** die Randbedingungen, der Allgemeinzustand sowie die kritischen Bereiche der Schächte erfasst. Anschließend wurden die **Oberflächenfeuchte** und der **Sulfat- und Carbonatgehalt** der Schachtwandung bestimmt und die **Abreißfestigkeit der Schachtwandungen** an drei Stellen ermittelt.

4.3.2.1 Optische Inspektion

Die Schächte waren zwischen 1,6 m und 6,0 m tief mit einer durchschnittlichen Tiefe von ca. 3,5 m. Sämtliche Schächte waren an Schmutz- bzw. Mischwasserkanäle angebunden. Einige der Schächte lagen in viel befahrenen Straßen mit Buslinienverkehr, so dass Arbeiten an diesen Schächten nur während weniger Stunden oder in der Nacht möglich waren. Eine Übersicht zu sämtlichen Inspektionsergebnissen geben die Tabellen 16 bis 21 in Abschnitt 4.1.2. Im Folgenden sind die wesentlichen Beobachtungen zusammengefasst.

Nahezu alle untersuchten Schächte zeigten im **unteren Bereich des Schachtkörpers** starke Schäden. So waren i.d.R. die Bereiche der Zu- und Abläufe in der Sohle des Schachtes schadhafte. Hier fanden sich vor allem Auswaschungen und Undichtigkeiten sowie Risse im Kanalrohr. Undichtigkeiten im Gerinne (auch speziell im Bereich der Zu- und Abläufe) waren ohne Absperrung des Zulaufs nicht zu erkennen (vgl. Abb. 51).

Bei insgesamt acht der untersuchten Schächte (Nr. 1, 10, 12, 29, 39, 40, 41, 42) war die Berme stark ausgewaschen und sanierungsbedürftig. Besonders betroffen waren die Schächte aus Betonfertigteilen mit dem Schadensbild Korrosion (vgl. Abb. 52). Hier war die Berme bei vier von insgesamt sechs untersuchten Schächten (Nr. 39, 40, 41, 42) sanierungsbedürftig.



Abb. 51: Undichtigkeit im Gerinne im Bereich der Einbindung des Ablaufes



Abb. 52: Sanierungsbedürftige Berme in einem Schacht aus Betonfertigteilen mit dem Schadensbild Korrosion

Bei 15 der untersuchten Schächte waren nachträglich **weitere Zuläufe in die Schachtwandung** eingebunden worden, meist durch Aufstemmen und anschließende Abdichtung mit Mörtel. Bei zwei Schächten befanden sich die Zuläufe direkt im Übergangsbereich Mauerwerk – Betonring (Nr. 17 und 24). Alle nachträglich hergestellten Zuläufe waren undicht, einige der Zuläufe aus Steinzeug hatten Risse.



Abb. 53: Nachträglich eingebundener Zulauf in einem Schacht aus Betonfertigteilen



Abb. 54: Nachträglich eingebundener Zulauf in einem Schacht aus Mauerwerk, Bodeneintrag durch fehlende Klinker in der Schachtwandung

An den **Wandungen** von insgesamt sieben **Mauerwerksschächten** (Nr. 11, 13, 24, 26, 27, 28 und 29) – darunter fünf mit Fugenkorrosion – wurden alte Mörtelausbesserungsstellen festgestellt (vgl. Abb. 55). In zwei Fällen (Schächte Nr. 26 und 27) stellte sich nach der Entfernung des Mörtels heraus, dass hier alte Zuläufe verschlossen worden waren. Die Fugen waren teilweise bis zu 3 cm tief ausgewaschen (vgl. Abb. 56). Bei zwei der Mauerwerksschächte (Nr. 9 und Nr. 38) waren einzelne Klinker aus der Schachtwandung herausgebrochen, bei einem der Schächte (Nr. 38) wurde durch eine solche Fehlstelle Boden in den Schachtkörper eingetragen (vgl. Abb. 54). Bei einem Schacht (Nr. 7) kreuzte eine Leitung den Wandungsbereich des Schachtes (vgl. Abb. 57).



Abb. 55: Mit Mörtel ausgebesserte Fehlstelle in einem Mauerwerksschacht



Abb. 56: Tief korrodierte Fugen in einem Mauerwerksschacht



*Abb. 57: Kreuzende Leitung im Wandungsbe-
reich eines Mauerwerksschachtes*

Bei den Schächten aus **Betonfertigteilen**, bei denen keine Korrosion vorlag, beschränkten sich die Schadstellen in der Wandung, abgesehen von den undichten Zuläufen, auf undichte Ringfugen bzw. aus den Ringfugen einragende Bitumendichtmasse (vgl. Abb. 58 und Abb. 59).



Abb. 58: Undichte Ringfuge in einem Schacht aus Betonfertigteilen

Abb. 59: Aus den Ringfugen einragende Bitumendichtmasse in einem Schacht aus Betonfertigteilen

Bei allen Schächten aus Betonfertigteilen mit dem Schadensbild Korrosion waren die Oberflächen der Wandungen stark porös, feucht und leicht lösbar. Nach der Reinigung der Schächte wurde bis zu 7 cm Abtrag gemessen (vgl. Abb. 60). Alle Steigeisen ohne Kunststoffversiegelung waren ebenfalls stark korrodiert (vgl. Abb. 61). Einige der Steigeisen brachen bei Auftritt ab.



Abb. 60: Starker Abtrag durch Korrosion in einem Schacht mit Mauerwerkunterteil und aufgesetzten Betonfertigteilen

Abb. 61: Starke Korrosion eines Steigeisens ohne Kunststoffversiegelung

Bei insgesamt 14 der untersuchten Mauerwerksschächte bestand der Konus aus Beton. In dem **Übergangsbereich Mauerwerk – Beton** konnten häufig Undichtigkeiten festgestellt werden. In einigen Fällen war der Übergang Mauerwerk-Beton mit einem Querschnittsprung ausgeführt (vgl. Abb. 62). Besonders in den Fällen, in denen ein runder Betonkonus auf ein rechteckiges Schachtunterteil aus Mauerwerk aufgesetzt worden war (Schächte Nr. 10 und 30),

waren mehrere waagerechte Versprünge zu erkennen, die eine Sanierung mit Beschichtungsverfahren erschweren können (vgl. Abb. 63).



Abb. 62: Übergangsbereich Mauerwerksschacht /
Konus aus Beton

Abb. 63: Übergangsbereich rechteckiger
Mauerwerksschacht / runder Konus
aus Beton mit waagerechten
Versprünge in der Schachtwan-
dung

An den durch Straßenverkehr hochbelasteten Schächten konnten keine Besonderheiten bzgl. der Schadensbilder festgestellt werden. Allerdings waren tendenziell stärkere Schmutzablagerungen an den Schachtwandungen zu erkennen.

4.3.2.2 Oberflächenfeuchte der Schachtwandung

An allen 42 Schächten wurde die Oberflächenfeuchte der Schachtwandungen nach der CM-Methode bestimmt (vgl. auch Abschnitt 4.3.1.1). Eine Übersicht über die Messergebnisse gibt Abb. 64.

Die Wandungen der Schächte aus **Betonfertigteilen ohne Korrosion** wiesen grundsätzlich vergleichsweise geringe Oberflächenfeuchten auf, mit im Mittel ca. 6,2 Masse%^[a]. Insbesondere die untersuchten **Mauerwerksschächte** zeigten demgegenüber eine Häufung hoher Einzelwerte (in 5 Fällen größer als 15 Masse%), die durchschnittliche Feuchte lag hier bei ca. 12,5 Masse%. In diesen Fällen trat z.T. Grundwasser flächig durch die Fugen des Mauerwerks ein und lief über die Schachtwandung ab (vgl. Abb. 65). In der Regel ging das Schadensbild Fugenkorrosion unmittelbar mit einer Undichtigkeit der Fugen einher.

a Der Wassergehalt in Masse% gibt das Verhältnis der im Stoff enthaltenen physikalisch gebundenen und freien Wassermasse zur Masse des trockenen Baustoffs an (vgl. Kupfer, K. u.a.: Materialfeuchtemessung, Expert-Verlag, Renningen, 1997).

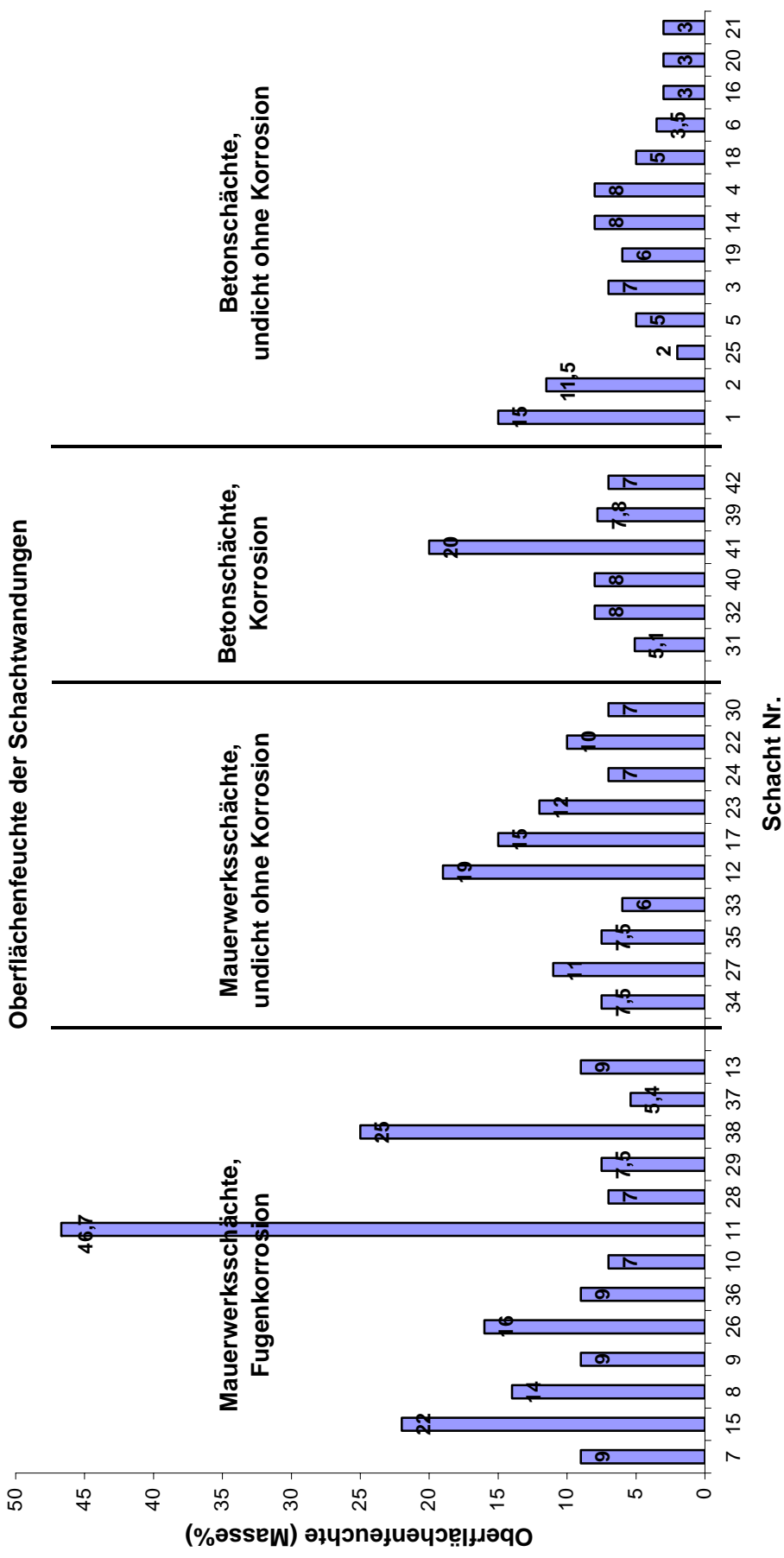


Abb. 64: Oberflächenfeuchte der Schachtwandungen bei Untersuchung des Ist-Zustandes (Messung nach CM-Methode, vgl. [84]), Schachtnummern vgl. Auflistung in Tabelle 14 bis Tabelle 20

Die Untersuchungen zur Oberflächenfeuchte fanden über das Jahr verteilt im Zeitraum von April bis November statt. Ein Zusammenhang zwischen Außentemperatur, Luftfeuchtigkeit und Oberflächenfeuchte der Schachtwandung konnte grundsätzlich nicht festgestellt werden. Grundsätzlich wiesen die Schachtwandungen im unteren Bereich der Schächte wesentlich höhere Oberflächenfeuchten auf als im oberen Bereich (vgl. Abb. 66).



Abb. 65: Flächig feuchte Wandung mit ablaufendem Wasser in einem Schacht aus Mauerwerk

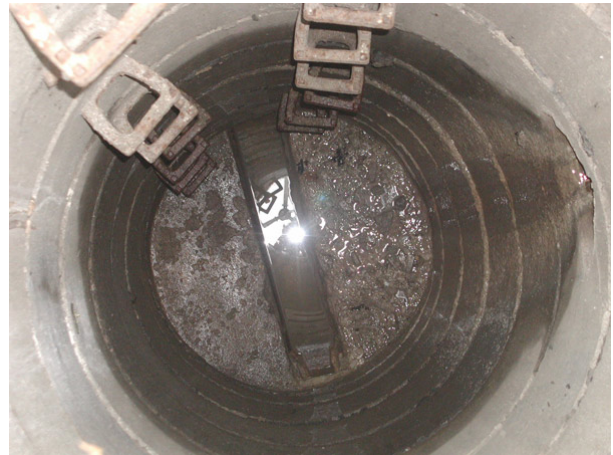


Abb. 66: Starke Feuchtigkeit im unteren Bereiche eines Schachtes aus Betonfertigteilen

4.3.2.3 Sulfat- und Carbonatgehalt der Schachtwandungen

Die Sulfat- und Carbonatgehalte der Schachtwandungen sämtlicher 42 Schächte wurden an entnommenen Bohrmehlproben mit Hilfe der nichtdispersiven Infrarotspektroskopie^a bestimmt. Eine Übersicht über die Messergebnisse geben Tabelle 28 und Tabelle 29.

Zunächst wurden die Schachtwandungen im oberen und unteren Bereich des Schachtkörpers angebohrt und das Bohrmehl mit einer Schale aufgefangen. Pro Entnahmestelle wurden jeweils drei Bohrmehlproben, der Tiefe nach gestaffelt (aus 0 - 1,5 cm Tiefe, aus 1,5 – 3,0 cm und aus 3,0 – 4,5 cm Tiefe) separat entnommen, um die Verteilung des Sulfat- bzw. Carbonatgehaltes auch über die Tiefe der Schachtwandung abschätzen zu können. Der Sulfat- und Carbonatgehalt aller Proben wurde anschließend im Baustoff-Labor der Fachhochschule Bochum (Prof. Dr.-Ing. Pfeifer) analysiert. Dabei wurde folgendermaßen vorgegangen:

- Die Bohrmehlproben wurden zunächst bei 105° C im Wärmeschrank bis zur Massekonstanz getrocknet und anschließend, soweit erforderlich, auf eine Korngröße < 0,25 mm nachgefeinert.
- An einer Teilprobe von ca. 100 mg wurden nach einem thermischen oxidativen Aufschluss bei rund 1.500° C im Hochfrequenzofen die Gehalte an Kohlenstoff- (als CO₂) und Schwefelverbindungen (als SO₃) mit Hilfe der nicht dispersiven Infrarotspektroskopie bestimmt. Als Schwefelverbindungen enthielten die Proben überwiegend Sulfate und als Kohlenstoffverbindungen überwiegend Carbonate.
- Diese Gehalte wurden anschließend auf die Masse der getrockneten Proben bezogen.

Bei einem **Sulfatangriff** (treibender Angriff) bilden die im Abwasser gelösten Sulfate zusammen mit den Aluminathydraten (C₃A) und dem Calciumhydroxid des Zementsteins sehr voluminöse Kristalle. Der dabei entstehende Kristallisationsdruck verursacht ein Treiben im Zementgestein, das u.U. zur vollständigen Zerstörung führen kann (nach [1]). Zunächst verdichten zwar die neugebildeten Kristalle die Poren, was zu einer zeitweiligen Erhöhung der Festigkeit führen kann, anschließend schreitet aber die Reaktion fort und damit die Rissbildung und Zerstörung [88]. Alkalireiche Zemente und Zemente mit hohem Eisen- und geringem C₃A – Anteil sowie ein geringer w/z-Wert erhöhen den Widerstand des Betons oder Mörtels. Unter der Annahme, dass die sulfathaltigen Ausgangsstoffe z.B. den Angaben aus [89], [90] und [91] entsprechen (Zement ca. 4 M- %, Flugasche ca. 4 M-%, Wasser ca. 2000 mg/l) liegt bereits der durchschnittliche Sulfatgehalt eines frisch erstellten Betons bei ca.

a Die nichtdispersive-Infrarotspektroskopie ist ein physikalisches Verfahren, das auf der Schwingungsanregung des CO₂-Moleküls durch Strahlung einer diskreten Wellenlänge (im Absorptionsmaximum des Meßgases) im Infrarotbereich beruht (aus: Schneider, C.: Kohlenstoffbestimmung in Wässern und Feststoffen: Von TOC/TIC bis Dieselruß- und Abgasanalyse, unter www.av.fh-koeln.de/professoren/rehorek/files/PA_Kohlenstoff_Schneider_Referat_0201.pdf vom 13.01.2005).

0,85 M-% [92]. Diese Sulfatgehalte führen zunächst nicht zu einem treibenden Angriff, da das Sulfat während der Erstarrung (Phase der Hydratation) in die Hydratphasen eingebunden wird. In der Nutzungsphase können diese Bestandteile jedoch durch eine hohe Feuchtigkeit bzw. Kontakt mit Wasser gelöst werden und ihre zerstörerische Wirkung entfalten.

Bei der **biogenen Schwefelsäurekorrosion** tritt i.d.R. ein treibender Angriff durch die Sulfationen der Schwefelsäure in Kombination mit dem lösenden chemischen Angriff der Säure auf. So dringen die Sulfationen der Schwefelsäure entlang der gelösten $\text{Ca}(\text{OH})_2$ -Bahnen in den Beton ein und zerstören den Beton weiter durch treibenden Angriff. Somit entstehen zwei Schädigungsfronten. Innerhalb der ersten Schädigungsfront, von der geschädigten Oberfläche aus gesehen, ist die Betonmatrix durch lösenden und treibenden Angriff vollständig zerstört. Für das Auge unsichtbar und nur mikroskopisch nachweisbar ist eine zweite Schädigungsfront, die tiefer verläuft. Innerhalb dieser zweiten Schicht hat die Säure die Betonmatrix lediglich durch lösenden Angriff geschädigt. Die mechanische Beständigkeit dieser Schicht ist weitgehend erhalten, da noch kein bzw. kaum schädigender Angriff stattgefunden hat (vgl. Abb. 67). [93]

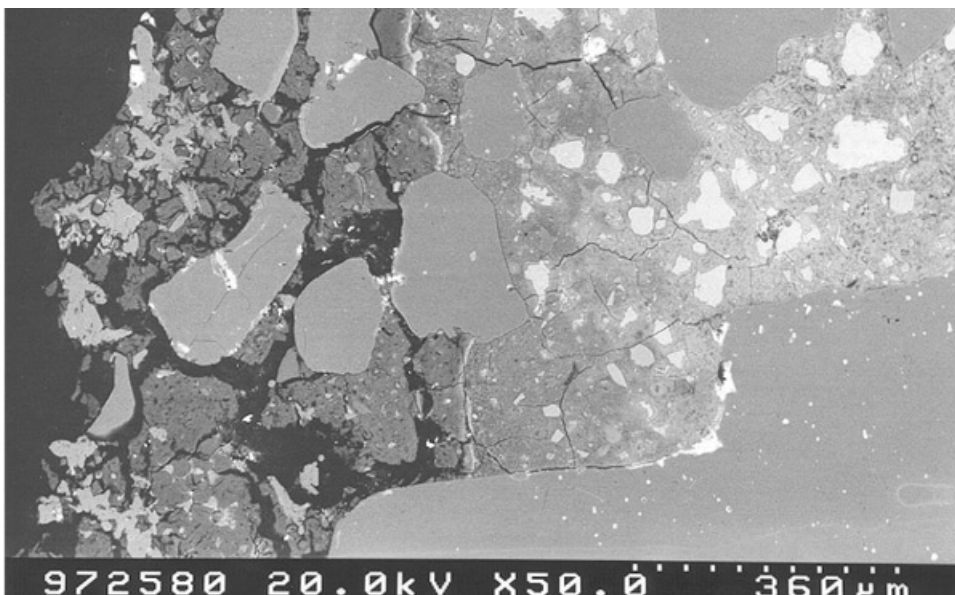


Abb. 67: Rasterelektronenmikroskopische Aufnahme einer durch biogene Säurekorrosion geschädigte Bindemittelmatrix. Der linke Bereich ist durch lösenden und treibenden Angriff vollständig zerstört. Der mittlere etwas dunklere mit Rissen durchzogene Bereich ist durch lösenden Angriff vorgeschädigt. Erst der rechte hellere Bereich der Bindemittelmatrix ohne Risse ist ungeschädigt (aus [93]).

Der chemische Vorgang der Umwandlung von Calciumhydroxid $\text{Ca}(\text{OH})_2$ zu Calciumcarbonat CaCO_3 durch das Einwirken von Kohlendioxid CO_2 wird als **Carbonatisierung** bezeichnet. In carbonatisiertem Beton ist der pH-Wert deutlich niedriger als in unbeeinflusstem Beton (pH-Wert ca. 12), er kann bereits bei normalem CO_2 -Gehalt der Luft auf etwa 9 absinken. Bei diesem pH-Wert ist die passivierende Wirkung des Betons aufgehoben und damit die Korrosion einer Bewehrung, bei gleichzeitigem Vorhandensein von Wasser und Sauerstoff, möglich

(nach [94]). In der Regel sind die Betonfertigteile im Abwasserbereich unbewehrt, so dass eine Carbonatisierung hier keine Gefahr darstellt. Eine Carbonatisierung führt andererseits zu einer Erhöhung des Widerstandes gegen chemischen Angriff, so wird z.B. der Sulfatangriff, u.A. durch eine Behinderung der Transportvorgänge im Porensystem, zeitlich verzögert [88].

In den **Mauerwerkswandungen und den Betonwandungen ohne Korrosion** der Schächte wurden in fast allen Fällen nur geringe Sulfatgehalte von weniger als einem Masse% gemessen, im Mittel lagen die Werte bei ca. 0,16 Masse% (Mauerwerk) bzw. 0,40 Masse% (Beton ohne Korrosion). Nur in einem Fall (Schacht Nr. 26, Mauerwerk) wurde ein demgegenüber erhöhter Sulfatgehalt (1,94 Masse-% oben bzw. 2,18 Masse-% unten) an der Oberfläche der Schachtwandung festgestellt. Für diese erhöhten Werte können starke Schmutzablagerungen an der Schachtwandung verantwortlich sein, deren Reste (nach Reinigung) bei der Probenahme mit dem Bohrmehl vermischt wurden (vgl. Abb. 68). Ähnliche Effekte sind auch bei scheinbar unplausiblen Schwankungen der Werte über die Tiefe zu vermuten.



Abb. 68: Starke Schmutzablagerungen an der Mauerwerkswandung des Schachtes Nr. 26



Abb. 69: Korrodierte Schachtwandung aus Beton

In den **Betonwandungen** der Schächte, bei denen eine **deutliche Korrosion** der Schachtwandung beobachtet werden konnte (Schadensbild Korrosion, vgl. Abb. 69) wurden im Mittel deutlich höhere Sulfatkonzentrationen von 1,92 Masse% mit **Spitzenwerten von bis zu 18,5 Masse%** festgestellt. Umgekehrt zeigten auch alle Schächte mit hohem Sulfatgehalt deutliche Korrosionserscheinungen. Hier war der Sulfatgehalt in allen Fällen in den oberflächennahen Schichten bis 1,5 cm Tiefe am höchsten, i.d.R. wurden in den tieferen Schichten nur noch geringere Werte von bis zu einem Masse% festgestellt. Somit hätte in den vorliegenden Fällen eine während der optischen Inspektion erkennbare Korrosion der Betonwandung auch als ausreichendes Indiz für übermäßige Sulfatgehalte im Beton gewertet werden können.

Tabelle 28: Gemessene Sulfat- und Carbonatgehalte in den Proben aus Mauerwerksschächten

	Schacht Nr.	Sulfatgehalt [Masse%]						Carbonatgehalt [Masse%]					
		oben (Entnahmetiefe in cm)			unten (Entnahmetiefe in cm)			oben (Entnahmetiefe in cm)			unten (Entnahmetiefe in cm)		
		0,0 - 1,5	1,5 - 3,0	3,0 - 4,5	0,0 - 1,5	1,5 - 3,0	3,0 - 4,5	0,0 - 1,5	1,5 - 3,0	3,0 - 4,5	0,0 - 1,5	1,5 - 3,0	3,0 - 4,5
Undicht ohne Korrosion	12	0,53*	0,53*	0,54*	0,07	0,02	0,02	3,12*	1,21*	1,19*	0,31	0,14	0,14
	17	0,56*	0,49*	0,48*	0,04	0,02	0,01	2,18*	0,89*	1,64*	0,24	0,22	0,24
	22	0,33*	0,27*	0,34*	0,10	0,05	0,04	35,11*	32,99*	32,60*	0,32	0,31	0,19
	23	0,19*	0,23*	0,27*	0,04	0,02	0,02	41,12*	36,29*	36,10*	0,34	0,17	0,19
	24	0,30*	0,27*	0,25*	0,06	0,04	0,03	1,76*	0,61*	0,35*	0,44	0,46	0,16
	27	0,02*	0,01*	0,01*	0,02	0,01	0,02	0,35*	0,11*	0,10*	0,26	0,16	0,12
	30	0,48*	0,43*	0,42*	0,02	0,03	0,03	1,49*	0,73*	0,72*	0,33	0,16	0,34
	33	0,02	0,02	0,02	0,01	0,01	0,02	0,56	0,33	0,30	0,16	0,27	0,26
	34	0,03	0,12	0,01	0,17	0,01	0,01	0,78	0,53	0,30	0,39	0,28	0,25
	35	0,02	0,02	0,02	0,02	0,01	0,01	0,23	0,29	0,36	0,36	0,19	0,20
Fugenkorrosion	7	0,62*	0,61*	0,51*	0,05	0,04	0,03	1,35*	0,50*	0,42*	0,29	0,17	0,16
	8	0,33*	0,41*	0,39*	0,03	0,02	0,03	1,50*	0,31*	0,37*	0,40	0,20	0,10
	9	0,03*	0,01*	0,01*	0,05	0,03	0,02	0,32*	0,14*	0,08*	0,47	0,35	0,09
	10	0,01*	0,01*	0,01*	0,11	0,07	0,01	0,11*	0,10*	0,06*	0,13	0,13	0,07
	11	0,01*	0,01*	0,01*	0,01	0,01	0,01	0,21*	0,27*	0,40*	0,43	0,12	0,12
	13	0,08*	0,06*	0,05*	0,03	0,01	0,01	0,14*	0,09*	0,13*	0,34	0,11	0,13
	15	0,49*	0,46*	0,58*	0,04	0,02	0,02	1,99*	0,81*	0,77*	0,31	0,14	0,22
	26	1,94	0,40	0,30	2,18	1,06	1,06	0,41	0,12	0,20	2,27	4,52	3,88
	28	0,53*	0,66*	0,53*	0,03	0,01	0,01	12,16*	3,49*	1,82*	0,25	0,19	0,18
	29	0,47*	0,51*	0,51*	0,02	0,01	0,01	1,45*	0,62*	1,05*	0,25	0,11	0,11
	36	0,08	0,03	0,04	0,07	0,03	0,04	0,42	0,17	0,20	0,21	0,09	0,12
	37	0,02	0,02	0,02	0,05	0,02	0,02	0,26	0,23	0,23	0,51	0,21	0,35
38	0,02	0,02	0,02	0,14	0,05	0,04	0,28	0,17	0,18	0,23	0,16	0,16	

Anmerkung:

* = Die dargestellten Werte wurden an den Betonoberteilen der Schächte ermittelt

Tabelle 29: Gemessene Sulfat- und Carbonatgehalte in den Proben aus Betonfertigteil-schächten

	Schacht Nr.	Sulfatgehalt [Masse%]						Carbonatgehalt [Masse%]					
		oben (Entnahmetiefe in cm)			unten (Entnahmetiefe in cm)			oben (Entnahmetiefe in cm)			unten (Entnahmetiefe in cm)		
		0,0 - 1,5	1,5 - 3,0	3,0 - 4,5	0,0 - 1,5	1,5 - 3,0	3,0 - 4,5	0,0 - 1,5	1,5 - 3,0	3,0 - 4,5	0,0 - 1,5	1,5 - 3,0	3,0 - 4,5
Undicht ohne Korrosion	1	0,31	0,32	0,33	0,57	0,43	0,35	1,29	0,66	0,82	15,17	4,78	3,17
	2	0,39	0,48	0,44	0,11	0,26	0,43	3,78	1,14	0,60	2,18	0,90	0,73
	3	0,56	0,35	0,34	0,71	0,32	0,39	2,65	0,87	3,09	4,23	3,63	1,31
	4	0,40	0,29	0,35	0,50	0,47	0,43	1,25	0,28	0,37	0,65	0,39	0,37
	5	0,34	0,39	0,38	0,48	0,36	0,41	15,39	13,91	13,96	2,27	0,28	0,39
	6	0,74	0,69	0,58	0,50	0,43	0,48	2,31	0,90	1,12	1,11	0,90	0,39
	14	0,69	0,60	0,52	0,78	0,70	0,67	1,94	0,89	0,44	1,11	0,63	0,74
	16	0,48	0,43	0,37	0,35	0,25	0,22	1,20	0,75	0,38	2,56	0,33	0,45
	18	0,25	0,27	0,30	0,32	0,33	0,38	37,13	35,11	33,34	36,56	33,55	37,57
	19	0,32	0,27	0,25	0,45	0,38	0,45	29,33	31,62	37,44	2,93	4,87	1,52
	20	0,59	0,57	0,52	0,21	0,24	0,25	18,64	16,23	19,28	39,00	28,91	33,80
Korrosion	21	0,32	0,23	0,30	0,27	0,17	0,16	1,32	0,35	0,60	2,24	0,78	0,58
	25	0,76	0,56	0,45	0,06	0,05	0,06	4,17	2,55	2,39	0,01	0,46	1,00
	31	1,74	0,34	0,31	1,30	0,52	0,30	27,35	23,92	24,94	23,06	21,15	21,71
	32	4,10	0,39	1,10	1,73	0,60	0,38	22,10	21,85	21,59	20,25	24,15	24,29
	39	1,67	0,52	0,46	0,64	0,51	0,50	2,54	1,53	1,78	1,45	1,11	1,54
	40	18,50	1,55	2,57	7,94	0,90	1,51	1,20	1,01	1,64	2,23	1,61	1,65
	41	3,34	0,50	0,77	4,45	2,99	0,79	1,32	0,80	1,38	1,55	1,13	1,90
	42	1,83	0,68	0,65	1,43	0,83	0,63	0,98	0,72	1,29	0,95	1,49	0,88

4.3.2.4 Abreißfestigkeiten der Schachtwandungen

Die Abreißfestigkeit der Schachtwandungen wurde mittels Haftzugprüfungen in Anlehnung an ZTV-SIB90 [63] bzw. DAfStb Instandsetzungs-Richtlinie [50] an jeweils drei Stellen der Schachtwandung (im oberen, mittleren und unteren Bereich des Schachtes) bestimmt (vgl. Tabelle 30 und Tabelle 31).

Grundsätzlich wurde zwischen verschiedenen Versagensformen bzw. Bruchbereichen unterschieden (vgl. Abb. 70). Bei 49 der 62 Mauerwerksprüfungen (ca. 79 %) und bei 47 der 62 Betonprüfungen (ca. 75 %) wurde auch ein **Bruch in der Klebefuge** festgestellt, mit Flächenanteilen über 25%. Der gemessene Wert stellt in diesen Fällen lediglich eine untere Schwelle dar, die tatsächliche Abreißfestigkeit des Untergrundes kann höher liegen. In zwei Fällen (Schacht Nr. 26 und Nr. 34) konnten keine Haftzugfestigkeiten gemessen werden, da sich der Prüfstempel bereits zu Beginn der Prüfung im Bereich des Klebers von der Schachtwandung löste. Entsprechend werden sowohl für Mauerwerks- als auch Betonfertigteilschächte Werte unter $0,5 \text{ N/mm}^2$ (vgl. [38] bzw. Abschnitt 6.1) nicht zur Beurteilung herangezogen, wenn die Bruchfläche zu mehr als 25% in der Klebefuge liegt (in Tabelle 30 und Tabelle 31 gelb markiert). Höhere Werte können ggf. zur Bestätigung einer ausreichenden Abreißfestigkeit dienen.

Sowohl bei den Prüfungen der Mauerwerkswandungen als auch der Betonfertigteile zeigten sich **große Schwankungen in den Untergrundfestigkeiten**. Während der höchste Wert für Mauerwerk bei $4,1 \text{ N/mm}^2$ (Schacht Nr. 23, oben) lag, löste sich in zwei weiteren Prüfungen im Schacht Nr. 11 das poröse Mauerwerk bereits bei der Bohrung von der Wandung (Abb. 70A). Bei den Prüfungen an den Schachtwandungen aus Beton lag der höchste Wert bei $4,5 \text{ N/mm}^2$ (Schacht Nr. 25, mitte) und der niedrigste Wert bei $0,2 \text{ N/mm}^2$ (Schacht Nr. 2, mitte und unten). In einigen Fällen wurde die Abreißfestigkeit in den Mauerwerksschächten auch an Betonoberteilen ermittelt. Mit einer Ausnahme lagen diese deutlich über denen des Mauerwerks.

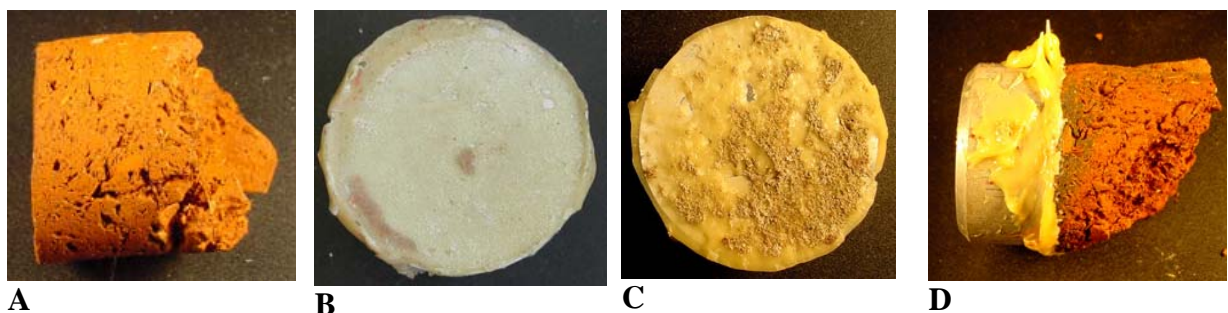


Abb. 70: Mögliche Versagensarten bei der Prüfung der Abreißfestigkeit der Schachtwandungen. **A:** Bruch bei Bohrung. **B:** Bruch in der Klebefuge. **C:** Bruch an der Schachtoberfläche. **D:** Bruch im Untergrund.

Trotz des häufigen Versagens in der Klebefuge (vgl. Abschnitt 4.3.1.2) wurden bei 33 der 62 Prüfungen auf **Mauerwerk** Festigkeiten von $\geq 0,5 \text{ N/mm}^2$ (Mindestanforderung gemäß GSTT-Informationen Nr. 18, vgl. Tabelle 7 und Tabelle 8 in Abschnitt 3.3.3.1) gemessen. Bei nur einem Schacht (Nr. 11) lag die durchschnittliche Abreißfestigkeit des Untergrundes unter diesem Wert. Hier fielen die Probekörper direkt bei der Bohrung als Vorbereitung für die Haftzugprüfung aus der Wandung, so dass die Eignung des Schachtes für eine Sanierung im Beschichtungsverfahren ohne weitere Maßnahmen grundsätzlich nicht gegeben ist. Eine Untergrundfestigkeit von $\geq 1,5 \text{ N/mm}^2$ (Angabe einiger Mörtelhersteller über die Mindestuntergrundfestigkeit vor der Beschichtung, vgl. Tabelle 8 in Abschnitt 3.3.3.1) wurde lediglich bei 10 der 62 Prüfungen auf Mauerwerk gemessen. Vor diesem Hintergrund lässt sich die Forderung einiger Mörtelhersteller nach einer messbaren Mindestuntergrundfestigkeit $\geq 1,5 \text{ N/mm}^2$ ohne besonderen Aufwand für die Untergrundvorbereitung bzw. Verbesserung der Klebertechnik offensichtlich kaum erfüllen.

Bei den **Schächten aus Betonfertigteilen ohne Korrosion** wurden bei 25 der 37 Prüfungen Untergrundfestigkeiten des unbehandelten Untergrundes von $\geq 1,5 \text{ N/mm}^2$ gemessen. Die Kriterien der maßgeblichen Richtlinien^a wurden von 9 der 13 Schächte aus Betonfertigteilen ohne Korrosion erfüllt. Zwei Schächte (Nr. 18 und Nr. 20) verfehlten die Kriterien knapp, bei einem Schacht (Nr. 4) konnte keine der Prüfungen zur Auswertung herangezogen werden. Nur in einem Schacht (Nr. 2) wurden deutlich geringere Werte gemessen. Somit scheinen hier die Anforderungen der Hersteller i.d.R. selbst ohne umfangreiche Untergrundvorbereitungsmaßnahmen erreichbar zu sein.

Fast alle in den **Schächten aus Betonfertigteilen mit Korrosion** gemessenen Untergrundfestigkeiten waren deutlich geringer als die Anforderungen der maßgeblichen Richtlinien, so dass in vergleichbaren Fällen umfangreiche Maßnahmen zur Untergrundvorbereitung stets zu empfehlen sind.

a Mindestuntergrundfestigkeiten nach Instandsetzungs-Richtlinie des DAfStb [50] bzw. ZTV-SIB90 [63]: $1,5 \text{ N/mm}^2$ mit einem kleinsten Einzelwert von $1,0 \text{ N/mm}^2$.

Tabelle 30: Abreißfestigkeiten der Schachtwandungen bei den Schächten aus Mauerwerk
(ermittelt in Anlehnung an ZTV-SIB90 bzw. DAfStb-Instandsetzungs-Richtlinie)

	Schacht Nr.	Abreißfestigkeit der Schachtwandungen			
		oberer Schachtbereich [N/mm ²]	mittlerer Schachtbereich [N/mm ²]	unterer Schachtbereich [N/mm ²]	Mittelwert ²⁾ [N/mm ²]
		Bruch in Klebefuge ¹⁾ [%]	Bruch in Klebefuge ¹⁾ [%]*	Bruch in Klebefuge ¹⁾ [%]*	
Schadensbild Korrosion	7	1,2	0,3	0,3	0,6
		0	0	20	
	8	0,9*	0,7	1,1	0,9 (0,9)
		100	40	80	
	9	2,5*	0,5	0,3	0,5 (1,5)
		100	100	100	
	10	0,4	1,0	1,6	1,3
		90	90	90	
	11	0,0	0,2	0,0	0,1
		0	0	0	
	13	0,5	2,8	1,2	1,5
		70	0	0	
	15	0,4*	0,4	1,2	0,8
		100	10	80	
26	0,3	1,9	0,0	1,9	
	100	100	100		
28	1,2*	2,3*	1,9	1,9 (1,8)	
	100	100	0		
29	0,4	0,7	2,7	1,7	
	100	100	100		
36	0,2	0,8	3,1	2,0	
	100	80	100		
37	1,6	3,5	1,2	2,1	
	100	100	100		
38	0,3	0,7	0,5	0,6	
	50	0	80		
Schadensbild: Undicht ohne Korrosion	12	1,0*	0,4	0,3	(1,0)
		100	50	90	
	17	2,0*	1,2	0,5	0,9 (1,2)
		100	70	100	
	22	2,3	1,3	0,4	1,8
		100	90	40	
	23	4,1	0,2	0,2	4,1
		100	100	100	
	24	0,4	2,2	0,2	2,2
		100	90	100	
	27	1,1	0,7	0,3	0,9
		100	70	50	
	30	3,0	0,7	0,6	1,4
		100	10	0	
33	0,2	0,1	0,2	/	
	100	100	100		
34	0,3	0,0	0,2	/	
	80	70	100		
35	0,6	1,0	0,2	0,8	
	50	40	40		

1) in den Zeilen unter den gemessenen Abreißfestigkeiten ist jeweils der prozentuale Oberflächenanteil eines Bruchs in der Klebefuge dargestellt

* die dargestellten Abreißfestigkeiten wurden an den Betonoberteilen der Mauerwerksschächte ermittelt

2) bei den kursiv dargestellten Werten in Klammern sind die Abreißfestigkeiten der Betonoberteile mit berücksichtigt geringe Werte unter 0,5 N/mm² werden nicht in die Beurteilung einbezogen, wenn die Bruchfläche zu mehr als 25% in der Klebefuge liegt

Tabelle 31: **Abreißfestigkeiten** der Schachtwandungen bei den Schächten aus **Betonfertigteilen** (ermittelt in Anlehnung an ZTV-SIB90 bzw. DAfStb-Instandsetzungs-Richtlinie)

	Schacht Nr.	Abreißfestigkeit der Schachtwandungen			
		oberer Schachtbereich [N/mm ²]	mittlerer Schachtbereich [N/mm ²]	unterer Schachtbereich [N/mm ²]	Mittelwert
		Bruch in Klebefuge ¹⁾ [%]	Bruch in Klebefuge ¹⁾ [%]*	Bruch in Klebefuge ¹⁾ [%]*	
Schadensbild Korrosion	31	0,9	0,9	1,7	1,2
		70	50	90	
	32	0,9	1,2	1,4	1,2
		10	20	80	
	39	0,9	2,1	0,7	1,2
		0	30	30	
40	0,4	0,5	0,7	0,5	
	0	0	10		
41	0,9	0,4	0,4	0,7	
	40	0	70		
42	0,7	0,7	0,7	0,7	
	50	50	50		
Schadensbild: Undicht ohne Korrosion	1	2,2	3,4	0,6	2,1
		50	80	0	
	2	1,0	0,2	0,2	0,5
		0	0	10	
	3	3,3	/	2,2	2,7
		90	/	50	
	4	0,2	0,3	0,3	/
		100	80	90	
	5	2,2	2,8	2,6	2,5
		100	100	100	
	6	1,9	1,2	2,1	1,7
		80	40	50	
	14	2,4	1,5	1,9	1,9
		90	80	90	
	16	3,5	3,7	4,2	3,8
		100	0	90	
	18	0,9	1,8	1,3	1,3
		100	90	100	
19	2,8	2,5	2,7	2,6	
	90	90	80		
20	0,8	2,3	1,6	1,6	
	100	100	90		
21	3,5	2,0	1,4	2,3	
	0	100	100		
25	4,1	4,5	/	4,3	
	0	0	/		

1) in den Zeilen unter den gemessenen Abreißfestigkeiten ist jeweils der prozentuale Oberflächenanteil eines Bruchs in der Klebefuge dargestellt

■ geringe Werte unter 0,5 N/mm² werden nicht zur Beurteilung herangezogen, wenn die Bruchfläche zu mehr als 25% in der Klebefuge liegt

4.3.2.5 Schlussfolgerungen

Im Folgenden sind die wesentlichen Beobachtungen und Schlussfolgerungen aus den Untersuchungen zur Aufnahme des Ist-Zustandes der In-situ-Schächte zusammengefasst:

- Nahezu alle Schächte zeigten im **unteren Bereich** des Schachtkörpers starke Schäden, in vielen Fällen waren die Bermen, Gerinne und Anbindungen an die abgehenden Kanäle ebenfalls sanierungsbedürftig. Wenn **Zuläufe** in die Wandungen eingebunden waren, so waren diese fast immer undicht bzw. schadhaft. Im **Übergangsbereich Mauerwerk-Beton** fanden sich häufig Undichtigkeiten und Querschnittsprünge, die eine Sanierung im Beschichtungsverfahren erschweren können.
- Insbesondere die Wandungen der **Mauerwerksschächte** waren häufig sehr **feucht**. Hier wurden bei 17 der 23 Schächte Oberflächenfeuchten von mehr als 8 Masse% gemessen und somit die Vorgaben der Polyurethanhersteller für die maximale Untergrundfeuchtigkeit überschritten.
- Eine hohe **Sulfatkonzentration** in der Schachtwandung wurde nur in den Schächten aus Betonfertigteilen gemessen, bei denen Korrosionserscheinungen (z.B. durch biogene Schwefelsäure) bereits deutlich sichtbar waren. Eine Messung des Sulfatgehaltes der Schachtwandung vor Ausführung der Beschichtung scheint daher i.d.R. für den vorliegenden Anwendungsfall nicht zwingend erforderlich.
- Trotz Schwierigkeiten bei der Aushärtung des Klebers und Prüfung am unvorbehandelten Untergrund wurden an den **Mauerwerkswandungen i.d.R. Untergrundfestigkeiten $\geq 0,5 \text{ N/mm}^2$** gemessen und die Anforderungen des maßgeblichen Sachstandberichtes [38] somit erfüllt. Nur in einem Schacht wurden deutlich geringere Werte gemessen, so dass die Eignung des Schachtes für eine Sanierung im Beschichtungsverfahren nicht gegeben zu sein scheint. Nur in Einzelfällen wurden **Untergrundfestigkeiten $\geq 1,5 \text{ N/mm}^2$** erzielt, so dass sich die Forderung einiger Beschichtungswerkstoffhersteller nach einer messbaren Mindestuntergrundfestigkeit $\geq 1,5 \text{ N/mm}^2$ ohne besonderen Aufwand für die Untergrundvorbereitung bzw. Verbesserung der Klebetechnik offensichtlich kaum erfüllen lässt.
- In den Schächten aus **Betonfertigteilen ohne Korrosion** scheinen die Anforderungen der maßgeblichen Richtlinien nach einer Untergrundfestigkeit von $\geq 1,5 \text{ N/mm}^2$ mit einem kleinsten Einzelwert von $1,0 \text{ N/mm}^2$ i.d.R. selbst ohne umfangreiche Untergrundvorbehandlungsmaßnahmen **erreichbar** zu sein.
- Die in den Schächten aus **Betonfertigteilen mit Korrosion** gemessenen Untergrundfestigkeiten waren deutlich geringer als die Anforderungen der maßgeblichen Richtlinien. Hier sind grundsätzlich umfangreiche **Untergrundvorbehandlungsmaßnahmen** zum Erreichen der notwendigen Untergrundfestigkeiten zu empfehlen.

4.3.3 Ausführung der Sanierungsarbeiten

Sämtliche Sanierungsmaßnahmen wurden vor Ort durch einen IKT-Mitarbeiter begleitet. Dabei wurden die einzelnen Arbeitsschritte insbesondere mit Blick auf die Umsetzbarkeit der Herstellervorgaben, Anforderungen an die Arbeitssicherheit und den Umgang mit schwierigen örtlichen Randbedingungen, wie z.B. eindringendes Grundwasser und tiefe Schachtbauwerke, aufgenommen. Im einzelnen betraf dies die Arbeitsschritte:

- Vorbereitende Maßnahmen
- Auftragen der Beschichtung
- Nachbehandlung

An die vor Ort tätigen Fachfirmen wurden seitens der Netzbetreiber übliche Vertragsanforderungen gestellt und lediglich Vorgaben zur Verfahrensauswahl (Material, Verfahrenstechnik) geäußert. Auf Hinweise zur Sanierungsdurchführung wurde bewusst verzichtet, um die üblichen Arbeitsprozesse, die tatsächliche Sanierungsqualität sowie mögliche Fehlerquellen und Verbesserungspotenziale wirklichkeitsgetreu erkennen zu können. Die wesentlichen Erkenntnisse sind nachfolgend dargestellt.

4.3.3.1 Vorbereitende Maßnahmen

Die Vorbereitung der Sanierungsmaßnahme umfasste grundsätzlich die Schachtreinigung mit Wasserhochdruck sowie ggf. weitere Maßnahmen zur Untergrundvorbereitung, wie Ausstemarbeiten und die Abdichtung z.B. durch Injektion, sowie die Vorbeschichtung der Schachtwandung bei groben Unebenheiten.

Schachtreinigung mit Wasserhochdruck

Bei fast allen Schächten (35 von 42 Schächte) wurde nur eine recht kurze Vorreinigung mit Wasserhochdruck vorgenommen (durchschnittliche Vorreinigungszeit: 6 min / lfd. m). Eine Rautiefe des Untergrundes von 1-2 mm, wie in [38] empfohlen, konnte allein durch die Wasserhochdruckreinigung nicht erreicht werden. In fast allen Fällen wurde nach Abschluss der Reinigungsarbeiten durch die ausführende Fachfirma keine optische Beurteilung der Schachtwandung vorgenommen, bevor mit dem Beschichtungsauftrag begonnen wurde.

Bei den **Mauerwerksschächten** waren in vielen Fällen auch nach der Wasserhochdruckreinigung noch schwarze Beläge, Glasuren^a bzw. Schmutzrückstände auf den Klinkern sichtbar (vgl. Abb. 72-C). Auch konnten die Mauerwerksfugen nur in wenigen Fällen, in denen diese

a Vgl. Empfehlung in GSTT-Informationen Nr. 18 [38]: Bei der Reinigung „sind schwarze Beläge und lose Steinköpfe restlos zu entfernen... Vorhandene glasierte Brennhäute sind zu entfernen oder zumindest aufzurauen“

bereits durch starke Korrosionsvorgänge angegriffen waren, mit einer Wasserhochdruckreinigung oberflächennah abgetragen werden^a. In den **Betonschächten** ohne Korrosion konnte durch die Wasserhochdruckreinigung ebenfalls kein sichtbares Aufräuen der Wandung erreicht werden, in keinem Fall wurde das oberflächennahe Korn > 4 mm kuppenartig freigelegt^b. In der Regel waren die Schächte aber nach Abschluss der Reinigung mit Wasserhochdruck frei von losen oder absandenden Teilen und Verschmutzungen (vgl. Abb. 72-B).

An Mauerwerks- und Betonwandungen ohne Korrosion konnten i.d.R. in den **Reinigungsergebnissen bei Einsatz der rotierender Reinigungsdüse bzw. Handlanze** (vgl. Abb. 71) keine eindeutigen Unterschiede festgestellt werden. Allerdings war ersichtlich, dass die Qualität der Reinigung mittels Handlanze stark von der Motivation des ausführenden Technikers abhing (vgl. Abb. 72-D). Bei **korrodierten Mauerwerks- und Betonschächten** war i.d.R. ein stärkerer (Fugen-) Abtrag bei Anwendung der rotierenden Reinigungsdüse zu erkennen. Beispielsweise konnte in einem Fall (Schacht Nr. 41, Betonkorrosion) trotz Vorreinigung mit Handlanze bei anschließendem Einsatz der rotierenden Reinigungsdüse noch mehr als 30 kg geschädigter Beton von der Wandung abgetragen werden (vgl. Abb. 72-E).



Abb. 71: Wasserhochdruckreinigung einer Schachtwandung. **A:** Mit Handlanze.
B: Mit rotierender Reinigungsdüse.

Bei den Schächten Nr. 3, 7, 10, 17, 31, 33 und 42 wurden **längere Reinigungszeiten** von bis zu 15 Minuten pro laufendem Meter Schacht verzeichnet. Trotzdem zeigten sich bei den Schächten Nr. 7 und 10 (beide Mauerwerk, Fugenkorrosion) nach der Reinigung noch Rückstände auf einigen Mauerwerksklinkern. Bei 6 Schächten (Nr. 14, 22, 24, 34, 35 und 40) wurde die **Schachtwandung bereits einen oder mehrere Tage vor Ausführung der Beschich-**

-
- a Vgl. Empfehlung in GSTT-Informationen Nr. 18 [38]: „Die Fugen sind wie die Steine zu reinigen. In der Regel ist es ausreichend, die Fugen maximal bis zum 2-fachen der Fugenbreite auszuräumen.“
- b Vgl. Empfehlung in GSTT-Informationen Nr. 18 [38]: „Wenn nicht anders vereinbart, ist das oberflächennahe Korn (> 4mm) kuppenartig freizulegen. Bei Einsatz von Mörteln mit großer Gesteinskörnung (> 2mm) ist eine höhere Untergrundrauhigkeit erforderlich.“

tung gereinigt. In diesen Fällen könnte sich in der Zeit bis zur Beschichtung wieder ein Schmutzfilm auf der Schachtwandung bilden, was u.U. zu einem geringeren Haftverbund zwischen Beschichtung und Untergrund führt. Eine weitere Sanierungsfirma hatte die Reinigungsarbeiten in allen Fällen (Schächte Nr. 25, 27, 28 und 29) bereits vor Eintreffen des IKT-Mitarbeiters beendet. Da sich bei der Nachuntersuchung der Schächte in einigen Fällen Schmutzrückstände zwischen Beschichtung und Untergrund zeigten (vgl. Abschnitt 4.3.4.1), ist in diesen Fällen von einer nur unvollständigen Reinigung auszugehen. Eine Sanierungsfirma verwendete zusätzlich zu der Wasserhochdruckreinigung stets ein **Reinigungsmittel**, um Fette von der Schachtwandung zu lösen (Schächte Nr. 3, 10, 11, 14, 15, 31 und 32, vgl. Abb. 72-F).



Abb. 72: Schachtreinigung mit Wasserhochdruck. **A:** Saubere Mauerwerkswandung. **B:** Saubere Betonwandung. **C:** Schwarze Beläge und Rückstände auf Mauerwerkswandungen nach Reinigung. **D:** Schmutzrückstände auf Betonwandung nach Reinigung. **E:** Abgetragener Beton nach zusätzlicher Reinigung mit rotierender Schachtreinigungsdüse. **F:** Auf die Schachtwandung aufgetragenes fettlösendes Reinigungsmittel.

Weitere Maßnahmen zur Untergrundvorbereitung

Nach Ausführung der Reinigung mit Wasserhochdruck fand i.d.R. eine weitere **mechanische Bearbeitung der Schachtwandungen** statt. Da die Tragfähigkeit der korrodierten Steigeisen bzw. Steigbügel in den 6 Schächten aus Betonfertigteilen mit dem Schadensbild Korrosion nicht mehr gesichert war (vgl. Abschnitt 4.3.2.1), wurden diese ausgebaut. In 6 weiteren Fällen wurden die Steigbügel demontiert (vgl. Abb. 73-A), um eine bessere Ausgangssituation für die Beschichtung zu erhalten (z.B. um Spritzschatten bei einem Auftrag der Beschichtung im Schleuderverfahren zu vermeiden). Die Ausbruchstellen mussten anschließend mit Reparaturmörtel ausgefüllt werden. Bei drei Schächten wurden Versprünge in der Wandung angeglichen. Bei den Schächten Nr. 7 und 9 wurden die Übergänge zwischen Betonkonus und Mauerwerk abgestemmt (vgl. Abb. 73-B) und bei Schacht Nr. 37 die Versprünge im gemauerten Konus angeglichen. Insgesamt mussten die Mauerwerkswandungen häufiger als die Wandungen aus Betonfertigteilen nach der Reinigung noch zusätzlich mechanisch bearbeitet werden. Während an den Mauerwerkswandungen oft eine flächige Bearbeitung, so z.B. bei der Entfernung von alten Mörtelausbesserungsstellen (vgl. Abb. 73-C) oder dem Ausstemmen von überstehendem Fugenmörtel, notwendig war, beschränkten sich die Arbeiten an den Betonschächten i.d.R. auf die Bearbeitung der Ringfugen (vgl. Abb. 73-D).



A



B



C



D

Abb. 73: Mechanische Bearbeitung der Schachtwänden. A: Ausbau eines Steigeisens. B: Abstemmen eines Überganges zwischen Betonkonus und Mauerwerk. C: Abstemmen von alten Mörtelreparaturstellen an einer Mauerwerkswandung. D: Abstemmen von überstehender bituminöser Dichtmasse in einem Schacht aus Betonfertigteilen.

Bei der Hälfte aller Beschichtungsmaßnahmen (21 Schächte) erfolgte eine **Abdichtung der Schachtwandung** vor allem in den unteren Bereichen der Schächte vor dem Auftragen der Beschichtung durch den Einsatz von schnellabbindenden Reparaturmörteln (sog. „Stopfmörtel“) oder Injektionen mit Harzen auf Polyurethanbasis. Bei den **Mauerwerksschächten** wurden dazu in fast allen Fällen Stopfmörtel eingesetzt. Mit den Stopfmörteln konnte i.d.R. der meist an vielen Stellen durch die Fugen des Mauerwerks dringende Wasserzufluss schnell und ohne größeren Aufwand abgestellt werden (vgl. Abb. 74-A). Allerdings war bei drei Mauerwerksschächten (Nr. 8, 23 und 30) eine Abdichtung der undichten Bereiche mit einem Stopfmörtel nicht möglich, da ein zu hoher Wasserdruck hinter der Wandung anstand und der Mörtel immer wieder vor der Aushärtung aus den Fugen gedrückt wurde (vgl. Abb. 74-C). Daher wurde in diesen Fällen in die Schachtwandungen injiziert. Die Abdichtung mittels Injektion war an den Mauerwerksschächten grundsätzlich recht aufwändig, da meist mehrere sog. Injektionspacker über eine größere Fläche verteilt in die Wandung eingebracht werden mussten, um sämtliche undichten Stellen abzudichten (vgl. Abb. 74-B). Bei den **Betonschächten** wurden vorrangig Injektionen zur Abdichtung eingesetzt. Hier kamen nur bei zwei korrodierten Schächten (Nr. 39 und 42) Stopfmörtel zum Einsatz (vgl. Abb. 74-D). Die undichten Stellen lagen bis auf wenige Ausnahmen in den Ringfugen zwischen den einzelnen Fertigteilelementen. Hier reichte i.d.R. ein einziger Injektionspacker pro Schachtring aus, um die angrenzenden Ringfugen abzudichten (vgl. Abb. 74-E/F).

Eine optische **Inspektion der kompletten Schachtwandung nach Abschluss aller Arbeiten zur Untergrundvorbereitung** wurde durch die ausführende Fachfirma nur in einem Fall (Schacht Nr. 42) durchgeführt.



Abb. 74: Abdichtung der Schachtwandungen vor den Beschichtungen. **A:** Abdichtung einer Mauerwerkswandung mit Stopfmörtel. **B:** Abdichtung einer Mauerwerkswandung mit Injektionen. **C:** Hoher Wasserdruck hinter der Schachtwandung. **D:** Abdichtung eines Betonschachtes mit Stopfmörtel im Bereich einer Ringfuge. **E:** Injektion hinter eine Schachtwandung aus Beton. **F:** Durch undichte Stellen in einer Ringfuge eines Betonschachtes eintretendes Injektionsmaterial.

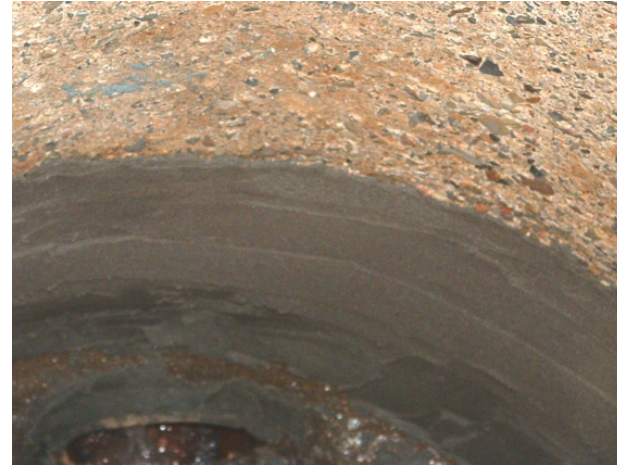
Vorbeschichtung der Schachtwandung

Nach Abschluss der Untergrundvorbereitungen wurden die Schachtwandungen von 15 Schächten flächig vorbeschichtet. Dazu kamen Mörtelprodukte zum Einsatz, die von Hand auf die Wandung aufgebracht wurden. Die Oberflächen sämtlicher Vorbeschichtungen wurden nach dem Auftrag mit einer Kelle oder einem Quast behandelt, so dass in allen Fällen eine glatte Oberfläche vorlag (vgl. Abb. 75-D). Vor dem Auftragen der **Mörtelbeschichtungen** war eine Vorbeschichtung vor allem bei Einsatz des Anschleuderverfahrens in Mauerwerksschächten mit starker Fugenkorrosion notwendig, um die Fugen ausreichend verfüllen zu können. Hier wurden die Schächte in allen Fällen (Schächte Nr. 8, 9, 28, 29 und 38) komplett vorbeschichtet, wobei der Mörtel flächig aufgetragen und dabei mit einer Kelle in die Fugen gedrückt wurde (vgl. Abb. 75-A). Auch vor dem Auftragen der **Polyurethanbeschichtungen** wurden die Mauerwerksschächte mit starker Fugenkorrosion in fast allen Fällen flächig mit Mörtel vorbeschichtet, um einen durchgängigen Untergrund für die dünne Polyurethanbeschichtung gewährleisten zu können (Schächte Nr. 13, 36 und 37). Die zwei Betonschächte mit dem Schadensbild Korrosion (Nr. 39 und 42) wurden zunächst mit nur bedingt für sehr aggressive Abwässer geeigneten Mörteln vorbeschichtet, um eine glatte Oberfläche für den Polyurethanauftrag zu erhalten (vgl. Abb. 75-B). Um einen ausreichend trockenen Untergrund sicherzustellen, wurden auch die Wandungen von zwei undichten Mauerwerksschächten ohne stärkere Fugenkorrosion komplett mit Mörtel vorbeschichtet (Schächte Nr. 12 und 22). Drei der fünf Betonschächte, bei denen keine Korrosion vorlag (Schächte Nr. 5, 6 und 16), wurden vor dem Polyurethanauftrag mit einem stark verdünnten Mörtel bestrichen, um laut Aussage der Fachfirmen einen besseren Haftverbund zum Untergrund herzustellen.

Drei Betonschächte mit starker Schwefelsäurekorrosion (Nr. 31, 32 und 41) wurden zunächst mit Mörtelprodukten, die nur bedingt für sehr aggressive Abwässer einzusetzen sind, großflächig vorbeschichtet, bevor ein hochwiderstandsfähiger Beschichtungsmörtel aufgebracht wurde. Bei einem Schacht (Nr. 37) wurde für die flächige Vorbeschichtung ein Blitz-Zement-Reparaturmörtel mit einer Aushärtezeit von nur 5 min verwendet.



A



B



C



D

*Abb. 75: Vorbeschichtung der Schachtwänden mit mineralischen Mörteln. **A:** Vorbeschichtung einer Mauerwerkswandung mit starker Fugenkorrosion. **B:** Vorbeschichtung einer korrodierten Betonwandung. **C:** Glätten der Oberfläche einer Vorbeschichtung. **D:** Komplett vorbeschichteter Mauerwerksschacht.*

4.3.3.2 Auftragen der Beschichtung

Beschichtung mit mineralischem Mörtel

Bei sämtlichen Mörtelbeschichtungen wurde der **Mörtel nach Augenmaß angemischt**. Die zugegebenen Flüssigkeitsmengen wurden in keinem Fall exakt abgemessen, vielmehr orientierte sich das Personal der ausführenden Fachfirmen an eigenen Erfahrungen mit der Mörtelkonsistenz. Trotzdem konnte bei den einzelnen Mischungen eine recht gleichbleibende Frischmörtelkonsistenz erreicht werden, die Messungen des Ausbreitmaßes gemäß DIN 18555 [69] ergaben maximale prozentuale Abweichungen von ca. 23 % (Ergebnisübersicht vgl. Tabelle 32). Die größten Schwankungen zwischen den Konsistenzen der einzelnen Mörtelmischungen ergaben sich bei den Beschichtungen im Anschleuderverfahren, bei denen der Mörtel in einem Zwangsmischer (vgl. Abb. 76) und nicht mit einem Handrührgerät (vgl. Abb. 77) gemischt wurde. Hier bestand zwar nach Aussage des Fachpersonals grundsätzlich die Möglichkeit, das Mischungsverhältnis exakt einzustellen, in fast allen Fällen wurde aber das Wasser nach Erfahrungswerten und in Abhängigkeit der Baustellenbedingungen zugegeben. Viele der Mörtelmischungen (Schächte Nr. 4, 8, 9, 27, 28, 29, 34, 35, 38, 41) waren **zu steif** angemischt^a. In zwei Fällen (Schacht Nr. 14 und 19) war der Mörtel zunächst **zu flüssig** angemischt worden, so dass die Beschichtung direkt nach Auftrag von der Wandung glitt. In zwei Fällen (Schacht Nr. 14, 15) wurde beobachtet, dass bereits leicht erhärteter **Mörtel erneut mit Wasser aufgemischt** wurde. Eine Sanierungsfirma gab zu allen Mörtelmischungen **Mischöl** (KPM Mischöl LP, Grace Bauprodukte GmbH Lügde, ca. 30 ml pro kg Mörtel) hinzu, um laut Aussage des Personals den Mörtel besser verarbeitbar für den händischen Auftrag zu machen (Schächte Nr. 3, 11, 14, 15).

a Vgl. Empfehlung in GSTT-Informationen Nr. 18, [38]: Ausbreitmaß eines Beschichtungsmörtels sollte bei Prüfung gemäß DIN 18555 zwischen 14 und 20 cm betragen



Abb. 76: Zwangsmischgerät für das Anmischen von mineralischem Mörtel



Abb. 77: Anmischen des Mörtels mit einem Handrührgerät

Tabelle 32: Ergebnisübersicht über die Messungen der Frischmörtelkonsistenz gemäß DIN 18555 [69]

Ausbreitmaß										
	Schacht Nr.	Ausbreitmaß Mischung 1 [cm]			Ausbreitmaß Mischung 2 [cm]			Gesamt-Durchschnitt Ausbreitmaß [cm]	Abweichung Mischung 1 und 2	
		a ₁	a ₂	Durchschnitt	a ₁	a ₂	Durchschnitt		[cm]	%
Auftrag von Hand	1	15,0	16,0	15,5	18,5	18,5	18,5	17,0	3,0	17,6
	7	15,0	15,0	15,0	14,5	15,5	15,0	15,0	0,0	0,0
	17	17,5	17,5	17,5	17,5	18,0	17,8	17,6	0,3	1,4
	19	18,0	17,5	17,8	18,5	17,5	18,0	17,9	0,3	1,4
	31	16,0	16,5	16,3	\	\	\	16,3	\	\
	32	14,0	14,5	14,3	\	\	\	14,3	\	\
	34	15,0	15,5	15,3	12,5	13,0	12,8	14,0	2,5	17,9
	40	18,3	18,0	18,2	18,0	18,3	18,2	18,2	0,0	0,0
Anschleuderverfahren	2	15,0	15,0	15,0	16,0	17,0	16,5	15,8	1,5	9,5
	4	12,0	12,0	12,0	14,0	14,5	14,3	13,1	2,3	17,1
	8	13,5	13,5	13,5	15,0	14,5	14,8	14,1	1,3	8,8
	9	12,0	12,0	12,0	13,0	13,5	13,3	12,6	1,3	9,9
	18	16,5	16,5	16,5	16,0	16,5	16,3	16,4	0,3	1,5
	23	16,0	17,0	16,5	16,5	16,0	16,3	16,4	0,3	1,5
	27	13,5	12,5	13,0	\	\	\	13,0	\	\
	28	12,0	12,5	12,3	\	\	\	12,3	\	\
	29	13,0	12,5	12,8	\	\	\	12,8	\	\
	35	11,0	11,5	11,3	14,0	14,5	14,3	12,8	3,0	23,5
	38	11,5	12,0	11,8	\	\	\	11,8	\	\
41	13,5	14,0	13,8	17,0	16,0	16,5	15,1	2,8	18,2	

\ = Ausbreitmaß wurde nicht gemessen

Für die Beschichtung eines korrodierten Betonschachtes (Nr. 40) wurde ein für diese Anwendung **nicht empfohlener, schnell abbindender Vergussmörtel** in Kombination mit einer Dichtschlämme angewendet.

Bei der Beschichtung von 6 Schächten lag die Lufttemperatur, auch im oberen Bereich des Schachtes, außerhalb des in [50] empfohlenen Bereiches von 5 – 30° C. Bei den Schächten Nr. 27 und 28 wurde eine **Temperatur unter 5° C** und bei den Schächten Nr. 1, 2, 4 und 14 eine **Temperatur über 30° C** gemessen (vgl. Abb. 78). Bei der Beschichtung des Schachtes Nr. 14 im Nassspritzverfahren verstopfte mehrfach der Schlauch, in dem der Mörtel zur Düse transportiert wurde.



A



B

Abb. 78: Unterschiedliche Klimabedingungen bei Mörtelbeschichtungsmaßnahmen.

A: Beschichtung im Winter bei Temperaturen unter 5° C. **B:** Beschichtung im Sommer bei Temperaturen über 30° C.

In den Fällen, in denen eine flächige Vorbeschichtung auf die Schachtwandung aufgebracht worden war, wurden die **Vorbeschichtungen** zwar kurz vor dem Auftrag der Hauptbeschichtungen befeuchtet, allerdings **in keinem Fall angeraut**^{a,b}. In 9 Fällen (Schächte Nr. 2, 8, 9, 25, 27, 28, 29, 31, 32) wurde die **Beschichtung erst einen oder sogar mehrere Tage nach Aufbringung der Vorbeschichtung aufgetragen**. Bei den Schächten Nr. 2, 8 und 9 war die Vorbeschichtung durch eine andere Fachfirma ausgeführt worden. Auf der Vorbeschichtung in den betonkorrodierten Schächten Nr. 31 und 32 zeigten sich vor Auftrag der Hauptbeschichtung deutliche **grün-schwarze Verfärbungen**, die durch die Reinigung mit Wasserhochdruck nicht komplett entfernt werden konnten (vgl. Abb. 79).

-
- a Vgl. Empfehlung in GSTT-Informationen Nr. 18 [38]: „Werden Beschichtungen oder Reprofilierungen schichtweise aufgetragen, gelten ähnliche Anforderungen (*Anmerkung: wie bei der Vorbereitung der Schachtwandung*) mit Ausnahme der Festigkeit. Der Untergrund sollte feucht sein.“
- b Vgl. Herstellerangaben [52]: „Bei mehrschichtigem Auftrag des Mörtels sollte die zuletzt aufgetragene Schicht für den nachfolgenden Auftrag angeraut werden.“

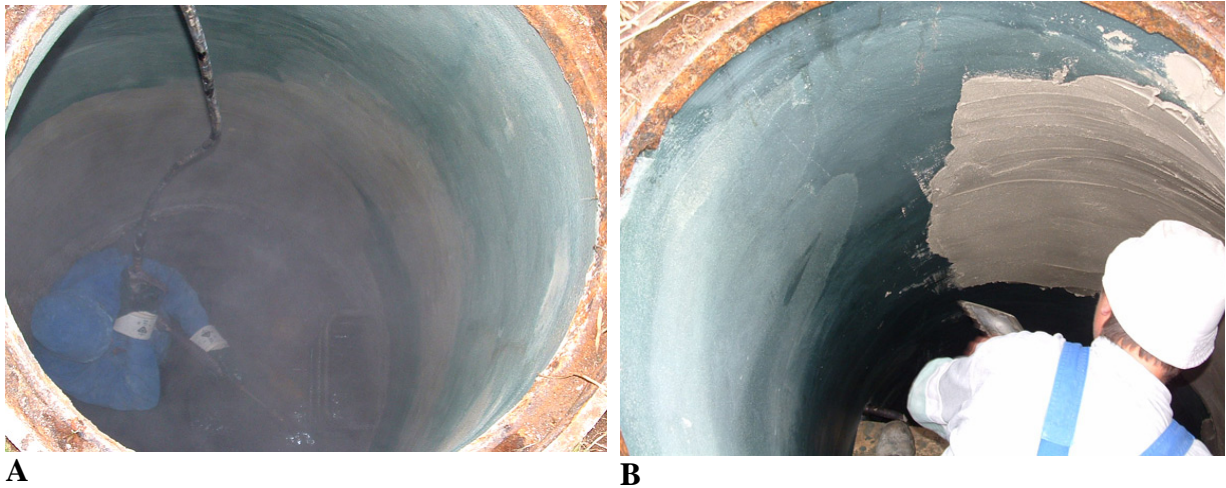


Abb. 79: Grün-schwarze Verfärbungen der Vorbeschichtung in einem Schacht aus Betonfertigteilen mit dem Schadensbild Korrosion. **A:** Reinigung der Vorbeschichtung. **B:** Auftragen der Beschichtung auf die Vorbeschichtung.

Bei der **Beschichtung im Anschleuderverfahren** bildeten sich Spritzschatten neben den Steigeisen bzw. -bügeln (vgl. Abb. 80). In einem Fall verrutschte das Zugseil häufig auf der Zugspindel während des Auf- und Abfahrens des Schleuderkopfes. Dadurch wurde der Mörtel unregelmäßig auf die Schachtwandung aufgeschleudert und es ergab sich eine wellenartige Oberflächenstruktur, die von der ausführenden Fachfirma im Anschluss nicht beseitigt wurde (vgl. Abb. 81).

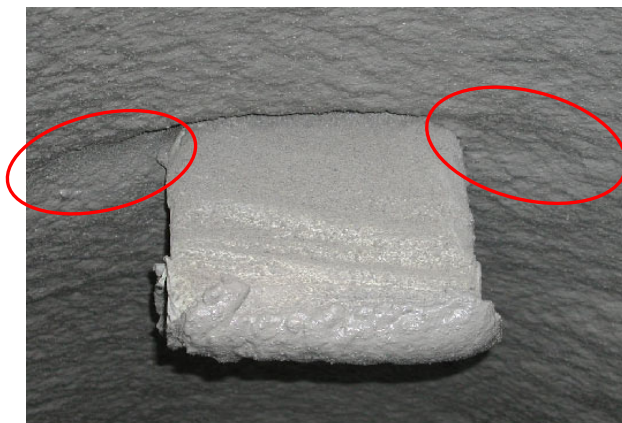


Abb. 80: Spitzschattenbildung neben einem Steigeisen bei einer Mörtelbeschichtung im Anschleuderverfahren



Abb. 81: Wellenartige Oberflächenstruktur einer Mörtelbeschichtung durch mehrfaches Abrutschen des Zugseils während des Anschleudervorgangs

Bei der **Beschichtung im Nassspritzverfahren** wurde in beiden Fällen (Schacht Nr. 14 und 15) die Düse lediglich in einem Abstand von ca. 10 – 20 cm zur Wandung geführt (vgl. Abb. 82, vgl. Empfehlung für Spritzbeton in [53]). Abweichend von den Empfehlungen in [52] wurden die Oberflächen jeder Schichtlage vor Auftrag der nächsten Schicht mit einer Kelle geglättet (vgl. Abb. 83).



Abb. 82: Aufspritzen des Mörtels in einem Abstand von ca. 10 cm von der Schachtwandung



Abb. 83: Glätten einer Schichtlage bei einer Mörtelbeschichtung im Nassspritzverfahren

Beschichtung mit Polyurethan

13 der 16 mit Polyurethan beschichteten Schächte wurden vor dem Auftrag der Beschichtung mit einem Heißluftgebläse getrocknet (vgl. Abb. 84), um den **Feuchtigkeitsgehalt des Untergrundes** zu verringern. Trotzdem lag der Feuchtegehalt des Untergrundes kurz vor Auftrag der Beschichtung bei 7 Schächten (Nr. 20, 22, 30, 36, 37, 39 und 42) höher als 6 Masse%^a, in einem Fall in Teilbereichen sogar bei 13 Masse% (Schacht Nr. 30). Die **Trocknung** mit einem Heißluftgebläse wurde auch in 6 Schächten angewendet, die einen bis mehrere Tage vorher großflächig mit Mörtelprodukten vorbeschichtet worden waren (Schächte Nr. 22, 26, 36, 37, 39 und 42). Da sich die Mörtelvorbeschichtungen noch im Aushärteprozess befanden, ist eine **negative Beeinflussung der Endfestigkeit bzw. des Verbundes zum Untergrund** in diesen Fällen sehr wahrscheinlich.

Bei der Beschichtung der Schächte Nr. 13 und Nr. 30 regnete es bzw. war die Luftfeuchtigkeit mit mehr als 80 % rel. Feuchte sehr hoch^b (vgl. Abb. 85). In einem Fall (Schacht Nr. 36) lag der **Taupunkt**^c bei der Beschichtung mit Polyurethan entgegen den Empfehlungen in [50] bzw. [55] unter 3 K.

a Vgl. Herstellerangaben [55]: Untergrundfeuchte sollte weniger als 6 Masse% betragen.

b Vgl. Instandsetzungs-Richtlinie des DAfStb [50]: Kein Regen oder Nebelnässen bei der Beschichtung mit kunststoffgebundenen Stoffen.

c Die Taupunkttemperatur ist die Temperatur, bei der die Luft bei einem gleichbleibenden Luftdruck mit Wasserdampf gesättigt ist. Der herrschende Wasserdampfpartialdruck ist dann gleich dem Wasserdampf-sättigungsdruck. Die Differenz zwischen der Temperatur und der Taupunkttemperatur der feuchten Luft wird als **Taupunkt** bezeichnet.



Abb. 84: Trocknung eines Schachtes mit einem Heißluftgebläse im Vorfeld des Beschichtungsauftrages



Abb. 85: Regenwetter während des Beschichtungsauftrages mit Polyurethan

Der Befüllungsgrad der Behälter für die beiden Rohstoffkomponenten war vor Beginn der Beschichtung des Schachtes Nr. 37 nicht kontrolliert worden. Während des Beschichtungsvorganges wurde die **Stamm-Komponente (Komponente A) vollständig verbraucht**, so dass der Behälter nachgefüllt werden musste (vgl. Abb. 88). Ein Abweichen von dem erforderlichen Mischungsverhältnis (Komponente A / Komponente B = 100 / 34) kurz vor bzw. direkt nach der vollständigen Entleerung des Behälters ist in diesem Fall sehr wahrscheinlich.

Bei einem **Beschichtungsauftrag im Sprüh-Schleuderverfahren** bildeten sich Spritzschatten neben den Steigeisen bzw. Einbindungen (vgl. Abb. 86). Daher wurden die Bereiche um die Steigeisen und Einbindungen i.d.R. im Vorfeld im Anspritzverfahren mit Polyurethan vorbeschichtet (vgl. Abb. 87). Um einen durchgängigen Materialauftrag auch im unteren Schachtteil und den Schachthälsen der Schächte zu gewährleisten, kam das Anspritzverfahren auch in diesen Bereichen vor dem eigentlichen Beschichtungsauftrag im Sprüh-Schleuderverfahren zum Einsatz.



Abb. 86: Spritzschattenbildung neben einem Steigeisen bei einer Polyurethanbeschichtung im Sprüh- Schleuderverfahren



Abb. 87: Polyurethanauftrag im Anspritzverfahren im Bereich der Steigeisen vor der Beschichtung im Sprüh- Schleuderverfahren



Abb. 88: Nachfüllen der Stamm-Komponente bei der Beschichtung eines Schachtes

4.3.3.3 Nachbehandlung

Nachbehandlung der Mörtelbeschichtungen

In fast allen Fällen wurden **keine ausreichenden Nachbehandlungsmaßnahmen** an den Mörtelbeschichtungen durchgeführt^{a,b}. Bereits während des Beschichtungsauftrages, der bis zu 6 Stunden dauerte, wurde nicht darauf geachtet, die Beschichtung feucht zu halten^c, teilweise war die Beschichtung im Konusbereich über mehrere Stunden direkter Sonneneinstrahlung ausgesetzt (vgl. Abb. 89)^d. Bei einigen Schächten (Nr. 1, 7, 17 und 19) wurde die Mörtelbeschichtung nach Abschluss der Beschichtung **mit einem Quast oder Schwamm einmalig befeuchtet** (vgl. Abb. 90). Weitergehende Nachbehandlungsmaßnahmen wurden nur an drei Mörtelbeschichtungen angewendet. So wurde nach Abschluss der Beschichtungsmaßnahme eine **Folie** unter den Deckel des Schachtes Nr. 3 gelegt, um einen trocknungsbegünstigenden Luftzug im Schachtkörper zu unterbinden (vgl. Abb. 91). Nur bei zwei Schächten (Nr. 31 und 32) wurde auf die Mörtelbeschichtung nach Abschluss des Auftrags ein **Nachbehandlungsmittel**^e zum Schutz gegen eine zu schnelle Austrocknung des Mörtels aufgetragen (vgl. Abb. 92).

-
- a Vgl. GSTT-Informationen Nr. 18 [38]: Gerade in der Anfangsphase der Hydratation sollte einem möglichen Wasserverlust durch Verdunstung (z.B. durch Auflegen wasserspeichernder Abdeckungen wie z.B. nasse Jute, ggf. in Kombination mit Folie, Abdecken mit Folien, die ausreichend Wasser dampfdiffusion besitzen, Auftragen von Nachbehandlungsfilmen, z.B. auf Wachsbasis, Aufrechterhalten eines sichtbaren Wasserfilmes auf der Oberfläche durch Besprühen mit Wasser) begegnet werden. Der Festigkeitsabbau und die Dauerhaftigkeit, insbesondere im oberflächennahen Bereich, dürfen nicht beeinträchtigt werden.
- b Vgl. Zusätzliche Technische Vertragsbedingungen und Richtlinien für Schutz und Instandsetzung von Betonbauteilen (ZTV-SIB 90) [63]: Die Nachbehandlung ist nach Art und Dauer entsprechend den Angaben des Stoffherstellers in den Ausführungsanweisungen unter Beachtung der jeweiligen Umgebungstemperaturen, jedoch **mindestens 5 Tage**, durchzuführen.
- c Vgl. GSTT-Informationen Nr. 18 [38]: „Während des gesamten Arbeitsfortschrittes – und nicht erst zum Abschluss der Arbeiten – müssen die instandgesetzten Flächen feucht bleiben.“
- d Vgl. Instandsetzungs-Richtlinie des DAfStb [50]: „Austrocknung durch Sonneneinstrahlung muss verhindert werden.“
- e Pieri[®] Curing TC (früher Tricuring) der Firma Judd-Baustoffe, CH-9015 St. Gallen. „Aufgespritztes Tricuring bildet nach dem Trocknen einen transparenten Film, der das Austrocknen der Beton- oder Mörteloberfläche stark verringert. Dadurch bleibt das für die Hydratation des Zementes erforderliche Wasser erhalten und es wird eine ausreichende Erhärtung der oberflächennahen Bereiche des Bauteile erzielt... Tricuring wird auf die mattfeuchte Oberfläche des grünen oder jungen Betons oder Mörtels aufgespritzt.“ [Technisches Merkblatt Pieri[®] Curing TC]



Abb. 89: Sonnenbestrahlung der Mörtelbeschichtung im Konusbereich eines Schachtes



Abb. 90: Befeuchten der Mörtelbeschichtung nach Auftrag

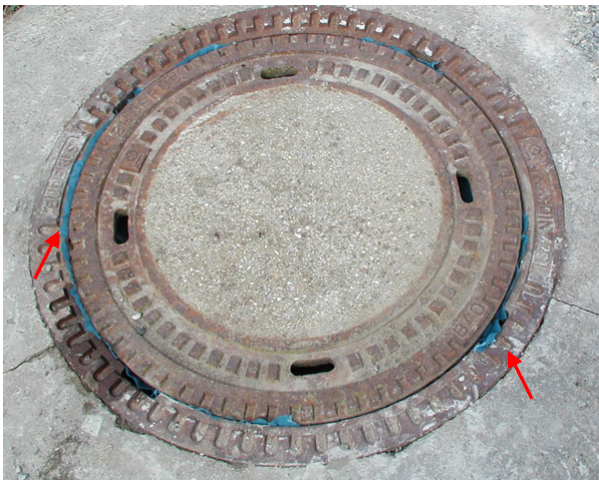


Abb. 91: Verschließen des Schachtdeckels mit einer Folie zur Verringerung der Zugluft



Abb. 92: Aufspritzen eines Nachbehandlungsmittels auf eine Mörtelbeschichtung

Nachbehandlung der Polyurethanbeschichtungen

Bei Polyurethanbeschichtungen sind umfangreiche Nachbehandlungsmaßnahmen nicht erforderlich (vgl. [50], [55]). Laut Herstellerangaben müssen entstandene Blasen entfernt und nach Klärung der Ursache erneut verschlossen werden (vgl. [55]). In fast allen Fällen wurde die **Beschichtung** nach Abschluss des Beschichtungsauftrags von den ausführenden Fachfirmen **nur sehr oberflächlich kontrolliert**. Nur in einem Fall (Schacht Nr. 42) wurde die Beschichtung intensiv inspiziert, überstehendes Material abgeschnitten und einzelne Bereiche, bei denen Hohlstellen vermutet wurden, aufgeschnitten und diese neu beschichtet (vgl. Abb. 93).

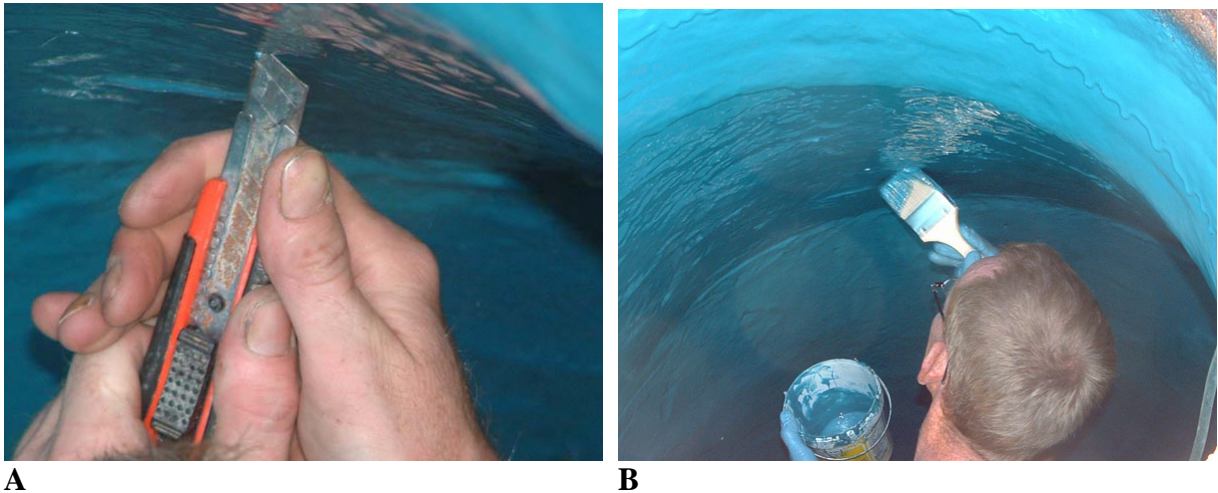


Abb. 93: Nachbehandlung einer Polyurethanbeschichtung. **A:** Aufschneiden der Beschichtung im Bereich einer Hohlstelle, **B:** Händische Neubeschichtung nach Entfernung einer Hohlstelle.

4.3.3.4 Schlussfolgerungen

Im Folgenden sind die **wesentlichen Beobachtungen und Schlussfolgerungen** aus der Begleitung der Sanierungsmaßnahmen zusammengefasst.

- Bei fast allen Schächten wurde die Schachtwandung durch die Fachfirmen nur recht kurz vorgereinigt, in vielen Fällen fanden sich nach Abschluss der Reinigungsarbeiten noch **Schmutzrückstände in Teilbereichen** der Wandung. Eine abschließende Kontrolle der Schachtwandung vor dem Auftrag der Beschichtung wurde durch die Fachfirmen nur in wenigen Fällen durchgeführt.
- Eine **Reinigung mit Wasserhochdruck** scheint weder in Mauerwerks- noch in Betonschächten ausreichend zu sein, um eine ausreichende Rautiefe (vgl. [38]) für eine Mörtelbeschichtung zu erzielen. In **Mauerwerksschächten** konnten die Fugen allein mittels der Wasserhochdruckreinigung in vielen Fällen nicht in ausreichender Tiefe ausgeräumt und **schwarze Beläge und Glasuren** nicht von den Mauerwerksziegeln entfernt werden.
- Das Reinigungsergebnis bei einer Reinigung mit Wasserhochdruck unter Verwendung einer **Handlanze** scheint stark von der ausführenden Person abhängig zu sein. Demgegenüber können mit einer **rotierenden Reinigungsdüse** gleichmäßigere Reinigungsergebnisse erzielt werden. Lediglich bei korrodierten Betonschächten zeigte die rotierende Reinigungsdüse einen offensichtlich stärkeren Abtrag als bei der Reinigung mit Handlanze.
- In **Mauerwerksschächten und Schächten aus Betonfertigteilen mit Korrosion** ist i.d.R. eine umfangreiche **mechanische Bearbeitung des Untergrundes** vor Auftrag der Beschichtung **erforderlich**. In Schächten aus Betonfertigteilen ohne Korrosion beschränken sich die vorbereitenden Arbeiten i.d.R. auf die Ringfugen.
- Vor der Beschichtung ist **in vielen Fällen eine Abdichtung der Schachtwandung erforderlich**. In Schächten aus Betonfertigteilen können i.d.R. mit Injektionen (z.B. mit Polyurethanharzen) gute Ergebnisse erzielt werden. Die Abdichtung mittels Injektionen ist in den Mauerwerksschächten aufwändiger. Falls kein stark drückendes Grundwasser ansteht, sind hier besonders schnellabbindende Reparaturmörtel geeignet.
- In **Mauerwerksschächten** mit Fugenkorrosion sind vor einem maschinellen Beschichtungsauftrag (Mörtel und Polyurethan) i.d.R. **flächige Vorbeschichtungen** mit mineralischem Mörtel notwendig.
- In **Mauerwerksschächten ohne Korrosion** ist vor Auftrag einer **Polyurethanbeschichtung** eine **Trocknung des Schachtes** mit einem Heißluftgebläse notwendig. Allerdings wurde der laut Herstellerangaben zulässige Wert für die maximale Untergrundfeuchte (6 Masse%) trotz dieser Trocknungsmaßnahmen in sieben Fällen überschritten. In **korrodierten Mauerwerksschächten** wurde in Einzelfällen ebenfalls ein Heißluftgebläse eingesetzt, dann allerdings erst nach Aufbringen der Vorbeschichtung.

Hier besteht das Risiko einer Beeinträchtigung der **Aushärtung der Vorbeschichtung**.

- Sowohl bei der Mörtelbeschichtung im Anschleuderverfahren als auch bei der Polyurethanbeschichtung im Sprüh-Schleuderverfahren bilden sich **Spritzschatten** an den Steigbügeln bzw. Steigeisen. Diese Bereiche müssen somit zusätzlich von Hand sorgfältig vorbereitet oder nachbearbeitet werden.
- Bei sämtlichen Mörtelbeschichtungen wurde, trotz **Anmischung des Mörtels nach Augenmaß**, eine gleichbleibende Frischmörtelkonsistenz hergestellt. Allerdings wurden in zahlreichen Fällen die Herstellervorgaben bzw. allgemeinen Anforderungen an das Ausbreitmaß nicht eingehalten.
- Bei fast allen **Mörtelbeschichtungsmaßnahmen** wurden nahezu keine bzw. nur **unzureichende Nachbehandlungsmaßnahmen** ergriffen. Bereits während des Beschichtungsauftrages wurden die einzelnen, bereits angetrockneten Schichten vor dem Auftrag einer neuen Schicht nicht angeraut und die Mörtelbeschichtung nicht feucht gehalten. Bei einigen Beschichtungsmaßnahmen war die Mörtelbeschichtung vor allem im Konusbereich einer direkten Sonnenbestrahlung ausgesetzt.
- Bei **Polyurethanbeschichtungen** scheinen umfangreiche Nachbehandlungsmaßnahmen nicht erforderlich zu sein. Allerdings sollte eine **detailliertere optische Kontrolle** nach Auftrag der Beschichtung durchgeführt werden, um Fehlstellen in der Beschichtung erkennen und direkt beseitigen zu können.

Darüber hinaus konnten die folgenden weiteren **Auffälligkeiten** sowie **Abweichungen** von den Vorgaben der Hersteller und den Anforderungen der maßgeblichen Richtlinien bzw. Sachstandsberichte beobachtet werden:

- Die **Schachtwandung** wurde in einigen Fällen bereits Tage vor Ausführung der Beschichtungsarbeiten **gereinigt**, so dass sich ein erneuter Schmutzfilm auf der Wandung bilden konnte (Schächte Nr. 14, 22, 24, 34, 35 und 40). In neun Fällen wurde die Mörtelbeschichtung erst einen bis mehrere Tage nach Aufbringung der Vorbeschichtung aufgetragen. In keinem Fall wurde die Vorbeschichtung aufgeraut (Schächte Nr. 2, 8, 9, 25, 27, 28, 29, 31 und 32).
- In vielen Fällen wurden **offensichtlich ungeeignete Materialien**, insbesondere zur Vorbeschichtung, eingesetzt. Fünf Betonschächte mit starker Korrosion waren zunächst mit Mörtelprodukten, die nur bedingt für den Einsatz bei sehr aggressiven Abwässern geeignet sind, großflächig vorbeschichtet worden, bevor hochwiderstandsfähige Mörtel- bzw. Polyurethanbeschichtungen aufgebracht wurden (Schächte Nr. 31, 32, 39, 41 und 42). In einem Fall wurde ein schnellabbindender Reparaturmörtel für die flächige Vorbeschichtung eingesetzt (Schacht Nr. 37). In einem weiteren Fall wurde, auch hier ohne Absprache mit dem Auftraggeber, für die Beschichtung eines korrodierten Schachtes aus Betonfertigteilen ein schnellabbindender Vergussmörtel in Kombination mit einer Dichtschlämme eingesetzt (Schacht Nr. 40). In zwei Fällen

wurde leicht angehärteter Mörtel erneut mit Wasser aufgemischt und für die Beschichtung verwendet (Schächte Nr. 14 und 15). Eine Firma gab zu allen Mörtelmischungen Mischöl hinzu, um den Mörtel nach Aussage des Personals besser verarbeitbar für den händischen Auftrag zu machen (Schächte Nr. 3, 10, 11, 14 und 15).

- Die **Grenzwerte für die klimatischen Bedingungen** während des Beschichtungsauftrags wurden in einigen Fällen **nicht eingehalten**. So lag die Lufttemperatur bei sechs Mörtelbeschichtungen, auch im oberen Teil des Schachtkörpers, außerhalb des in den maßgeblichen Richtlinien empfehlenden Bereiches (Schächte Nr. 1, 2, 4, 14, 27 und 28). In zwei Fällen war die Luftfeuchtigkeit bei der Polyurethanbeschichtung mit mehr als 80 % Luftfeuchtigkeit sehr hoch (Schächte Nr. 13 und Nr. 30). In einem Fall lag der Taupunkt Abstand bei Auftrag der Polyurethanbeschichtung entgegen den Empfehlungen der maßgeblichen Richtlinien unter 3K (Schacht Nr. 36).
- Bei zwei Beschichtungsmaßnahmen wurde eine **fehlerhafte Bedienung der Maschinentchnik** beobachtet. In einem Fall verrutschte das Zugseil bei der Mörtelbeschichtung im Anschleuderverfahren während des Auf- und Abfahrens des Schleuderkopfes mehrfach auf der Zugspindel. Dadurch wurde der Mörtel unregelmäßig auf die Schachtwandung aufgetragen und es ergab sich eine wellenartige Oberflächenstruktur, die von der ausführenden Fachfirma nicht beseitigt wurde (Schacht Nr. 41). Bei der Polyurethanbeschichtung des Schachtes Nr. 37 war vor Beginn der Beschichtung der Befüllungsgrad der Behälter für die Rohstoffkomponenten nicht kontrolliert worden, so dass es während des Beschichtungsvorganges zu einem vollständigen Verbrauch der Stamm-Komponente kam und ein Abweichen von dem erforderlichen Mischungsverhältnis sehr wahrscheinlich war.
- Bei den **Mörtelbeschichtungen im Nassspritzverfahren** wurde erwartungsgemäß ein vergleichsweise geringer **Abstand der Düse** zur Schachtwandung (ca. 10-20 cm) gewählt^a. Vor dem Auftrag der nächsten Schicht wurde jede Schichtlage von der ausführenden Fachfirma entgegen den Empfehlungen der maßgeblichen Richtlinien von Hand geglättet (Schächte Nr. 14 und 15).

a Bei der Aufbringung von Spritzbeton sollte der Spritzwinkel möglichst rechtwinklig zur Auftragsfläche sein und der Abstand der Düse zu der Oberfläche zwischen 50 und 100 cm betragen [53].

4.3.4 Zustand nach Sanierung und Materialqualität

Nach Abschluss der Sanierungsmaßnahmen wurden sämtliche Schachtbeschichtungen vor Ort untersucht (vgl. Tabelle 22). Sowohl nach ca. 28 Tagen als auch nach ca. 6 (3) Monaten wurden die Schächte **optisch inspiziert**, kritische Bereiche bewertet und Fehlstellen in der Beschichtung, wie z.B. Risse, Hohlstellen oder Blasen, aufgenommen. Nach ca. 28 Tagen wurden an 31 Schächten **Wasserdichtheitsprüfungen** und an sämtlichen Schächten **Haftzugprüfungen** ausgeführt. Die Haftzugprüfungen wurden ergänzt durch eine Bestimmung der **Beschichtungsdicke** an jeweils fünf Stellen je untersuchtem Schacht. Die während des Beschichtungsvorgangs entnommenen Materialproben wurden im Labor geprüft und wesentliche **Materialkennwerte** ermittelt.

4.3.4.1 Mörtelbeschichtungen

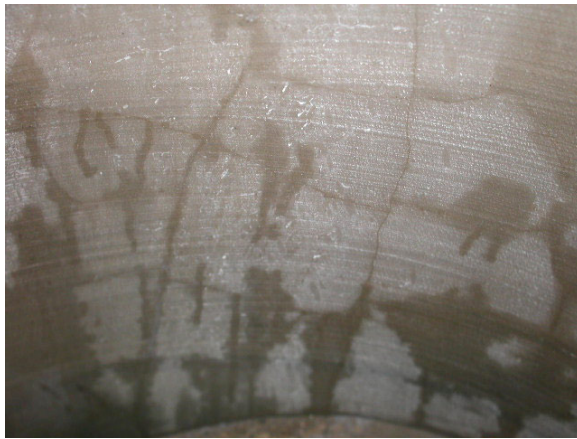
10 der 26 mit Mörtel beschichteten Schächte (Nr. 2, 8, 17, 18, 19, 23, 25, 31, 32 und 34) zeigten sich bei der optischen Inspektion (einschließlich Abklopfen der Wandung) in einwandfreiem Zustand (vgl. z.B. Abb. 94). Sie waren frei von sichtbaren Rissen, Undichtigkeiten und Fehlstellen in der Wandung und ließen bei Abklopfen keine Hohlstellen erkennen. Die Zu- und Abläufe waren bündig und dicht angebunden.



Abb. 94: Beispiele für Mörtelbeschichtungen ohne sichtbare Mängel

Bei 16 der 26 mit Mörtel beschichteten Schächte zeigten sich bei der optischen Inspektion (einschließlich Abklopfen) deutliche Mängel, wie **Risse, Hohlstellen, Fehlstellen oder Undichtigkeiten** in der Beschichtung (Abb. 95). Allerdings waren diese Mängel häufig erst bei der zweiten Inspektion nach 6 (3) Monaten eindeutig zu erkennen. In einigen Fällen konnten bei der zweiten Inspektion erstmalig Schäden festgestellt werden. Lediglich drei Schächte wiesen ausschließlich Hohlstellen auf. An insgesamt 8 Schächten wurden **Risse** in der Mörtelbeschichtung festgestellt. Sechs dieser acht Schächte zeigten darüber hinaus auch **Hohlstellen** bei Abklopfen der Beschichtung. Fünf Schächte wiesen **Fehlstellen in der Beschichtung**, wie z.B. Abplatzungen in der Nähe von Steigeisen, keinen oder zu geringen Materialauftrag

in Teilbereichen oder eine stark wellige Oberfläche auf. Fünf Schächte zeigten **Undichtigkeiten** mit Durchfeuchtung. Eine höhere Schadenshäufigkeit bei den durch Straßenverkehr hoch belasteten Schächten wurde nicht festgestellt. Tabelle 33 gibt eine detaillierte Übersicht über die Ergebnisse der optischen Inspektion an mittels Mörtelbeschichtung sanierten Schächten.



A



B



C



D



E



F

Abb. 95: Beispiele für Mörtelschachtbeschichtungen mit optisch feststellbaren Mängeln.

A: Netzartig verteilte Risse über die gesamte Schachtwandung. **B:** Riss im Konusbereich des Schachtes. **C:** Feuchte Fläche in der Beschichtung.

D: Beschichtung im Konusbereich stark wellig. **E:** Zu geringer Materialauftrag unterhalb eines Steigeisens. **F:** Klinker im Konusbereich nur teilweise beschichtet.

Tabelle 33: Ergebnisse der optischen Inspektion in mittels Mörtelbeschichtungen sanierten Schächten

Schacht Nr.	Schacht-zustand	OV ¹⁾	AA ²⁾	Risse	Hohlstellen	Undichtigkeiten	Fehlstellen	Gesamt-bewer-tung ³⁾
1	Beton, undicht ohne Korrosion	H	H	/	/	zwei feuchte Stellen, Anbindung Berme und ca. 40 cm oberhalb der Berme (ca. 50 x 10 cm)	unter Steigeisen Beschichtung abgeplatzt	O
2	Beton, undicht ohne Korrosion	R	A	keine Mängel				+
3	Beton, undicht ohne Korrosion	H	H	starke Rissbildung über die gesamte Wandung	Hohlstelle, neben Steigeisen, ca. 40 x 40 cm	unterer Bereich flächig feucht	/	-
4	Beton, undicht ohne Korrosion	R	A	/	zwei Hohlstellen, jeweils ca. 20 x 20 cm, neben Steigeisen	/	/	O
7	Mauerwerk, Korrosion	H	H	starke Rissbildung im Konusbereich	Hohlstelle im Konusbereich, ca. 20 x 30 cm			O
8	Mauerwerk, Korrosion	R	A	keine Mängel				+
9	Mauerwerk, Korrosion	R	A	/	Hohlstelle über der Sohle, ca. 20 x 10 cm	/	/	O
10	Mauerwerk, Korrosion	H	H	starke Rissbildung über die gesamte Wandung	Hohlstelle über der Sohle, ca. 30 x 30 cm	/	/	-
11	Mauerwerk, Korrosion	H	H	feine Risse über die gesamte Wandung	zwei Hohlstellen im oberen Bereich neben den Steigeisen, ca. 20 x 20 cm	/	/	-
14	Beton, undicht ohne Korrosion	H	S	feine Risse über die gesamte Wandung im unteren Bereich	zwei Hohlstellen unterhalb des Konus, ca. 20 x 30 cm	/	/	-
15	Mauerwerk, Korrosion	H	S	starke Rissbildung über die gesamte Wandung	/	Wassereindrang durch nicht sanierte Fuge im Konusbereich	/	-
17	Mauerwerk, undicht ohne Korrosion	H	H	keine Mängel				+
18	Beton, undicht ohne Korrosion	R	A	keine Mängel				+
19	Beton, undicht ohne Korrosion	H	H	keine Mängel				+
23	Mauerwerk, undicht ohne Korrosion	R	A	keine Mängel				+
25	Beton, undicht ohne Korrosion	R	A	keine Mängel				+
27	Mauerwerk, undicht ohne Korrosion	R	A	/	/	große feuchte Stelle im unteren Bereich des Schachtes, ca. 80 x 80 cm	/	O

Fortsetzung siehe nächste Seite

Tabelle 33 (Forts.): Ergebnisse der optischen Inspektion in mittels Mörtelbeschichtungen sanierten Schächten

Schacht Nr.	Schachtzustand	OV ¹⁾	AA ²⁾	Risse	Hohlstellen	Undichtigkeiten	Fehlstellen	Gesamtbewertung ³⁾
28	Mauerwerk, Korrosion	R	A	/	/	/	unterhalb eines Steigeisens Mauerwerk sichtbar	○
29	Mauerwerk, Korrosion	R	A	/	/	große feuchte Stelle unterhalb des Konus, ca. 80 x 80 cm	/	○
31	Beton, Korrosion	H	H	keine Mängel				+
32	Beton, Korrosion	H	H	keine Mängel				+
34	Mauerwerk, undicht ohne Korrosion	H	H	keine Mängel				+
35	Mauerwerk, undicht ohne Korrosion	R	A	Großer Riss oberhalb des Ablaufes, kreuzförmige Risse unterhalb des Konus	Hohlstelle unterhalb des Konuses, ca. 80 x 40 cm	/	/	-
38	Mauerwerk, Korrosion	R	A	/	/	/	Klinker im Konus nur teilweise beschichtet, Abplatzungen Einbindungsbereiche Steigbügel	-
40	Beton, Korrosion	H	H	starke Rissbildung über die gesamte Wandung	zwei Hohlstellen unterhalb Konus, 20 x 20 cm und 30 x 20 cm	/	nicht beschichtete Stelle (ca. 3 x 1 cm) am Ablauf	-
41	Beton, Korrosion	R	A	/	/	/	Beschichtung vor allem im Konusbereich stark wellig	-

1) OV = Oberflächenvorbereitung, H = Reinigung mit Wasserhochdruck (ca. 120 bar) unter Verwendung einer Handlanze, R = Reinigung mit Wasserhochdruck (ca. 300 bar) unter Verwendung einer rotierenden Reinigungsdüse

2) AA = Auftragsart des Mörtels, H = Auftrag von Hand, S = Auftrag im Nassspritzverfahren, A = Auftrag im Anschleuderverfahren

3) rot/- = Häufung von Mängeln, gravierende Mängel oder ganzer Beschichtungskörper schadhaft

gelb/o = örtlich sehr begrenzt auftretende Mängel bzw. Mängel leicht behebbar

grün/+ = keine Mängel in der optischen Inspektion (einschließlich Abklopfen) erkennbar

An den 26 mit Mörtel beschichteten Schächten wurden Prüfungen der **Haftzugfestigkeit der Beschichtung** in Anlehnung an ZTV-SIB90 [63] bzw. DafStb-Instandsetzungs-Richtlinie [50] an jeweils drei Stellen der Beschichtung (im oberen, mittleren und unteren Bereich des Schachtes) durchgeführt (Tabelle 34 und Tabelle 35). Ähnlich wie bei den Prüfungen der Abreißfestigkeit (vgl. Abschnitt 4.3.1.2) sind auch hier in jedem Einzelfall die Versagensart bzw. die Bruchbilder bei der Bewertung zu berücksichtigen. Lediglich bei zwei Prüfungen versagte der Prüfkörper zu mehr als 25 % in der Klebefuge (Schacht Nr. 38, mitte und Schacht Nr. 41, unten).

Grundsätzlich wiesen die gemessenen **Haftzugwerte große Schwankungen** auf. Bei den Mörtelbeschichtungen auf Mauerwerk lag der höchste Wert bei $2,5 \text{ N/mm}^2$ (Schacht Nr. 9, mittig), während in drei Fällen (Schacht Nr. 10, 23 und 29, jeweils mittig) keine Haftzugfestigkeit gemessen werden konnte, da sich die Mörtelbeschichtung schon zu Beginn der Prüfung vom Mauerwerk löste. Bei den Mörtelbeschichtungen auf Beton lag der höchste Wert bei $2,8 \text{ N/mm}^2$ (Schacht Nr. 28, Betonkonus, oben). In sieben Fällen konnte wiederum keine Haftzugfestigkeit gemessen werden (Schacht Nr. 1, unten, Schacht Nr. 14, oben und mittig, Schacht Nr. 18, unten, Schacht Nr. 40, alle drei Prüfungen), da sich auch hier die Beschichtung bereits bei Prüfbeginn vom Untergrund löste. In einem Extremfall (Nr. 40) fielen die Proben direkt nach dem Bohrvorgang ohne weitere Kraftaufbringung aus der Wandung, hier war ein Vergussmörtel für die Beschichtung eines Betonschachtes mit starker Korrosion verwendet worden. An Schacht Nr. 29 wurde im oberen Bereich des Schachtes mit $2,5 \text{ N/mm}^2$ eine sehr hohe und im mittleren und unteren Bereich des Schachtes eine demgegenüber nur sehr geringe Haftzugfestigkeit von $0,0$ bzw. $0,3 \text{ N/mm}^2$ gemessen. Während im oberen Bereich des Schachtes der Mörtel direkt auf die Schachtwandung aus Beton aufgeschleudert worden war, limitierte im mittleren und unteren Bereich des Schachtes die von Hand aufgetragene Mörtelvorbeschichtung die Haftzugfestigkeit.

Bei Mörtelbeschichtungen auf **korrodierten Betonwandungen** wurden durchgängig niedrige Haftzugwerte ($\leq 0,7 \text{ N/mm}^2$) gemessen. Als mögliche Ursache für dieses frühzeitige Versagen sind insbesondere **Schwächen in der Oberflächenvorbereitung** anzuführen. Bei 6 von insgesamt 12 Prüfungen lag die Bruchstelle komplett im Untergrund, bei weiteren drei Prüfungen in der Trennfuge zwischen Beschichtungsmaterial und Untergrund. Auch in den übrigen Prüfungen bei nicht-korrodiertem Untergrund (Beton und Mauerwerk) versagte i.d.R. die Trennfuge zwischen Untergrund und Beschichtung. Die Inaugenscheinnahme der Prüfkörper bestätigte in vielen Fällen die mangelhafte Oberflächenvorbereitung, z.B. durch Schmutzreste in der Trennfuge (vgl. Abb. 96).

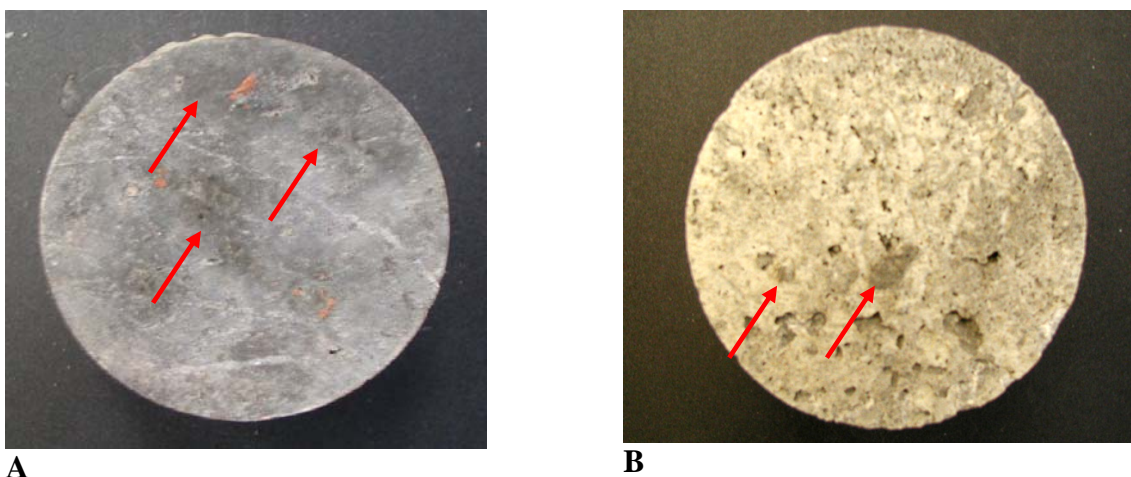


Abb. 96: Sichtbare Schmutzreste auf Haftzug-Prüfkörpern bei Bruch in der Trennfuge.
A: Prüfkörper Schacht Nr. 29, mitte. **B:** Prüfkörper Schacht Nr. 17 mitte.

Tabelle 34: **Haftzugfestigkeiten** der Mörtelbeschichtungen auf den Schachtwänden der **Mauerwerksschächte** (ermittelt in Anlehnung an ZTV-SIB90 [63] bzw. DAfStb-Instandsetzungs-Richtlinie [50])

Schacht Nr.	Abreißfestigkeit des unvorbehandelten Untergrundes [N/mm ²]			Haftzugfestigkeit nach Beschichtung [N/mm ²]												
	oberer Schachtbereich	mittlerer Schachtbereich	unterer Schachtbereich	oberer Schachtbereich				mittlerer Schachtbereich				unterer Schachtbereich				
	BK ¹⁾	BK ¹⁾	BK ¹⁾	BS ¹⁾	BT ¹⁾	BU ¹⁾	BK ¹⁾	BS ¹⁾	BT ¹⁾	BU ¹⁾	BK ¹⁾	BS ¹⁾	BT ¹⁾	BU ¹⁾	BK ¹⁾	
Undicht ohne Korrosion	17	2,0*	1,2	0,5	0,2*				0,2				0,2			
		100	70	100	0	100	0	0	0	100	0	0	0	100	0	0
	23	4,1	0,2	0,2	0,4*				0,0				0,2			
		100	100	100	0	100	0	0	0	100	0	0	0	100	0	0
	27	1,1	0,7	0,3	0,4*				0,2				0,2			
100		70	50	0	60	40	0	0	40	60	0	0	20	80	0	
34	0,3	0,0	0,2	0,2				0,5				0,2				
	80	70	100	0	100	0	0	0	90	10	0	0	100	0	0	
35	0,6	1,0	0,2	0,5				0,6				0,4				
	50	40	40	0	100	0	0	0	50	50	0	0	100	0	0	
Korrosion	7	1,2	0,3	0,3	0,5*				0,4				0,8			
		0	0	20	0	100	0	0	0	90	10	0	0	90	10	0
	8	0,9*	0,7	1,1	0,2				0,3				0,2			
		100	40	80	0	100	0	0	0	100	0	0	0	100	0	0
	9	2,5*	0,5	0,3	0,8*				2,5				2,1			
		100	100	100	0	100	0	0	40	0	60	0	0	80	20	0
	10	0,4	1,0	1,6	0,2				0,0				0,5			
		90	90	90	0	100	0	0	0	100	0	0	0	100	0	0
	11	0,0	0,2	0,0	0,2				0,5				0,2			
		0	0	0	30	70	0	0	0	40	60	0	0	100	0	0
	15	0,4*	0,4	1,2	0,2				0,9				1,4			
		100	10	80	0	100	0	0	0	50	50	0	0	100	0	0
28	1,2*	2,3*	1,9	2,8*				1,5				0,8				
	100	100	0	100	0	0	0	40	60	0	0	0	40	60	0	
29	0,4	0,7	2,7	2,5*				0,0				0,3				
	100	100	100	80	0	0	20	0	100	0	0	80	20	0	0	
38	0,3	0,7	0,5	1,0				1,0				1,5				
	50	0	80	70	0	30	0	0	0	0	100	0	0	100	0	

Anmerkungen

1) = in den Zeilen unter den Festigkeitswerten sind jeweils die prozentualen Oberflächenanteile der verschiedenen Versagensarten dargestellt (BS: Bruch im Sanierungsmaterial / BT: Bruch in der Trennfuge zwischen Sanierungsmaterial und Untergrund / BU: Bruch im Untergrund / BK: Bruch in der Klebefuge).

* = die dargestellten Festigkeiten wurden im Bereich der aufgesetzten Betonoberteile ermittelt
 ■ der dargestellte Haftzugwert kann nur als ergänzender Hinweis auf die Beschichtungsqualität angesehen werden, da der Prüfkörper zu mehr als 25 % in der Klebefuge versagte

Tabelle 35: **Haftzugfestigkeiten** der Mörtelbeschichtungen auf den Schachtwandungen der **Betonschächte** (ermittelt in Anlehnung an ZTV-SIB90 [63] bzw. DafStb-Instandsetzungs-Richtlinie [50])

Schacht Nr.	Abreißfestigkeit des unvorbehandelten Untergrundes [N/mm ²]			Haftzugfestigkeit der Beschichtung [N/mm ²]												
	oberer Schachtbereich	mittlerer Schachtbereich	unterer Schachtbereich	oberer Schachtbereich				mittlerer Schachtbereich				unterer Schachtbereich				
	BK ¹⁾	BK ¹⁾	BK ¹⁾	BS ¹⁾	BT ¹⁾	BU ¹⁾	BK ¹⁾	BS ¹⁾	BT ¹⁾	BU ¹⁾	BK ¹⁾	BS ¹⁾	BT ¹⁾	BU ¹⁾	BK ¹⁾	
Undicht ohne Korrosion	1	2,2	3,4	0,6	0,2				0,2				0,0			
		50	80	0	0	100	0	0	0	100	0	0	0	100	0	0
	2	1,0	0,2	0,2	0,5				1,3				0,7			
		0	0	10	0	100	0	0	0	100	0	0	0	100	0	0
	3	3,3	/	2,2	0,2				/				0,6			
		90	/	50	0	100	0	0	/	/	/	/	0	100	0	0
	4	0,2	0,3	0,3	0,5				0,3				0,3			
		100	80	90	0	100	0	0	0	100	0	0	0	100	0	0
14	2,4	1,5	1,9	0,0				0,0				0,2				
	90	80	90	0	100	0	0	0	100	0	0	0	100	0	0	
18	0,9	1,8	1,3	0,3				0,4				0,0				
	100	90	100	0	100	0	0	0	100	0	0	0	100	0	0	
19	2,8	2,5	2,7	0,3				0,2				1,2				
	90	90	80	0	100	0	0	0	100	0	0	0	100	0	0	
25	4,1	4,5	/	0,2				0,2				0,2*				
	0	0	/	0	100	0	0	0	100	0	0	0	0	100	0	
Korrosion	31	0,9	0,9	1,7	0,2				0,4				0,6			
		70	50	90	0	0	100	0	0	0	100	0	0	0	100	0
	32	0,9	1,2	1,4	0,1				0,6				0,2			
		10	20	80	100	0	0	0	0	0	100	0	100	0	0	0
	40	0,4	0,5	0,7	0,0				0,0				0,0			
		0	0	10	0	100	0	0	0	100	0	0	0	100	0	0
	41	0,9	0,4	0,4	0,4				0,4				0,6			
		40	0	70	0	0	100	0	0	0	100	0	0	0	0	100

Anmerkungen

- 1) = in den Zeilen unter den Festigkeitswerten sind jeweils die prozentualen Oberflächenanteile der verschiedenen Versagensarten dargestellt (BS: Bruch im Sanierungsmaterial / BT: Bruch in der Trennfuge zwischen Sanierungsmaterial und Untergrund / BU: Bruch im Untergrund / BK: Bruch in der Klebefuge).
- * = die dargestellten Festigkeiten wurden im Bereich des Mauerwerks im unteren Bereich der Schächte ermittelt
- / = es wurde keine Haftzugfestigkeitsprüfung durchgeführt
- = der dargestellte Haftzugwert kann nur als ergänzender Hinweis auf die Beschichtungsqualität angesehen werden, da der Prüfkörper zu mehr als 25 % in der Klebefuge versagte

Ergänzend wurden an den 26 Mörtelbeschichtungen Kernbohrungen an jeweils 5 Stellen der Beschichtung (über die Tiefe des Schachtes verteilt; Prüfung 1: Sohlenbereich, Prüfung 5: Konusbereich) ausgeführt, um die **Beschichtungsdicke** zu messen. Tabelle 36 gibt eine Übersicht über sämtliche gemessene Schichtstärken an den Mörtelbeschichtungen. Die durch-

schnittliche Beschichtungsdicke sämtlicher untersuchter Mörtelbeschichtungen betrug 18,8 mm. Bei Schächten aus Betonfertigteilen mit dem Schadensbild Korrosion wurden insgesamt deutlich dickere Mörtelschichten (\varnothing 24,9 mm) aufgetragen. Die durchschnittlichen Schichtstärken der Mörtelbeschichtungen auf Schächten aus Mauerwerk (\varnothing 17,8 mm) und auf Schächten aus Betonfertigteilen mit Undichtigkeiten (\varnothing 18,7 mm) wichen nur geringfügig voneinander ab. Die in der Instandsetzungs-Richtlinie des DAfStb [50] vorgeschlagene Mindestschichtdicke für kunststoffmodifizierte Mörtel von 10 mm ist bei vier Schächten (Nr. 1, 15, 34 und 38), jeweils bei einer Prüfung, unterschritten worden. Unabhängig von der Auftragsart zeigten sich deutlich erkennbare Schwankungen in der Schichtstärke über die Schachtwandung, mit Variationskoeffizienten größer 10 %. Die im Mittel größten Schichtdicken waren beim Handauftrag zu verzeichnen; allerdings ergaben sich erhebliche Wanddickenschwankungen mit Kleinstwerten von ca. 10 mm und Größtwerten von ca. 45 mm. Wird eine gleichmäßige Schichtdicke bei geringem Materialverbrauch angestrebt, bietet das Anschleuderverfahren hier offensichtlich Vorteile.

Tabelle 36: Übersicht über sämtliche gemessene Schichtstärken an den Mörtelbeschichtungen

		Schacht	Prüfung 1	Prüfung 2	Prüfung 3	Prüfung 4	Prüfung 5	Mittelwert	Variationskoeffizient
		Nr.	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[%]
Mörtelbeschichtung	von Hand	1	15,5	18,9	13,0	13,0	8,7	13,8	27,1
		3	28,9	21,2	21,9	33,0	18,7	24,7	24,1
		7	25,5	11,6	19,8	16,0	10,6	16,7	36,7
		10	30,2	21,2	18,0	24,7	20,8	23,0	20,4
		11	18,2	26,8	15,0	24,8	17,4	20,4	24,9
		17	21,2	20,2	25,2	18,8	22,0	21,5	11,2
		19	22,9	22,5	29,6	19,9	19,5	22,9	17,7
		31	22,5	19,7	12,8	27,2	15,6	19,6	29,0
		32	45,8	28,0	39,7	20,6	15,3	29,9	42,7
		34	21,4	12,7	18,5	19,5	9,5	16,3	30,7
	40	20,2	23,3	20,6	14,2	11,6	18,0	27,1	
	Anspritzverfahren	14	30,7	26,9	21,4	20,5	23,6	24,6	17,1
		15	18,7	17,3	16,8	11,1	5,7	13,9	39,0
	Anschleuderverfahren	2	15,5	15,1	13,1	15,5	/	14,8	7,9
		4	15,7	18,1	16,7	18,4	12,5	16,3	14,6
		8	10,9	12,9	15,9	11,8	15,6	13,4	16,7
		9	11,8	11,3	12,1	22,1	18,1	15,1	31,9
		18	15,1	16,0	15,3	/	13,9	15,1	5,8
		23	18,7	12,8	16,1	15,2	13,3	15,2	15,5
		25	17,5	16,8	14,5	16,5	21,3	17,3	14,4
27		11,2	13,7	13,9	12,4	15,5	13,3	12,2	
28		21,9	15,4	15,7	11,3	12,3	15,3	27,1	
29		17,2	15,0	14,3	20,3	12,2	15,8	19,5	
35		26,8	24,6	31,5	26,9	30,7	28,1	10,3	
38		12,7	9,2	11,5	13,7	12,6	11,9	14,3	
41	37,0	36,3	36,1	28,7	22,3	32,1	20,0		

Vor dem Hintergrund der o.a. und detailliert dargestellten Ergebnisse zeigt Abb. 97 eine Übersicht über die Untersuchungsergebnisse für die einzelnen in Tabelle 14 bis Tabelle 20 beschriebenen Schachtbauwerke mit Blick auf die im Rahmen des Vorhabens gezielt variierten Untersuchungsrandbedingungen. Ergänzende Hinweise zu den Besonderheiten bei der Sanierungsausführung können Abschnitt 4.3.3 entnommen werden. Der Schwerpunkt dieser Übersicht liegt auf den Ergebnissen der optischen Inspektion, der Haftzugfestigkeitsprüfung und der Überprüfung der Wasserdichtheit (vgl. Abschnitt 4.3.1.4).

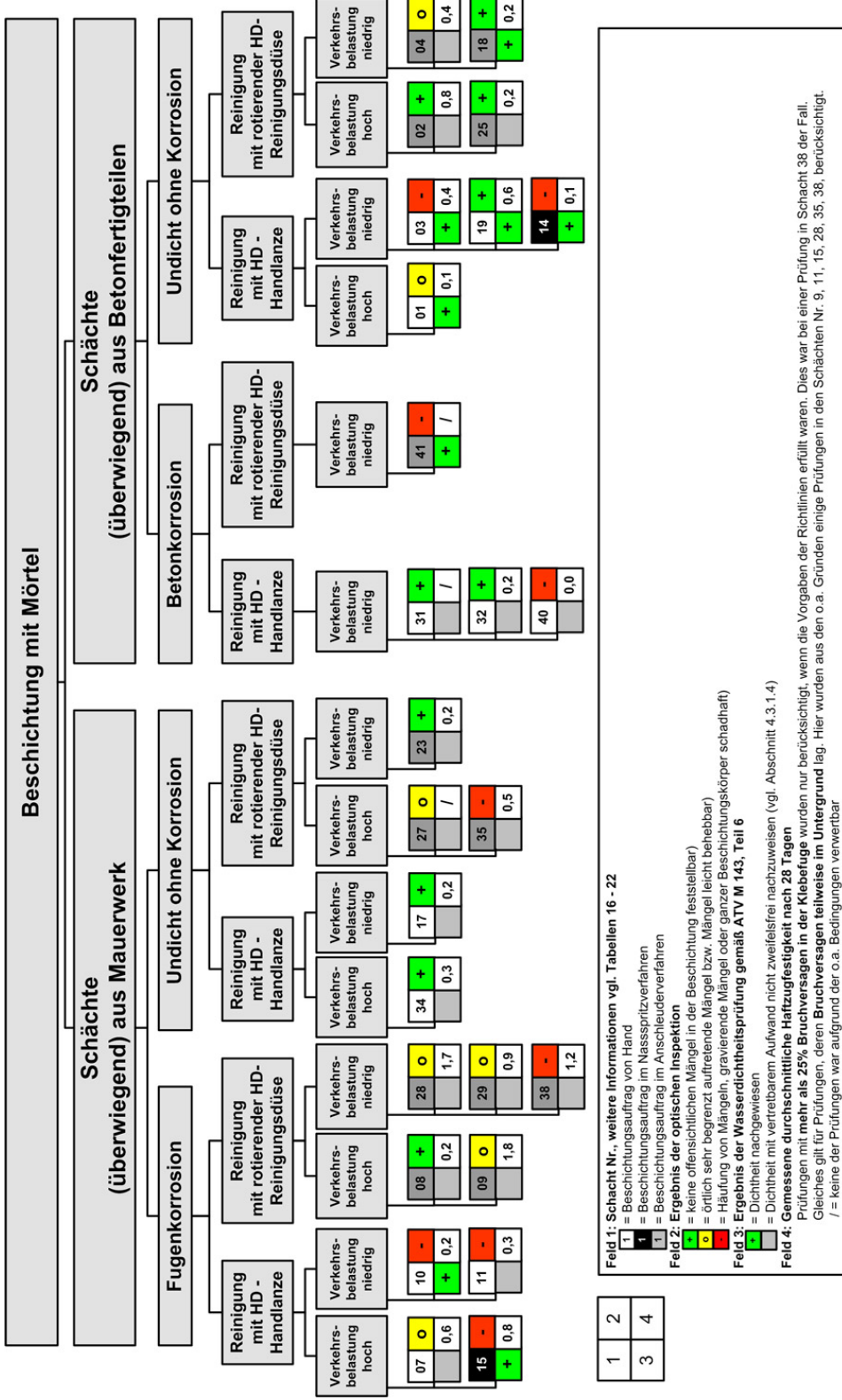


Abb. 97: Übersicht über die Untersuchungsergebnisse der optischen Inspektion, der Prüfung der Haftzugfestigkeit und der Überprüfung der Wasserdichtheit an den 26 im Rahmen des Projektes mit Mörtel beschichteten Abwasserschächten, weitere Informationen vgl. Tabelle 14 bis Tabelle 20 und Abschnitt 4.3.3

Über diese grundsätzlichen Ergebnisse hinaus konnten **weitere Erkenntnisse** aus der optischen Inspektion und den Prüfungen der in situ gewonnenen Mörtelproben abgeleitet werden. Die wesentlichen Ergebnisse sind nachfolgend zusammengefasst.

Unterschiede in der **Oberflächenstruktur der Beschichtungen** konnten zwischen den verschiedenen Auftragsarten festgestellt werden. Eine i.d.R. sehr glatte Oberfläche lag bei den von Hand aufgetragenen Mörtelbeschichtungen bzw. bei den nachträglich von Hand nachbearbeiteten Oberflächen der im Anspritzverfahren beschichteten Schächte vor. Die Oberflächen der im Anschleuderverfahren beschichteten Schächte waren i.d.R. leicht wellig. Die ebenfalls im Anschleuderverfahren aufgetragenen Sewament 100 – Beschichtungen besaßen eine sehr porige Oberfläche, einzelne Poren waren bis zu 5 mm tief und maßen 4 mm im Durchmesser. Auf dieser porigen Oberfläche lagerte sich geringfügig mehr Schmutz als auf den glatteren Oberflächen ab.

Besonders häufig lagen Mängel wie Rissbildung, Hohlstellen und zu geringer Materialauftrag **im Bereich der Steigeisen** vor. Bei einem Schacht (Nr. 38) waren an den Stellen, an denen die neuen Steigbügel nach dem Beschichtungsvorgang angebracht worden waren, Abplatzungen in der Mörtelbeschichtung zu erkennen (vgl. Abb. 99). In einigen Fällen, bei denen die Steigeisen vor Ausführung der Beschichtung nicht abmontiert worden waren, war aufgrund der Dicke der Mörtelbeschichtung keine ausreichende Auftrittsfläche, mit z.T. nur ca. 8 cm Auftrittstiefe, gegeben (vgl. Abb. 98). Die Mindestauftrittstiefe sollte 12 cm betragen (vgl. Abschnitt 3.1.1).



Abb. 98: Zu geringe Auftrittstiefe an einem Steig Eisen, das vor der Beschichtungsmaßnahme nicht abmontiert worden war



Abb. 99: Abplatzungen in der Mörtelbeschichtung bei einem nachträglich angebrachten Steigbügel

Bei allen Mörtelbeschichtungen auf Betonschächten mit dem Schadensbild Korrosion war eine mehr oder weniger starke **grün-schwarze Verfärbung** zu erkennen, was nach Herstellerangaben auf einen beginnenden Angriff durch Schwefelsäurekorrosion hinweisen kann. Unterschiede in der Mörtelkonsistenz in den betroffenen Bereichen konnten bei einem Abklopfen der Beschichtung nicht festgestellt werden.



A



B

Abb. 100: *Grün-schwarze Färbung bei Mörtelbeschichtungen in Schächten mit starker Schwefelsäurebelastung. A: Beginnende Verfärbung im Bereich der Berme. B: Starke Verfärbung im Bereich der Schachtwandung.*

Die **seitlichen Zuläufe in der Schachtwandung** waren i.d.R. bündig und dicht angebunden (vgl. z.B. Abb. 101). In einem Fall (Schacht Nr. 4) war ein Zulauf aus Steinzeug so stark gerissen, dass er bei der Sanierung entfernt werden musste. Hier war zwar der Übergang zur Schachtwandung bündig ausgebildet, aber kein neues Rohr eingebaut worden. Daher war im gesamten Bereich hinter der Schachtwandung der anstehende Boden sichtbar (vgl. Abb. 102).



Abb. 101: *Bündige und dichte Anbindung eines seitlichen Zulaufs*



Abb. 102: *Boden hinter seitlichem Zulauf sichtbar*

Die Anbindung der **Zu- und Abläufe im Sohlenbereich** war i.d.R. bündig ausgeführt (vgl. Abb. 103). Lediglich in einem Fall (Schacht Nr. 40) war im Bereich des Zulaufs nur die Wandung beschichtet worden. Bis zu dem einige Zentimeter zurückliegenden Kanalrohr war das Mauerwerk sichtbar (vgl. Abb. 104).



Abb. 103: Bündige Anbindung eines Zulaufes im Sohlenbereich



Abb. 104: Nicht beschichtete Stelle im Bereich eines Zulaufs

Die **Sohlen und Bermen** der sanierten Schächte waren i.d.R. in einem guten optischen Zustand (vgl. Abb. 105). Bei fünf der 26 mit Mörtel beschichteten Schächte (Nr. 1, 7, 8, 9, 10) wurden neue Halbschalen für das Gerinne eingebaut und die Bermen neu mit Mörtel ausgebildet. Bei sechs Schächten (Nr. 3, 27, 28, 29, 34, 35) wurden zwar die Gerinne und die Bermen nicht saniert, die Beschichtung der Wandung aber bündig und augenscheinlich dicht an die bestehende Berme angebunden. Bei zwei der 26 Schächte (Nr. 4, 11) wurde sowohl die Berme als auch das Gerinne beschichtet, auch hier waren keine Undichtigkeiten oder Fehlstellen zu erkennen. In acht Fällen (Schächte Nr. 1, 2, 7, 9, 11, 15, 31, 32) wurde die Berme mit Klinkersteinen geschützt, nur bei einem Schacht (Nr. 1) wurde eine undichte Stelle im Übergangsbereich Berme-Wandung festgestellt.



A



B



C

*Abb. 105: Ausführung der Schachtsohlen. A: Gerinne und Berme beschichtet.
B: Vorhandenes Gerinne und Berme an Beschichtung angebunden.
C: Geklinkerte Berme mit Undichtigkeit im Übergangsbereich Wandung-Berme.*

Bei 23 Mörtelbeschichtungsmaßnahmen wurden während des Sanierungsvorganges Werkstoffproben entnommen (vgl. Abschnitt 4.3.1.3), um die **Biegezug- und Druckfestigkeit** sowie die **Wassereindringtiefe** in Laborprüfungen bestimmen zu können. Eine Ergebnisübersicht zeigen Tabelle 37 und Tabelle 38. In Abb. 106 sind die ermittelten Biegezugfestigkeiten und in Abb. 107 die ermittelten Druckfestigkeiten den Herstellerangaben gegenübergestellt.

Die durchschnittliche **Druckfestigkeit** der Mörtelmischungen lag bei $45,3 \text{ N/mm}^2$. 20 der 23 vor Ort durch die Fachfirmen hergestellten Mörtelmischungen unterschritten die von den Herstellern in den Produktbeschreibungen angegebenen Druckfestigkeiten z.T. deutlich. Die durchschnittliche **Biegezugfestigkeit** sämtlicher untersuchter Mörtelmischungen lag bei $6,17 \text{ N/mm}^2$ bei erheblicher Schwankung in den Einzelwerten. Für 21 Einsatzfälle lagen diesbezüglich Herstellerangaben bzw. Produktbeschreibungen vor. 18 der vor Ort durch die Fachfirmen hergestellten Mörtelmischungen (86 %) erreichten nicht die dort angegebenen Werte, in einigen Fällen (z.B. Schacht Nr. 10, 11 und 14) betrug die gemessenen Biegezugfestigkeiten nur ein Drittel der von den Herstellern angegebenen Werte.

Die Ergebnisse der Festigkeitsprüfungen bestätigen auch die Bedeutung der in Abschnitt 4.3.3 dargestellten Schwachstellen in der Bauausführung. Besonders deutlich wird dies im Falle der Schächte Nr. 10, 11, 14 und 15. In diesem Fall wurde Öl beim Anmischen der Mörtel eingesetzt.

Tabelle 37: Biegezugfestigkeiten der untersuchten Mörtel

Schacht Nr.	Biegezugfestigkeit [N/mm ²]			Mittelwert der Biegezugfestigkeit [N/mm ²]	Variationskoeffizient
	Probe 1	Probe 2	Probe 3		
1	7,12	7,66	7,06	7,28	5%
2	9,86	9,01	9,09	9,32	5%
4	9,22	10,31	8,21	9,25	11%
7	6,51	5,95	6,25	6,24	4%
8	8,59	8,33	7,80	8,24	5%
9	10,22	10,69	9,32	10,08	7%
15	4,84	4,41	4,51	4,59	5%
17	4,18	4,23	3,98	4,13	3%
18	5,55	4,23	10,68	6,82	50%
19	4,13	8,76	5,52	6,14	39%
23	5,95	7,05	7,50	6,83	12%
34	7,65	7,82	7,50	7,66	2%
35	8,27	8,46	8,29	8,34	1%
38	4,00	3,75	3,89	3,88	3%
31	3,03	2,87	3,17	3,02	5%
32	0,17	5,42	0,16	1,92	158%
10	4,29	5,13	4,18	4,53	11%
11	5,68	5,80	5,81	5,76	1%
14	6,84	2,51	5,27	4,87	45%
25	6,03	5,83	4,99	5,62	10%
27	5,95	5,84	6,38	6,06	5%
28	5,45	5,36	5,06	5,29	4%
29	5,69	6,29	6,16	6,05	5%

Biegezugfestigkeit der eingesetzten Beschichtungsmörtel

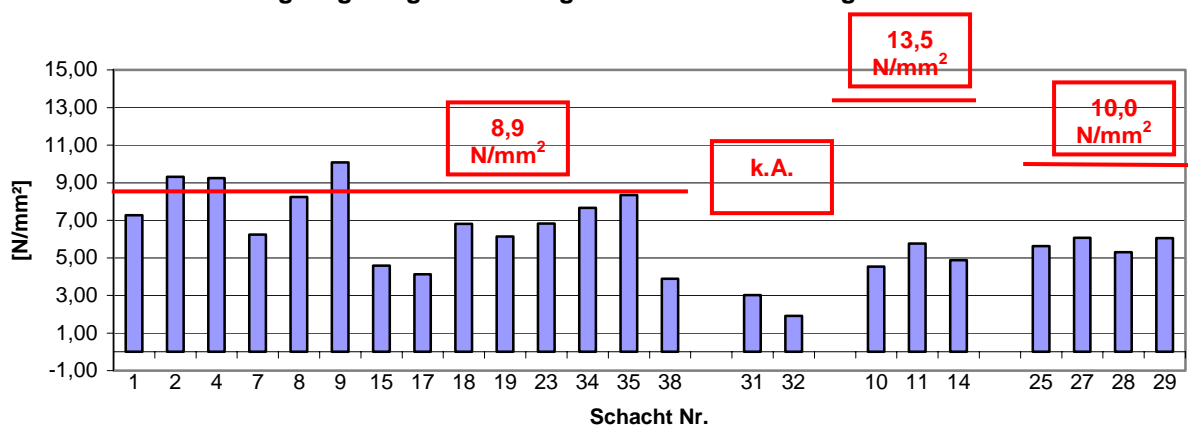


Abb. 106: Mittelwerte der Biegezugfestigkeiten für die eingesetzten Mörtelbeschichtungen und Herstellerangaben nach [49], [65], [66] und [95] (rot dargestellt)

Tabelle 38: Druckfestigkeiten der untersuchten Mörtel

Schacht Nr.	Druckfestigkeit [N/mm ²]						Mittelwert Druckfestigkeit [N/mm ²]	Variationskoeffizient
	Probe 1		Probe 2		Probe 3			
	links	rechts	links	rechts	links	rechts		
1	61,39	58,21	65,41	73,56	77,67	71,69	67,99	11%
2	74,47	75,38	72,52	57,39	70,20	74,80	70,79	10%
4	58,57	64,89	52,99	68,91	46,01	58,58	58,33	14%
7	58,87	52,50	60,79	60,26	54,09	57,80	57,39	6%
8	61,56	63,31	67,71	67,71	70,00	63,85	65,69	5%
9	53,77	55,36	67,36	53,62	61,84	63,93	59,31	10%
15	42,70	35,46	33,48	27,28	30,70	24,50	32,35	20%
17	57,93	55,02	49,66	56,96	48,75	65,63	55,66	11%
18	42,11	44,24	53,49	49,95	53,99	42,03	47,64	12%
19	65,46	57,88	58,09	58,35	58,33	55,33	58,91	6%
23	58,51	54,32	43,49	48,44	54,63	59,53	53,15	12%
34	51,04	51,90	53,57	41,34	50,90	57,21	50,99	10%
35	60,00	67,18	56,52	48,13	58,15	52,82	57,13	11%
38	46,70	46,93	56,47	48,86	48,28	43,53	48,46	9%
31	18,99	17,40	19,12	17,44	17,06	21,17	18,53	8%
32	16,79	18,02	15,50	13,67	14,75	14,72	15,58	10%
10	29,28	34,28	28,52	36,21	29,70	33,98	32,00	10%
11	28,87	33,38	34,62	34,83	28,86	36,05	32,77	10%
14	43,47	43,72	30,19	27,67	37,95	31,04	35,67	20%
25	25,35	32,73	27,94	28,93	20,64	21,80	26,23	17%
27	34,54	34,78	34,66	34,69	30,86	30,13	33,28	7%
28	32,18	32,95	37,23	33,80	29,81	26,91	32,15	11%
29	34,24	29,01	31,15	35,10	33,51	27,99	31,83	9%

Druckfestigkeit der eingesetzten Beschichtungsmörtel

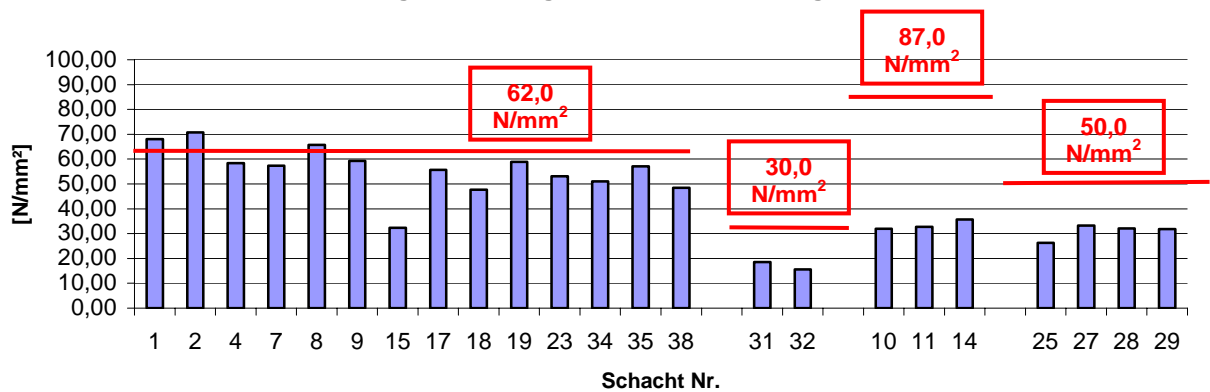


Abb. 107: Vergleich der Druckfestigkeiten der eingesetzten Mörtelbeschichtungen mit den Angaben der Hersteller nach [49], [65], [66] und [95] (rot dargestellt)

Die Messung der **Wassereindringtiefe** wurde an in situ hergestellten Probekörpern (vgl. Abschnitt 4.3.1.3) in Anlehnung an DIN 1048, Teil 5 [74], nach Belastung mit einem Wasserdruck von 0,5 bar über 3 Tage, durchgeführt. Eine Übersicht über sämtliche Prüfergebnisse gibt Tabelle 39.

Bei 10 Schächten war mindestens ein Probekörper stellenweise vollständig durchfeuchtet. Bei diesen Probekörpern wurde die Beschichtungsdicke als größte Eindringtiefe gewertet. Bei 4 Schächten (Nr. 1, 17, 28 und 32) zeigten jeweils alle drei Probekörper eine **stellenweise vollständige Durchdringung der Beschichtung mit Wasser** (vgl. Abb. 108).

17 der 24 untersuchten Mörtelbeschichtungen erfüllten im Mittel die Mindestanforderungen an die Wassereindringtiefe^a (allerdings bei Prüfung mit 0,5 bar Wasserdruck nach [74], da bei höheren Drücken in Mörtelprüfungen i.d.R. Umläufigkeiten beobachtet wurden). Bei 8 Schächten (Nr. 1, 15, 27, 28, 31, 32, 34 und 38) überschreitet die aus den Prüfergebnissen rechnerisch ermittelte Untergrenze der Schichtdicke (Faktor 1,5) die minimale Dicke der in situ aufgetragenen Beschichtung. Bei 13 Mörtelbeschichtungen lag die rechnerische Mindestschichtdicke über 10 mm. Damit scheint eine Schichtdicke von 10 mm^b nicht in allen Fällen ausreichend zu sein, um eine Wasserdurchdringung der Mörtelbeschichtung zu verhindern. Um das Risiko einer stellenweise vollständigen Wasserdurchdringung zu verringern, sollte eine deutlich größere Mindestschichtdicke als 10 mm, z.B. 20 mm, eingehalten werden.



Abb. 108: *Komplette Durchdringung einer Mörtelbeschichtung (Schacht Nr. 17) bei einer Wasserundurchlässigkeitsprüfung gemäß DIN 1048, Teil 5*

-
- a GSTT-Informationen Nr. 18 [38]:
aufgetragene Schichtdicke > 1,5-fache der Eindringtiefe bei 1 bar Wasserdruck
 - b Mindestschichtdicke für kunststoffmodifizierte Mörtel gemäß Instandsetzungs-Richtlinie des Deutschen Ausschusses für Stahlbeton [50]

Tabelle 39: Ergebnisübersicht über die Wasserundurchlässigkeitsuntersuchungen

Schacht-Nr.	Labormessungen Wassereindringtiefe				In-Situ-Messungen Schichtdicke		
	Prob-Nr.	größte Eindringtiefe	Mittelwert der größten gemessenen Eindringtiefen	Errechnete Untergrenze der Schichtdicke*	min. Dicke der in situ aufgetragenen Beschichtung	durchschnittliche Dicke der in situ aufgetragenen Beschichtung	
		[mm]	[mm]	[mm]			[mm]
Auftrag von Hand	1	1.1	12,4	13,1	19,7	8,7	13,8
		1.2	13,5				
		1.3	13,4				
	3	3.1	4,0	4,4	6,6	18,7	24,7
		3.2	4,8				
		3.3	1				
	7	7.1	4,1	5,2	7,9	10,6	16,7
		7.2	4,9				
		7.3	6,7				
	10	10.1	5,2	4,2	6,4	18,0	23,0
		10.2	4,0				
		10.3	3,5				
11	11.1	5,8	7,1	10,7	15,0	20,4	
	11.2	6,5					
	11.3	9,0					
17	17.1	14,0	12,5	18,8	18,8	21,5	
	17.2	13,0					
	17.3	10,5					
31	31.1	12,0	10,8	16,2	15,6	19,6	
	31.2	9,9					
	31.3	10,6					
32	32.1	13,0	14,5	21,8	15,3	29,9	
	32.2	15,6					
	32.3	15,0					
34	34.1	11,7	11,5	17,3	9,5	16,3	
	34.2	11,6					
	34.3	11,3					
Anspritzverfahren	14	14.1	1	4,7	7,0	20,5	24,6
		14.2	4,7				
		14.3	1				
15	15.1	3,7	4,5	6,8	5,7	13,9	
	15.2	5,1					
	15.3	4,8					
Anschleuderverfahren	2	2.1	4,1	6,7	10,1	13,1	14,8
		2.2	7,1				
		2.3	9,0				
	4	4.1	12,7	7,1	10,6	12,5	16,3
		4.2	4,0				
		4.3	4,5				
	8	8.1	7,2	4,4	6,6	10,9	13,8
		8.2	3,0				
		8.3	3,1				
	9	9.1	2,0	3,3	5,0	11,8	15,1
		9.2	3,5				
		9.3	4,5				
	18	18.1	4,0	3,5	5,3	13,9	15,1
		18.2	3,5				
		18.3	3,0				
	23	23.1	4,0	3,8	5,8	13,3	15,2
		23.2	3,5				
		23.3	4,0				
	25	25.1	4,5	5,4	8,2	14,5	17,3
		25.2	5,8				
		25.3	6,0				
	27	27.1	11,1	8,4	12,6	12,4	13,3
		27.2	7,3				
		27.3	6,8				
	28	28.1	14,7	12,6	18,9	11,3	15,3
		28.2	10,8				
		28.3	12,2				
29	29.1	5,0	6,1	9,1	12,2	15,8	
	29.2	8,0					
	29.3	5,2					
35	35.1	8,6	6,9	10,3	24,6	28,1	
	35.2	8,0					
	35.3	4,0					
38	38.1	7,6	12,1	18,2	9,2	11,9	
	38.2	15,8					
	38.3	13,0					
41	41.1	5,6	7,0	10,6	22,3	32,1	
	41.2	7,3					
	41.3	8,2					

* = In Anlehnung an [38]: Mindestschichtdicke = 1,5 x Eindringtiefe

■ Der Beschichtungskörper war stellenweise vollständig durchfeuchtet (nach Belastung mit einem Wasserdruck von 0,5 bar über drei Tage); als größte Eindringtiefe wird die Beschichtungsstärke des Probekörpers angesetzt

4.3.4.2 Polyurethanbeschichtungen

7 der 16 mit Polyurethan beschichteten Schächte (Nr. 12, 13, 16, 20, 33, 36 und 42) zeigten sich bei der optischen Inspektion (einschließlich Abklopfen der Wandung) in einwandfreiem Zustand (vgl. z.B. Abb. 109). Sie waren frei von sichtbaren Undichtigkeiten, Fehlstellen und Blasen in der Wandung und ließen bei Abklopfen keine Hohlstellen erkennen. Die Zu- und Abläufe waren bündig und dicht angebunden.

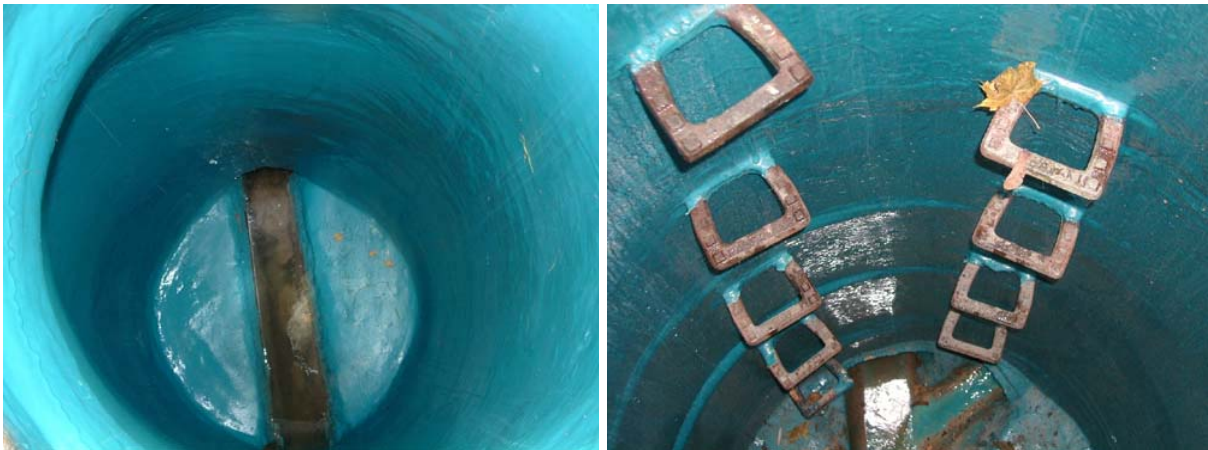


Abb. 109: Beispiele für Polyurethanbeschichtungen ohne sichtbare Mängel

Bei 8 der 16 mit Polyurethan beschichteten Schächte zeigten sich in der optischen Inspektion (einschließlich Abklopfen) deutliche Mängel, wie **Hohlstellen, Fehlstellen oder Undichtigkeiten** in der Beschichtung (Abb. 110). Darüber hinaus wies die Beschichtung des Schachtes Nr. 30 bereits nach 3 Wochen so starke Mängel auf, dass diese durch die ausführende Fachfirma wieder entfernt wurde. Bei 3 der verbleibenden 8 Schächte wurden **Blasen** in der Beschichtung bzw. **Hohlstellen** hinter der Beschichtung festgestellt. 5 Schächte zeigten **Fehlstellen in der Beschichtung**, wie z.B. unbeschichtete Bereiche oder mangelhafte Aushärtung des Polyurethanmaterials. Bei einem Schacht waren **Undichtigkeiten** unterhalb eines vor dem Beschichtungsvorgang nicht demontierten Steigeisens vorhanden. Eine höhere Schadenshäufigkeit bei den durch Straßenverkehr hochbelasteten Schächten wurde nicht festgestellt. Tabelle 40 gibt eine detaillierte Übersicht über die Ergebnisse der optischen Inspektion in mittels Polyurethanbeschichtungen sanierten Schächten.



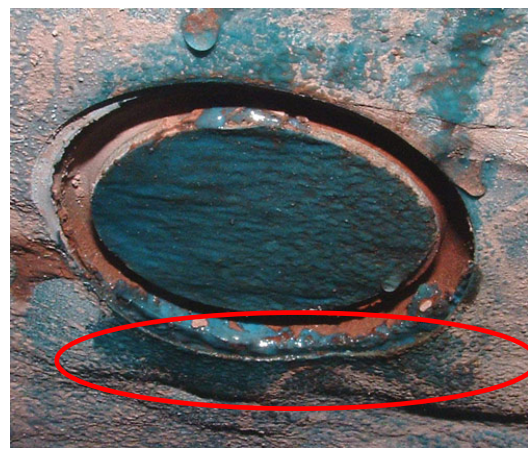
A



B



C



D

*Abb. 110: Beispiele für Polyurethanschachtbeschichtungen mit optisch feststellbaren Mängeln; **A:** Wassergefüllte Blase im unteren Bereich des Schachtes. **B:** Fehlstelle entlang einer Laufnase. **C:** Nicht ausreichende Beschichtung unterhalb eines Zulaufes. **D:** Mangelhafte Aushärtung der Polyurethanbeschichtung.*

Tabelle 40: Ergebnisse der optischen Inspektion in mittels Polyurethanbeschichtungen sanierten Schächten

Schacht Nr.	Material	OV ¹⁾	AA ²⁾	Hohlstellen	Undichtigkeiten	Fehlstellen	Gesamtbewertung ³⁾
5	Beton, undicht ohne Korrosion	H	A	/	nicht beschichtete Stelle (ca. 3 x 3 cm) unter einem Zulauf		○
6	Beton, undicht ohne Korrosion	H	A	/	unterhalb eines Steigeisens leicht undicht	/	○
12	Mauerwerk, undicht ohne Korrosion	H	S	keine Mängel			+
13	Mauerwerk Korrosion	H	S	keine Mängel			+
16	Beton, undicht ohne Korrosion	H	S	keine Mängel			+
20	Beton, undicht ohne Korrosion	H	S	keine Mängel			+
21	Beton, undicht ohne Korrosion	H	S	drei Blasen, ca. 30x10cm, ca. 30x20cm und ca. 25x25cm im unteren Bereich des Schachtes (Beschichtung auf Mauerwerk)	nicht beschichtete Stelle (ca. 2 x 2 cm) unter einem Zulauf		-
22	Mauerwerk, undicht ohne Korrosion	H	S	/	/	zwei „Laufnasen im oberen Bereich, jeweils unbeschichteter Spalt von 1-2 mm Breite	○
24	Mauerwerk, undicht ohne Korrosion	H	A	zwei Blasen (ca. 15 cm Durchmesser) im unteren Bereich des Schachtes zwischen den Steigeisen	/	/	○
26	Mauerwerk Korrosion	H	A	Hohlstelle im Konus (ca. 20 x 80 cm) direkt unter Auflagering	/	/	○
30	Mauerwerk, undicht ohne Korrosion	H	A	die gesamte Beschichtung wurde von der ausführenden Firma nach ca. 4 Wochen entfernt, da sich die Beschichtung in weiten Bereichen von der Schachtwandung bzw. vom Gerinne und der Berme abgelöst hatte			-
33	Mauerwerk, undicht ohne Korrosion	H	A	keine Mängel			+
36	Mauerwerk, Korrosion	H	S	keine Mängel			+
37	Mauerwerk, Korrosion	H	A	/	/	nur die oberste Schicht der Beschichtung ausgehärtet, darunter zähflüssiges Material	-
39	Beton, Korrosion	H	S	/	/	unbeschichteter Spalt unter dem Konus (ca. 30 x 1 cm)	○
42	Beton, Korrosion	H	S	keine Mängel			+

1) OV = Oberflächenvorbereitung, H = Reinigung mit Wasserhochdruck (ca. 120 bar) unter Verwendung einer Handlanze

2) AA = Auftragsart des Polyurethans, A = Auftrag im Anspritzverfahren, S = Auftrag im Sprüh-Schleuderverfahren

3) rot/- = Häufung von Mängeln, grvierende Mängel oder ganzer Beschichtungskörper schadhaft

gelb/o = örtlich sehr begrenzt auftretende Mängel bzw. Mängel leicht behebbar

grün/+ = keine Mängel in der optischen Inspektion (einschließlich Abklöpfen) erkennbar

An den 16 mit Polyurethan beschichteten Schächten wurden Prüfungen der **Haftzugfestigkeit der Beschichtung** in Anlehnung an ZTV-SIB90 [63] bzw. DAfStb-Instandsetzungs-Richtlinie [50] an jeweils drei Stellen der Beschichtung (im oberen, mittleren und unteren Bereich des Schachtes) durchgeführt (Tabelle 41 und Tabelle 42). Ähnlich wie bei den Prüfungen der Abreißfestigkeit (vgl. Abschnitt 4.3.1.2) und den Prüfungen der Haftzugfestigkeit der Mörtelbeschichtungen (vgl. Abschnitt 4.3.4.1) sind auch hier im Einzelfall die Versagensart bzw. die Bruchbilder bei der Bewertung zu berücksichtigen. Bei 17 Prüfungen versagte der Prüfkörper zu mehr als 25 % in der Klebefuge, so dass die Ergebnisse nur als Hinweis auf die Beschichtungsqualität angesehen werden können. Bei 14 dieser 17 Prüfungen wurden gute bis sehr gute Haftzugwerte (0,8 - 5,1 N/mm²) erzielt, die über den Mindestanforderungen der maßgeblichen Richtlinien bzw. Sachstandsberichten liegen.

Grundsätzlich wiesen die gemessenen **Haftzugfestigkeiten große Schwankungen** auf. Bei den Polyurethanbeschichtungen auf Mauerwerk lag der höchste Wert bei 1,0 N/mm² (Schacht Nr. 20, unten), während in zwei Fällen (Schacht Nr. 24, unten / Nr. 36, oben) keine Haftzugfestigkeiten gemessen werden konnten, da sich die Beschichtung schon zu Beginn der Prüfung vom Mauerwerk löste. Bei den Polyurethanbeschichtungen auf Beton lag der höchste Wert bei 5,1 N/mm² (Schacht Nr. 5-mitte, Versagen in der Klebefuge), während in einem Fall eine Haftzugfestigkeit von nur 0,4 N/mm² gemessen wurde (Schacht Nr. 42-unten).

Die ermittelten Haftzugfestigkeiten der Polyurethanbeschichtungen auf Mauerwerk waren mit durchschnittlich 0,4 N/mm² wesentlich geringer als die der Polyurethanbeschichtungen auf Beton (Ø 2,0 N/mm²). Bei 5 Prüfungen versagte das Mauerwerk bei geringer Zugspannung ($\leq 0,5$ N/mm²). Bei weiteren 7 Prüfungen versagte die Trennfuge zwischen Beschichtungsmaterial und Untergrund ebenfalls bei geringer Zugspannung ($\leq 0,5$ N/mm²). Als Ursache für diese frühzeitigen Versagen sind **Schwächen in der Oberflächenvorbehandlung bzw. zu hohe Restfeuchten des Untergrundes** anzuführen.

In vielen Fällen, in denen die Schächte vor dem Auftrag des Polyurethans zunächst mit mineralischem Mörtel vorbeschichtet worden waren, lag das **Versagen in der mineralischen Vorbeschichtung** selbst bzw. in der Trennfuge zwischen Vorbeschichtung und Untergrund (Schacht Nr. 22-mitte, 33-unten, 36-oben/mitte, 37-oben/mitte/unten, 42-mitte).

Tabelle 41: **Haftzugfestigkeiten der Polyurethanbeschichtungen auf den Schachtwandungen der Mauerwerksschächte** (ermittelt in Anlehnung an ZTV-SIB90 [63] bzw. DAfStb-Instandsetzungs-Richtlinie [50])

Schacht Nr.	Abreißfestigkeit des unvorbehandelten Untergrundes [N/mm ²]			Haftzugfestigkeit der Beschichtung [N/mm ²]													
	oberer Schachtbereich	mittlerer Schachtbereich	unterer Schachtbereich	oberer Schachtbereich				mittlerer Schachtbereich				unterer Schachtbereich					
	BK ¹⁾	BK ¹⁾	BK ¹⁾	BS ¹⁾	BT ¹⁾	BU ¹⁾	BK ¹⁾	BS ¹⁾	BT ¹⁾	BU ¹⁾	BK ¹⁾	BS ¹⁾	BT ¹⁾	BU ¹⁾	BK ¹⁾		
Undicht ohne Korrosion	12	1,0*	0,4	0,3	0,8*				0,7				0,4				
		100	50	90	0	0	0	100	0	100	0	0	0	0	0	0	100
	22	2,3	1,3	0,4	2,1*				2,3*				0,3				
		100	90	40	0	0	0	100	0	100	0	0	0	0	0	0	100
	24	0,4	2,2	0,2	1,5*				1,1*				0,0				
	100	90	100	0	0	0	100	0	0	0	0	100	0	100	0	0	
	30	3,0	0,7	0,6	/				/				/				
		100	10	0	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	
	33	0,2	0,1	0,2	0,9				0,4				0,3				
		100	100	100	0	100	0	0	0	100	0	0	0	0	100	0	0
Korrosion	13	0,5	2,8	1,2	0,2				0,3				0,3				
		70	0	0	0	0	100	0	0	0	100	0	0	0	0	100	0
	26	0,3	1,9	0,0	0,2				0,2				0,1				
		100	100	100	0	100	0	0	0	100	0	0	0	0	0	100	0
	36	0,2	0,8	3,1	0,0				0,7				0,7				
		100	80	100	0	100	0	0	0	100	0	0	0	0	0	100	0
	37	1,6	3,5	1,2	0,2				0,6				0,7				
		100	100	100	0	100	0	0	0	100	0	0	0	0	100	0	0

Anmerkungen

- 1) = in den Zeilen unter den Festigkeitswerten sind jeweils die prozentualen Oberflächenanteile der verschiedenen Versagensarten dargestellt (BS: Bruch im Sanierungsmaterial / BT: Bruch in der Trennfuge zwischen Sanierungsmaterial und Untergrund / BU: Bruch im Untergrund / BK: Bruch in der Klebefuge)
- * = die dargestellten Festigkeiten wurden im Bereich der Betonoberteile der Mauerwerksschächte ermittelt
- der dargestellte Haftzugwert kann nur als ergänzender Hinweis auf die Beschichtungsqualität angesehen werden, da der Prüfkörper zu mehr als 25 % in der Klebefuge versagte

Tabelle 42: **Haftzugfestigkeiten der Polyurethanbeschichtungen auf den Schachtwandungen der Schächte aus Betonfertigteilen** (ermittelt in Anlehnung an ZTV-SIB90 [63] bzw. DAfStb-Instandsetzungs-Richtlinie [50])

Schacht Nr.	Abreißfestigkeit des unvorbehandelten Untergrundes [N/mm ²]			Haftzugfestigkeit der Beschichtung [N/mm ²]											
	oberer Schachtbereich	mittlerer Schachtbereich	unterer Schachtbereich	oberer Schachtbereich				mittlerer Schachtbereich				unterer Schachtbereich			
	BK ¹⁾	BK ¹⁾	BK ¹⁾	BS ¹⁾	BT ¹⁾	BU ¹⁾	BK ¹⁾	BS ¹⁾	BT ¹⁾	BU ¹⁾	BK ¹⁾	BS ¹⁾	BT ¹⁾	BU ¹⁾	BK ¹⁾
5	2,2	2,8	2,6	0,3				5,1				5,0			
	100	100	100	0	0	0	100	0	0	0	100	0	100	0	0
6	1,9	1,2	2,1	2,1				2,3				1,7			
	80	40	50	0	0	0	100	0	0	0	100	0	90	10	0
16	3,5	3,7	4,2	1,2				2,2				2,1			
	100	100	90	0	0	0	100	0	0	0	100	0	0	0	100
20	0,8	2,3	1,6	2,0				1,4				1,0*			
	100	100	90	0	0	0	100	0	0	0	100	0	0	0	100
21	3,5	2,0	1,4	1,5				3,4				0,5*			
	0	100	100	0	10	90	0	0	0	0	100	0	0	100	0
39	0,9	2,1	0,7	2,6				0,6				1,4			
	0	30	30	0	0	100	0	0	0	100	0	0	0	100	0
42	0,7	0,7	0,7	0,9				0,6				0,4			
	50	50	50	100	0	0	0	0	60	40	0	0	100	0	0

Anmerkungen

- 1) = in der Zeile unter den Festigkeitswerten sind jeweils die prozentualen Oberflächenanteile der verschiedenen Versagensarten dargestellt (BS: Bruch im Sanierungsmaterial / BT: Bruch in der Trennfuge zwischen Sanierungsmaterial und Untergrund / BU: Bruch im Untergrund / BK: Bruch in der Klebefuge)
- * = die dargestellten Festigkeiten wurden im Bereich des Mauerwerks im unteren Teil der Betonschächte ermittelt
- der dargestellte Haftzugwert kann nur als ergänzender Hinweis auf die Beschichtungsqualität angesehen werden, da der Prüfkörper zu mehr als 25 % in der Klebefuge versagte

Ergänzend wurden an den 16 Polyurethanbeschichtungen Kernbohrungen an jeweils 5 Stellen (über die Tiefe des Schachtes verteilt; Prüfung 1 im Sohlenbereich, Prüfung 5 im Konus) der Beschichtung ausgeführt, um die **Beschichtungsdicke** zu messen. Tabelle 43 gibt eine Übersicht über sämtliche gemessene Schichtstärken an den Polyurethanbeschichtungen. Die durchschnittliche Beschichtungsdicke sämtlicher untersuchter Polyurethanbeschichtungen betrug 4,1 mm, wobei sich im Mittel kaum Unterschiede zwischen den beiden Auftragsarten (Anspritz- bzw. Sprüh-Schleuderverfahren) bzgl. der aufgetragenen Schichtdicken ergaben (Anspritzverfahren: 3,8 mm; Sprüh- Schleuderverfahren: 4,3 mm). Unabhängig von der Auftragsart zeigten sich deutliche Schwankungen in der Schichtstärke über die Schachtwandung. Diese Schwankungen waren bei Einsatz des Sprüh-Schleuderverfahrens (Ø-Variationskoeffizient: 20,1 %) im Mittel geringer als bei Einsatz des Anspritzverfahrens (Ø-

Variationskoeffizient: 32,2 %. Wird eine gleichmäßige Schichtdicke angestrebt, bietet das Sprüh-Schleuderverfahren daher möglicherweise Vorteile.

Tabelle 43: Übersicht über sämtliche gemessenen Schichtstärken an den Polyurethanbeschichtungen

	Schacht-Nr.	Prüfung 1	Prüfung 2	Prüfung 3	Prüfung 4	Prüfung 5	Mittelwert	Variationskoeffizient	
		[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[%]	
Polyurethanbeschichtung	Anspritzverfahren	6	5,7	7,6	4,4	/	5,7	5,9	22,5
		24	4,6	6,4	2,3	3,2	4,1	4,1	37,6
		26	3,0	3,9	2,6	3,3	4,2	3,4	19,2
		33	2,1	3,5	/	/	2,1	2,5	32,3
		37	4,7	3,8	3,2	2,2	0,9	2,9	49,2
	Sprüh-Schleuderverfahren	5	5,0	6,9	8,9	5,7	/	6,6	25,8
		12	3,2	2,9	3,7	3,3	4,8	3,6	20,7
		13	3,7	4,3	4,1	4,4	3,7	4,0	8,1
		16	6,6	5,1	6,2	7,6	/	6,4	16,2
		20	2,2	4,3	5,2	4,1	3,5	3,9	28,8
		21	3,6	4,1	3,4	3,7	3,5	3,7	7,4
		22	2,6	2,7	2,2	5,3	2,9	3,1	39,3
		30	\	\	\	\	\	\	\
		36	5,6	5,6	5,4	5,1	4,9	5,3	6,0
39	2,7	3,2	3,3	2,6	1,6	2,7	25,2		
42	3,2	2,9	2,9	4,6	4,5	3,6	23,6		

Anmerkungen:

/ = es wurde keine Prüfung der Schichtdicke vorgenommen

\ = die Beschichtung des Schachtes Nr. 30 wurde von der ausführenden Fachfirma bereits vor der Messung wieder entfernt

Vor dem Hintergrund der o.a. und detailliert dargestellten Ergebnisse zeigt Abb. 111 eine Übersicht über die Untersuchungsergebnisse für die einzelnen in Tabelle 14 bis Tabelle 20 beschriebenen Schachtbauwerke mit Blick auf die im Rahmen des Vorhabens gezielt variierten Untersuchungsrandbedingungen. Ergänzende Hinweise zu den Besonderheiten bei der Sanierungsausführung können Abschnitt 4.3.3 entnommen werden. Der Schwerpunkt dieser Übersicht liegt auf den Ergebnissen der optischen Inspektion, der Haftzugfestigkeitsprüfung und der Überprüfung der Wasserdichtheit (vgl. Abschnitt 4.3.1.4)

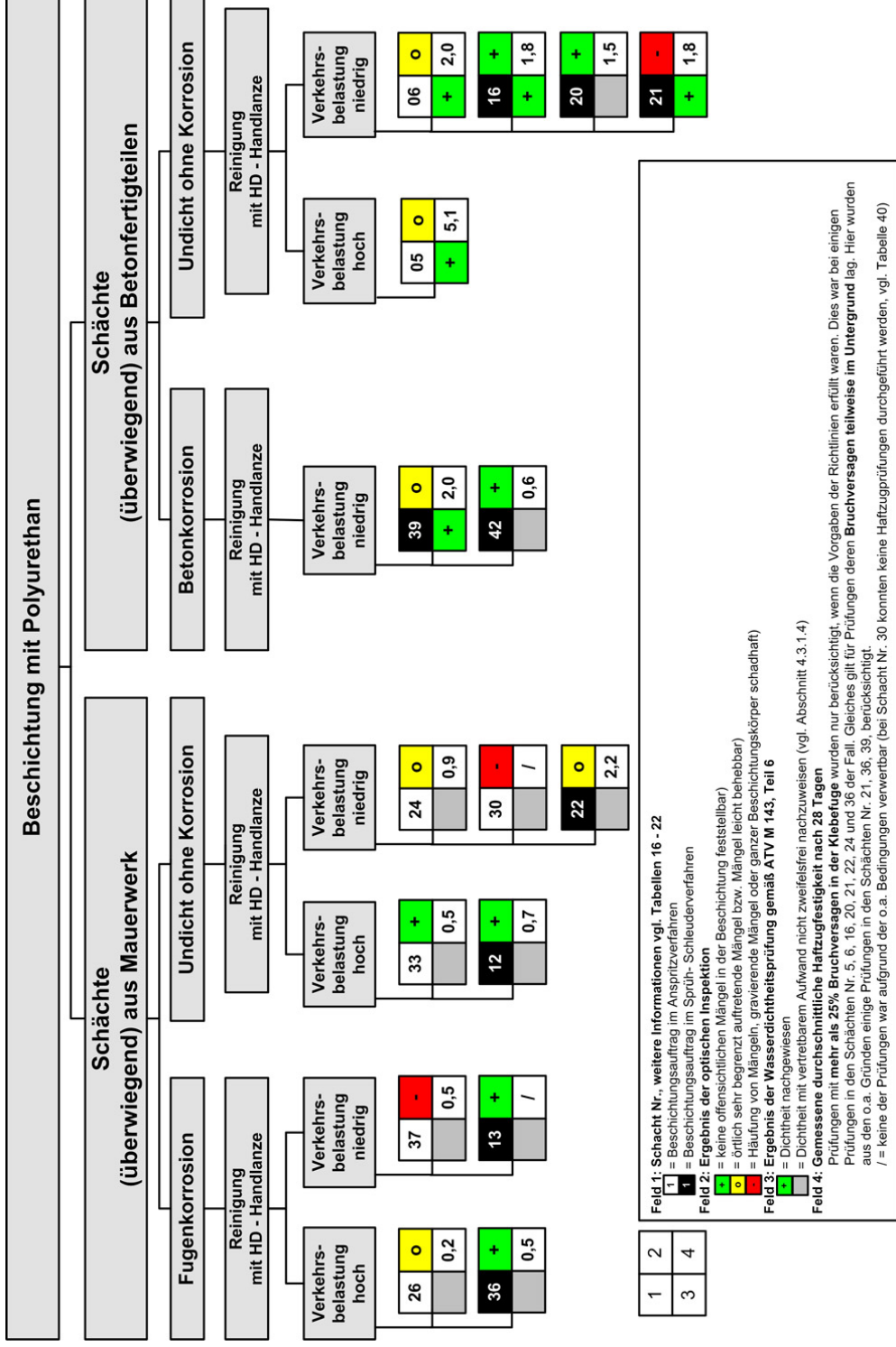


Abb. 111: Übersicht über die Untersuchungsergebnisse der optischen Inspektion, der Prüfung der Haftzugfestigkeit und der Überprüfung der Wasserdichtheit an den 16 im Rahmen des Projektes mit Polyurethan beschichteten Abwasserschächten, weitere Informationen vgl. Tabelle 14 bis Tabelle 20 und Abschnitt 4.3.3

Über diese grundsätzlichen Ergebnisse hinaus konnten weitere Erkenntnisse aus der optischen Inspektion und den Prüfungen der in situ gewonnenen Polyurethanproben abgeleitet werden, die nachfolgend zusammengefasst sind.

Grundsätzlich konnten keine wesentlichen Unterschiede in der **Oberflächenstruktur der Beschichtungen** zwischen den beiden verschiedenen Auftragsarten festgestellt werden. Sämtliche im Anspritzverfahren und die meisten der im Sprüh-Schleuderverfahren aufgetragenen Beschichtungen besaßen eine sehr glatte Oberfläche. Bei einigen der im Sprüh- Schleuderverfahren aufgetragenen Beschichtungen lief das Beschichtungsmaterial während des Beschichtungsvorgangs an der Schachtwandung herunter, so dass sich „Laufnasen“ bildeten (vgl. Abb. 112).

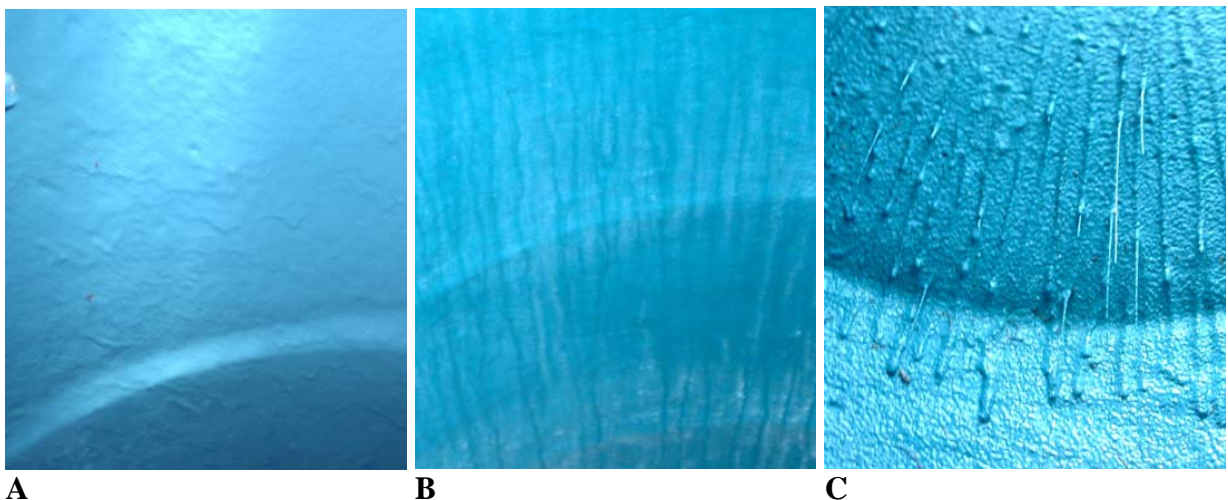


Abb. 112: Beispiele für die Oberflächenstruktur verschiedener Polyurethanbeschichtungen. **A:** Glatte Oberfläche bei Auftrag im Anspritzverfahren. **B:** Glatte Oberfläche bei Auftrag im Sprüh-Schleuderverfahren. **C:** „Laufnasen“-Bildung bei Auftrag im Sprüh-Schleuderverfahren.

Bei einem der drei Schächte (Schacht Nr. 26), bei denen **Hohlstellen** hinter der Beschichtung vorlagen, konnte die Hohlstelle nur durch ein Abklopfen der Beschichtung festgestellt werden. Bei den beiden anderen Schächten (Schacht Nr. 21 und 24) waren die Blasen bei der zweiten Nachuntersuchung deutlich zu erkennen (vgl. auch Abb. 113). Nachdem die Blasen aufgeschnitten worden waren zeigte sich, dass sich in diesen Fällen die Vorbeschichtung aus Mörtel vermutlich aufgrund des hydrostatischen Grundwasserdrucks von der Schachtwandung gelöst hatte. Die Blasen waren komplett mit Wasser gefüllt, das Mauerwerk dahinter auch einige Zeit nach dem Abfließen des Wassers sehr nass. Grundsätzlich kann festgehalten werden, dass sämtliche Polyurethanbeschichtungen, hinter denen Hohlstellen festgestellt wurden, auf Mauerwerk aufgetragen worden waren.



A **B**
 Abb. 113: Wassergefüllte Blase in einer Polyurethanbeschichtung auf Mauerwerk.
A: Ansicht bei der zweiten Nachuntersuchung nach 6 Monaten. **B:** Ansicht nach
 Aufschneiden der Blase.

Fehlstellen in der Beschichtung lagen i.d.R. in Form von nicht beschichteten Bereichen vor. Bei drei Schächten waren kleinere Bereiche nicht ausreichend beschichtet, so dass der Untergrund sichtbar war. In zwei dieser Schächte lagen diese Bereiche unterhalb von seitlichen Zuläufen in der Schachtwandung (Schacht Nr. 5 und Nr. 21, vgl. Abb. 110-C). Bei Schacht Nr. 39 war unterhalb des Konus ein ca. 1 cm breiter Spalt nicht komplett mit der Polyurethanbeschichtung verschlossen worden (vgl. Abb. 114). Grundsätzlich waren die seitlichen Zuläufe bündig und dicht an die Beschichtung angebunden worden.



Abb. 114: Nicht komplett verschlossener Spalt unterhalb
 des Konus von Schacht Nr. 39

Bei einer Beschichtung (Schacht Nr. 22) waren stark ausgeprägte „**Laufnasen**“ im oberen Bereich des Schachtes zu erkennen. Hinter zwei dieser Laufnasen hatten sich Hohlstellen gebildet. In einem Fall (Schacht Nr. 37) war die Polyurethanbeschichtung im oberen Bereich des Schachtes nur in einer sehr dünnen, oberflächennahen Schicht ausgehärtet, die darunter liegenden Schichten waren **unzureichend ausgehärtet** und zähflüssig (vgl. Abb. 110).

Grundsätzlich waren die **Steigeisen** gut an die Beschichtung angebunden. Nur in einem Fall (Schacht Nr. 6) waren leichte Undichtigkeiten unterhalb eines Steigeisens sichtbar (vgl. Abb. 115).

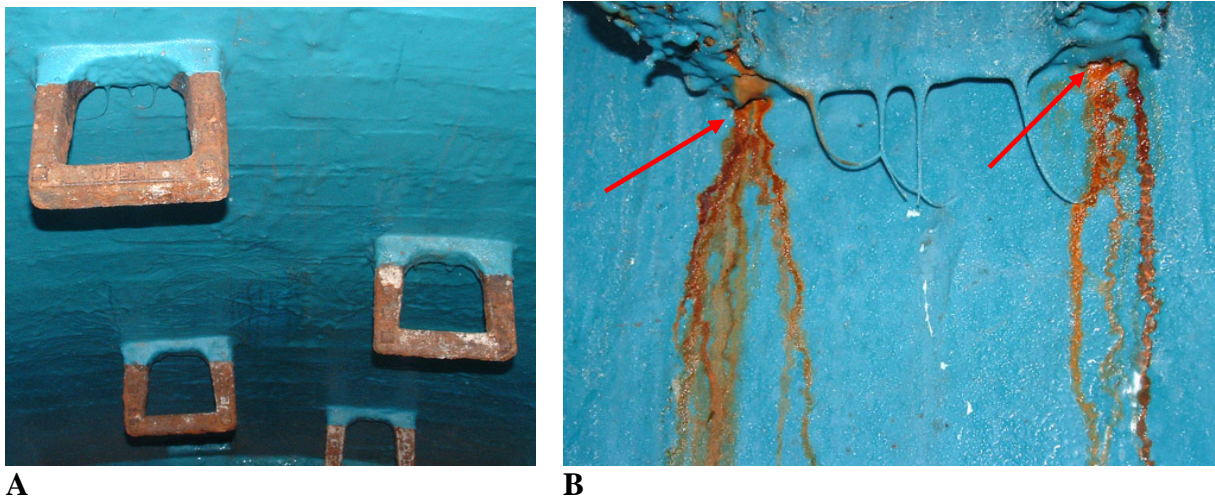


Abb. 115: Anbindung von Polyurethanbeschichtungen an Steigeisen.
A: Bündige und dichte Anbindung. **B:** Undichtigkeiten unterhalb eines Steigeisens.

Die **Anbindungen der Zu- und Abläufe im Sohlbereich** waren bei sämtlichen Schächten bündig ausgeführt (vgl. z.B. Abb. 116). In zwei Schächten (Schächte Nr. 6 und 16) waren in die im Sohlenbereich liegenden Zu- und Abläufe Kurzliner aus einem Polyurethanharz und einem Glasgewebe (Pointliner-System) von ca. 60 cm Länge über die Rohreinbindungen, also vom Schachtgerinne bis in das erste Rohr hinein, eingeklebt worden. Die Kurzschläuche ragten jeweils ca. 2 cm in den Schacht hinein, so dass die später aufgetragenen Polyurethanbeschichtungen gut an diese angebunden werden konnten (vgl. Abb. 116).



A



B

Abb. 116: Beispiele für die Anbindung der Zu- und Abläufe im Sohlenbereich.

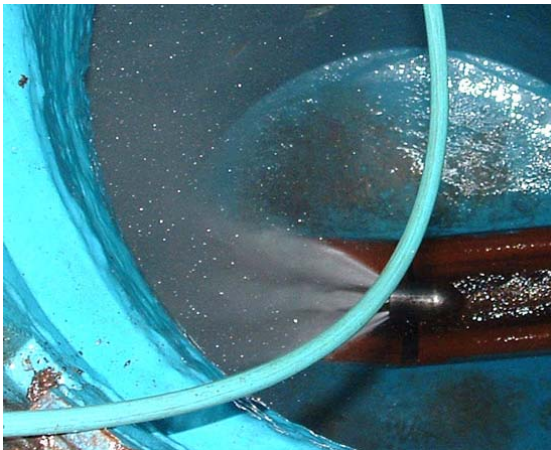
A: Bündige Anbindung eines Zulaufes. **B:** Anbindung einer Beschichtung aus Polyurethan an einen Kurzschlauch im Bereich eines Zulaufes auf der Sohle des Schachtes.

Um die Auswirkungen von betrieblichen Belastungen, wie z.B. Wasserhochdruckspülungen des Kanals, auf die Dauerhaftigkeit der Kurzschläuche abschätzen zu können, wurden die Zu- und Abläufe der betreffenden Schächte in Anlehnung an den **Hamburger Spülversuch** [81] einer Belastung durch Wasserhochdruck ausgesetzt (vgl. Abb. 117-A). Der Zustand der Kurzliner und der Übergangsbereiche zwischen Kurzliner und Altrohr wurde jeweils vor und nach der Belastung durch eine Kanal-TV-Befahrung dokumentiert (vgl. Abb. 117-b). Tabelle 44 gibt einen Überblick über die wesentlichen Prüfparameter.

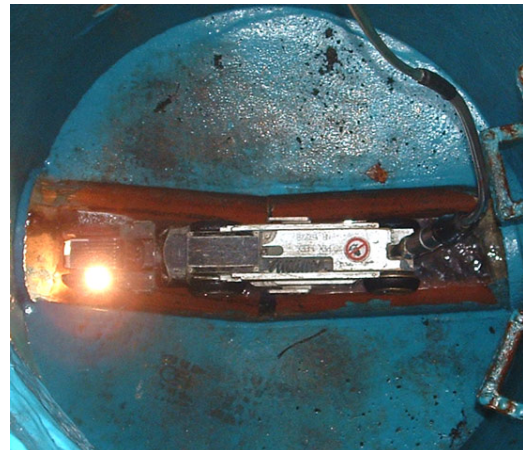
Tabelle 44: Verwendete Prüfparameter bei der In-situ-Belastung der Kurzschläuche aus Polyurethanharz und einem Glasgewebe durch Wasserhochdruck

Wasserdruck am Fahrzeug:	100 bar
Wasserdruck an der Düse:	ca. 80 bar
Prüfdüse:	BA608-300 (Düsenstrahlwinkel 30°, 8 Düseneinsätze, Düseneinsatzdurchmesser: 2,4 mm, Hersteller: Dietrich Baas GmbH)
Spülwassermengen:	ca. 280 l/sec
Vorlaufgeschwindigkeit:	ca. 0,1 m/sec
Rückzuggeschwindigkeit:	ca. 0,5 m/sec
Reinigungsdurchläufe:	30

Bei beiden Schächten konnten keine Veränderungen an den Polyurethan-Kurzlinern nach den 30 Reinigungsdurchgängen festgestellt werden (vgl. Abb. 117 C-F). Die Kurzliner lagen bündig am Altrohr an, ein Abrieb war nicht erkennbar.



A



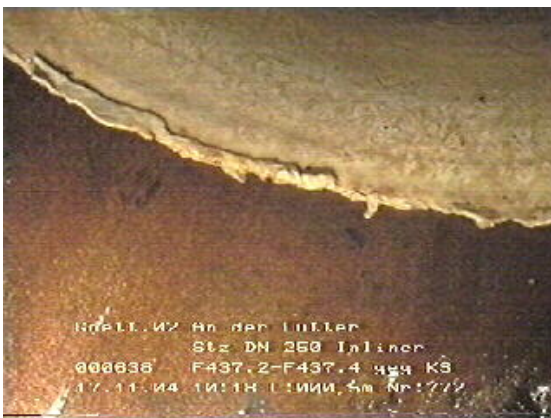
B



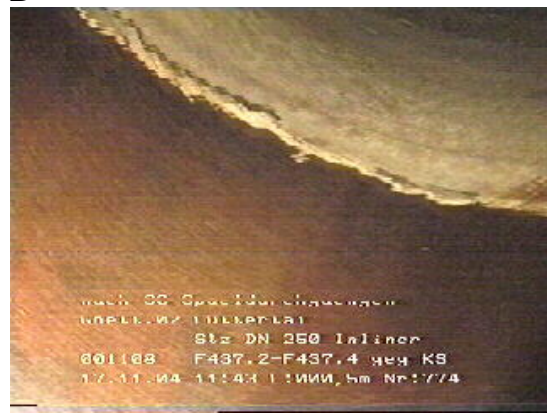
C



D



E



F

Abb. 117: Spülversuche zur ersten Abschätzung der Betriebstauglichkeit von Polyurethan-Kurzlinern zur Abdichtung der Rohreinbindungen in den Zu- und Abläufen von Abwasserschächten. **A:** Hochdruckspülung im Bereich des Zulaufes eines Schachtes. **B:** TV-Befahrung der Einbindungsbereiche. **C:** Polyurethan-Kurzliner vor der Belastung durch Hochdruckspülungen. **D:** Polyurethan-Kurzliner nach der Belastung durch Hochdruckspülungen (30 Reinigungsdurchläufe). **E:** Übergangsbereich Kurzliner-Altrohr vor der Belastung durch Hochdruckspülungen. **F:** Übergangsbereich Kurzliner-Altrohr nach der Belastung durch Hochdruckspülungen.

Die **Sohlen und Bermen** der sanierten Schächte waren i.d.R. in einem guten optischen Zustand (vgl. Abb. 118). Bei drei Schächten (Nr. 12, 16 und 30) wurde der komplette Sohlenbereich, also sowohl die Berme als auch das Gerinne beschichtet (vgl. Abb. 118-a). Bei weiteren drei Schächten (Nr. 33, 36 und 37) wurden zwar die Gerinne und die Bermen nicht saniert, die Beschichtung der Wandung aber bündig und augenscheinlich dicht an die bestehende Berme angebunden (vgl. Abb. 118-c). Bei zehn Schächten (Nr. 5, 6, 13, 20, 21, 22, 24, 26, 39 und 42) wurden ausschließlich die Bermen mit Polyurethan beschichtet (vgl. Abb. 118-b), auch hier waren keine Undichtigkeiten oder Fehlstellen zu erkennen.

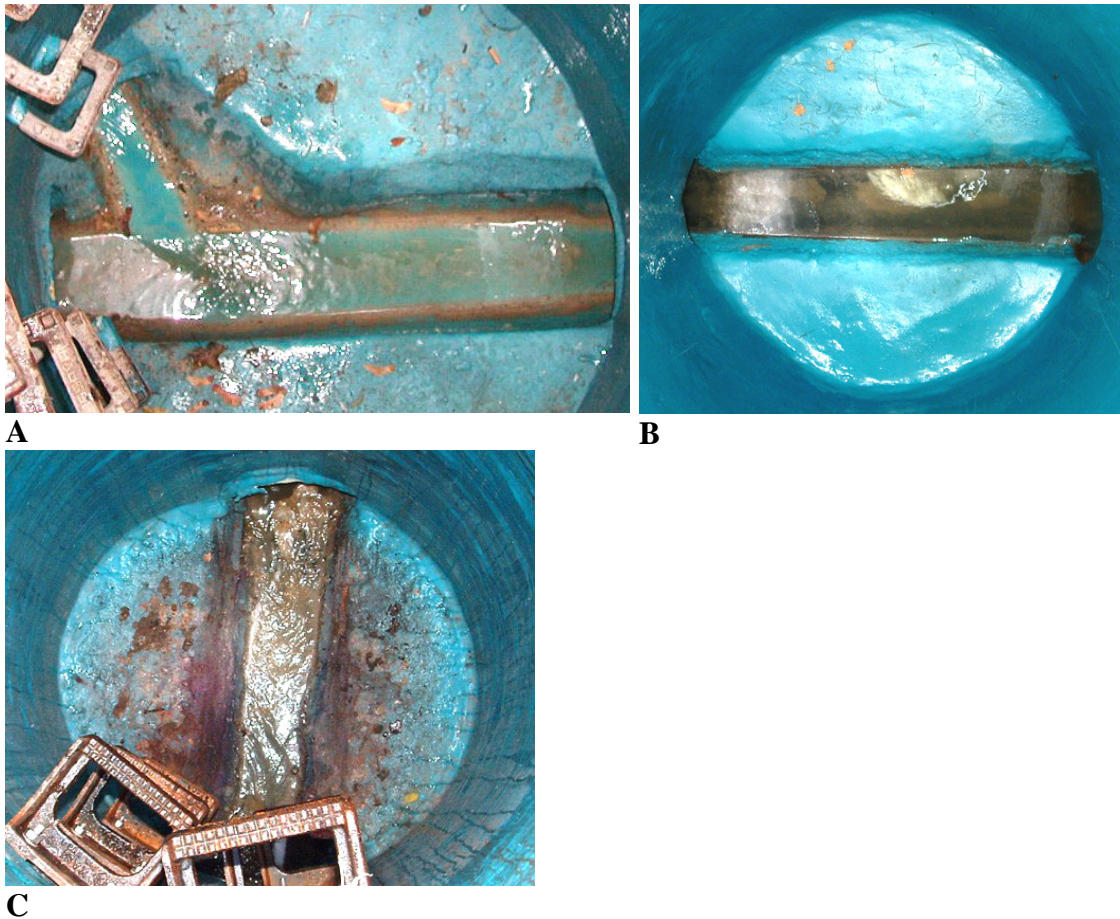


Abb. 118: Ausführung der Schachtsohlen. **A:** Gerinne und Berme beschichtet. **B:** Ausschließliche Beschichtung der Berme. **C:** Vorhandenes Gerinne und Berme unbeschichtet, an Beschichtung der Wandung angebunden.

Bei sämtlichen 16 Polyurethan-Beschichtungsmaßnahmen wurden während des Sanierungsvorganges Werkstoffproben entnommen (vgl. Abb. 119), um die **Zugfestigkeit und den E-Modul** in Laborprüfungen in Anlehnung an DIN EN ISO 527 [76] bestimmen zu können. Eine Ergebnisübersicht zeigt Tabelle 45.

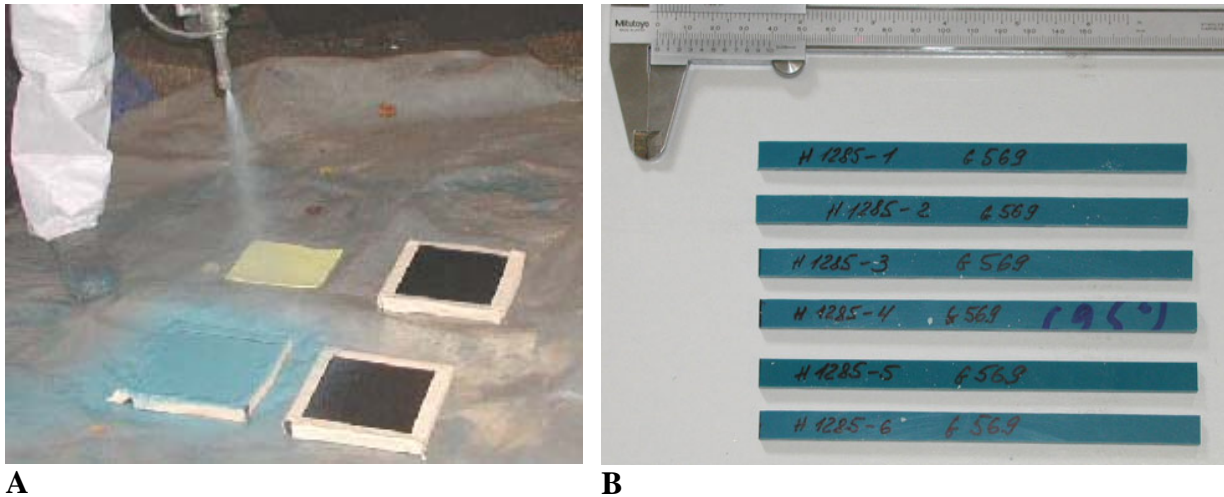


Abb. 119: *In-situ-Polyurethanprobennahme. A: Aufspritzen des Polyurethans auf Schalungen aus PE-HD. B: Zur Prüfung vorbereitete Probekörper.*

Bei der Prüfung einiger Probekörper (vgl. Tabelle 45) versagte der Probekörper in der Nähe des Einspannbereiches, so dass die ermittelten Werte gemäß EN ISO 527-1 [76] nicht in die Auswertung aufgenommen und nur als Hinweis auf die Festigkeit angesehen werden können. Der Mittelwert der **Zugfestigkeiten** der verbleibenden untersuchten Polyurethanproben liegt bei $13,5 \text{ N/mm}^2$ (Variationskoeffizient der Einzelwerte: 25,5 %). Der durchschnittliche **Zug-E-Modul** ergibt sich zu $177,8 \text{ N/mm}^2$ bei einer starken Schwankung der Einzelwerte (Variationskoeffizient: 36,0 %). Besonders an den Proben der Schächte Nr. 26, 30 und 39 wurden nur geringe E-Moduln gemessen, Auffälligkeiten an den Probekörpern konnten nicht festgestellt werden.

Tabelle 45: Zugfestigkeiten und E-Moduln der untersuchten Polyurethanproben

Schacht Nr.	Proben Nr.	Zugfestigkeit [N/mm ²]	E-Modul [N/mm ²]	Mittelwert Zugfestigkeit [N/mm ²]	Mittelwert E-Modul [N/mm ²]
5	1	10,7	212,9	11,1	217,8
	2	10,9	188,1		
	3	11,7	241,3		
	4	10,8	217,2		
	5	11,3	229,3		
6	1	12,9*	213,7*	f ¹⁾	f ¹⁾
	2	12,7*	195,9*		
	3	13,3*	250,5*		
	4	13,2*	247,1*		
	5	13,0*	207,6*		
12	1	14,0*	269,6*	12,9	263,6
	2	12,9	281,2		
	3	12,9	247,3		
	4	12,8	262,3		
	5	12,6*	268,7*		
13	1	13,5	162,7	13,3	244,0
	2	12,7	278,5		
	3	13,7	271,9		
	4	13,3	262,5		
	5	13,2	244,6		
16	1	13,0	175,6	12,7	234,6
	2	13,0	256,3		
	3	12,0	238,9		
	4	12,7	267,5		
20	1	12,3*	212,4*	f ¹⁾	f ¹⁾
	2	13,5*	244,2*		
	3	12,5*	231,2*		
	4	10,8*	216,6*		
	5	12,3*	221,1*		
21	1	13,2*	104,9*	f ¹⁾	f ¹⁾
	2	12,8*	100,2*		
	3	12,5*	245,1*		
	4	11,8*	182,1*		
	5	12,6*	213,2*		
22	1	10,9*	197,0*	f ¹⁾	f ¹⁾
	2	11,0*	188,2*		
	3	10,8*	177,2*		
	4	10,5*	172,7*		
	5	11,0*	153,3*		
24	1	12,7*	261,9*	f ¹⁾	f ¹⁾
	2	13,2*	255,1*		
	3	12,7*	221,6*		
	4	13,1*	257,9*		
	5	12,9*	247,5*		
26	1	12,1	109,8	12,4	105,4
	2	12,7	114,1		
	3	12,0	101,3		
	4	12,8	96,2		
30	1	11,8	88,9	11,1	94,8
	2	10,7	105,7		
	3	10,9	108,3		
	4	10,6	84,0		
	5	11,8	87,1		
33	1	13,9	157,6	15,2	169,3
	2	15,2	169,3		
	3	15,7	177,8		
	4	15,4	162,8		
	5	15,6	179,1		

Fortsetzung siehe nächste Seite

Tabelle 46 (Forts.): Zugfestigkeiten und E-Moduln der untersuchten Polyurethanproben

Schacht Nr.	Proben Nr.	Zugfestigkeit [N/mm ²]	E-Modul [N/mm ²]	Mittelwert Zugfestigkeit [N/mm ²]	Mittelwert E-Modul [N/mm ²]
36	1	12,4	164,9	11,0	139,2
	2	11,7*	124,7*		
	3	12,3	148,1		
	4	9,4	126,5		
	5	9,7	117,5		
37	1	16,9	213,6	15,4	221,8
	2	14,8	224,0		
	3	14,5	223,5		
	4	14,7	215,4		
	5	16,0	232,3		
39	1	12,7	100,9	11,1	84,1
	2	9,0*	65,7*		
	3	10,4	79,1		
	4	10,2	72,3		
42	1	24,0	196,2	22,5	180,9
	2	24,0	200,0		
	3	21,1	154,3		
	4	21,6	175,3		
	5	21,8	178,7		

Anmerkung:

- *) bei der Prüfung versagte der Probekörper in der Nähe des Einspannbereiches, so dass das Prüfungsergebnis gemäß EN ISO 527-1 [76] nicht für die Mittelwertbildung verwendet werden kann
- 1) es liegt kein Mittelwert vor, da sämtliche Probekörper bei der Prüfung in der Nähe des Einspannbereiches versagten

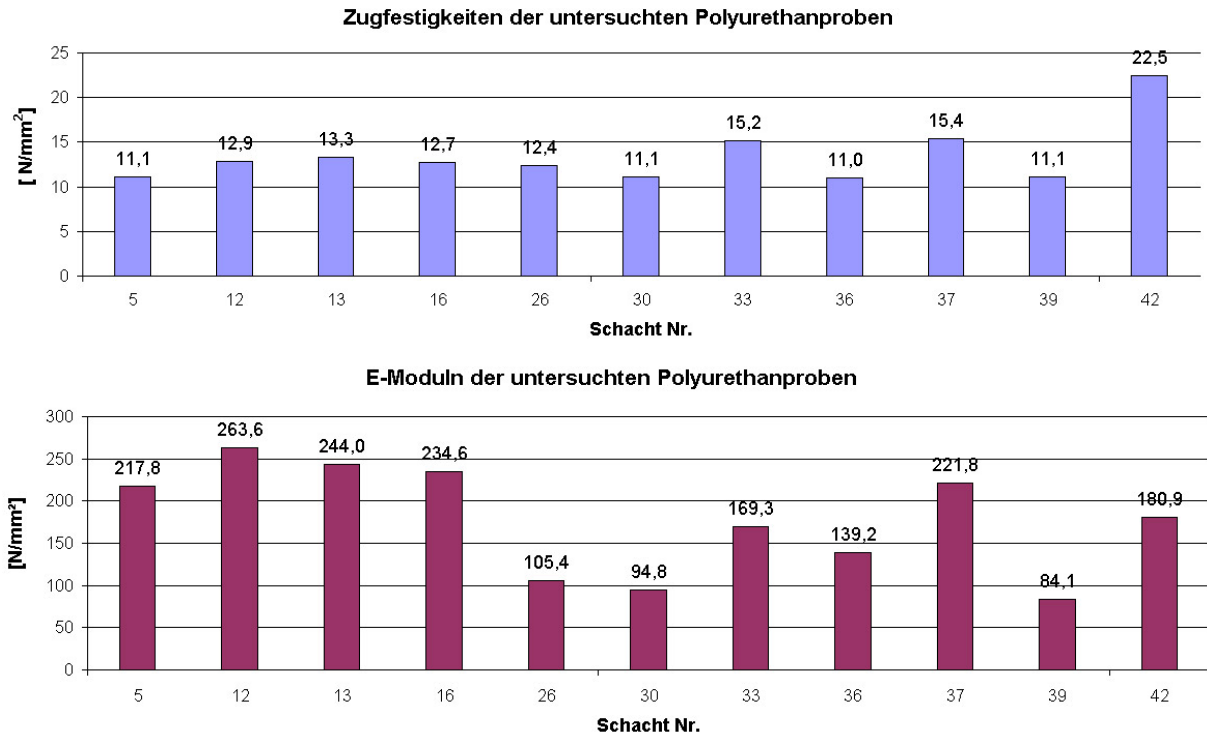


Abb. 120: Zugfestigkeiten und E-Moduln der untersuchten Polyurethanproben

An einem beschichteten Halbrohr wurde die **Abriebfestigkeit** einer Polyurethanbeschichtung im „Darmstädter Kipprinnenversuch“ gemäß DIN 19565 [83] ermittelt. In Abb. 122 ist der gemessene Abrieb nach 50.000, 100.000 und 200.000 Lastwechseln dargestellt.

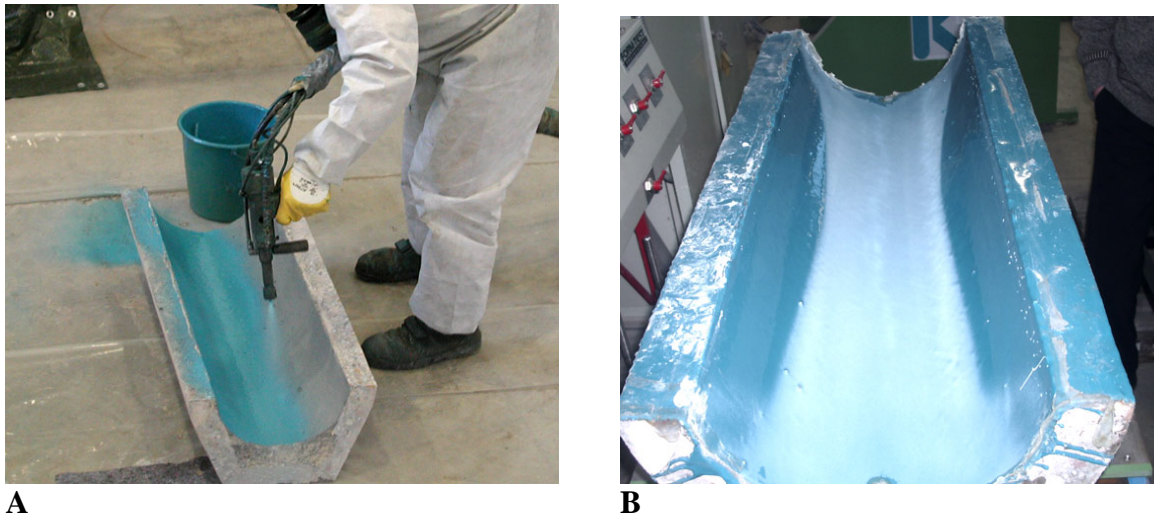


Abb. 121: Bestimmung der Abriebfestigkeit einer Polyurethanbeschichtung im „Darmstädter Kipprinnenversuch. **A:** Beschichtung des Proberohres. **B:** Ansicht der Beschichtung nach 200.000 Lastwechseln.

Der maximale Abrieb nach 50.000, 100.000 bzw. 200.000 Lastwechseln betrug 0,36 mm, 0,46 mm bzw. 0,65 mm. Die Höhe des Abriebs ist damit im Vergleich zu den gemessenen mittleren Schichtdicken einer Polyurethanbeschichtung von ca. 4 mm (vgl. Schichtdickenmessung in diesem Abschnitt) als gering zu bezeichnen.

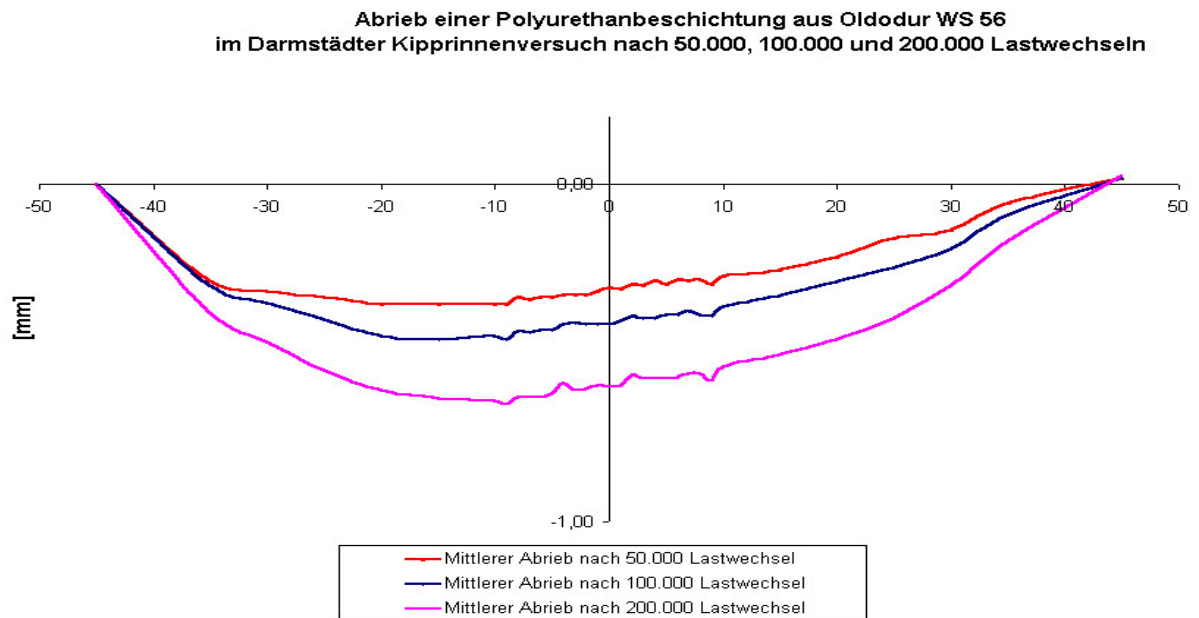


Abb. 122: Abrieb einer Polyurethanbeschichtung im Darmstädter Kipprinnenversuch nach 50.000, 100.000 und 200.000 Lastwechseln.

4.3.4.3 Schlussfolgerungen

Im Folgenden sind die wesentlichen Beobachtungen und Schlussfolgerungen aus den Untersuchungen zum Zustand der Schächte nach Sanierung und der Materialqualität der Beschichtungen zusammengefasst:

Mörtelbeschichtung

- **10 der 26** mit Mörtel beschichteten Schächten zeigten sich bei der **optischen Inspektion in einwandfreiem Zustand**. 16 Schächte wiesen Mängel wie Risse, Hohlstellen, Fehlstellen oder sichtbare Undichtigkeiten in der Beschichtung auf. Bei 7 dieser Schächte zeigten sich nur **örtlich begrenzt auftretende Mängel**, bei 9 Schächten wurde eine Häufung von Schäden oder **gravierende Mängel** festgestellt bzw. war der gesamte Beschichtungskörper mit Rissen versehen. Auffallend ist hierbei, dass bei 5 der Schächte mit gravierenden Mängeln bei der Beschichtung ein fettlösendes Reinigungsmittel eingesetzt und der Mörtel mit einem Mischöl angemischt worden war. Bei zwei weiteren Schächten mit gravierenden Mängeln war die Beschichtung nach Anwendung des Anschleuderverfahrens nicht kontrolliert bzw. nachgearbeitet, in einem weiteren Fall ein falsches Mörtelprodukt eingesetzt worden. Besonders häufig lagen Mängel wie Rissbildung, Hohlstellen und zu geringer Materialauftrag im Bereich der **Steigeisen** vor. In einigen Fällen war die Mindestauftrittstiefe der Steigeisen nach der Beschichtung nicht mehr ausreichend. **Schwierige Geometrien** wie z.B. horizontale Versprünge hatten keine Schwachstellen in den Mörtelbeschichtungen zur Folge. Die Zu- und Abläufe waren i.d.R. gut angebunden. Eine höhere Schadenshäufigkeit bei den durch **Straßenverkehr** hochbelasteten Schächten wurde nicht festgestellt. Die o.a. Mängel in den Mörtelbeschichtungen waren häufig erst bei der zweiten Inspektion nach mehreren Monaten (6 bzw. 3 Monate) eindeutig bzw. erstmalig zu erkennen.
- Grundsätzlich wiesen die gemessenen **Haftzugwerte große Schwankungen** auf. Nur in Einzelfällen wurden hohe Haftzugfestigkeiten von bis zu $2,8 \text{ N/mm}^2$ erzielt, in vielen Fällen war die **Haftzugfestigkeit** aber wesentlich geringer bzw. **kaum gegeben**. Als mögliche Ursache für dieses frühe Versagen sind insbesondere Schwächen in der Oberflächenvorbereitung, der Einsatz von nicht geeignetem Beschichtungsmaterial bzw. die Nicht-Einhaltung der Herstellervorgaben zu nennen.
- Hohe Haftzugfestigkeiten von $\geq 2,0 \text{ N/mm}^2$ wurden nur in Ausnahmefällen (bei 3 der insgesamt 77 Prüfungen) gemessen. Dabei war die Beschichtung stets im **Anschleuderverfahren** aufgetragen worden. In einigen Fällen wurden die Haftzugfestigkeiten der angeschleuderten Beschichtungen durch die zuvor von Hand aufgetragenen Vorbeschichtungen (z.B. in korrodierten Betonschächten bzw. Mauerwerksschächten mit starker Fugenkorrosion) limitiert.

- Auf **Mauerwerk** lag die Haftzugfestigkeit der Mörtelbeschichtungen im Mittel bei ca. $0,6 \text{ N/mm}^2$. Damit wurden die Herstellerangaben zwar deutlich verfehlt, die Anforderungen des maßgeblichen Sachstandberichtes^a scheinen aber durchaus erfüllbar zu sein. Bei drei der 14 untersuchten Mörtelbeschichtungen lagen alle gemessenen Werte über diesen Anforderungen (Schächte Nr. 9, 28, und 38).
- In den **Schächten aus Betonfertigteilen** wurden Haftzugfestigkeiten von im Mittel $0,5 \text{ N/mm}^2$ gemessen. Damit wurden sowohl die Herstellerangaben als auch die Anforderungen der maßgeblichen Richtlinien^b deutlich verfehlt. Keine der 12 untersuchten Mörtelbeschichtungen in Schächten aus Betonfertigteilen erfüllte diese Anforderungen.
- Eine **Schichtdicke** von 10 mm^c scheint nicht in allen Fällen ausreichend zu sein, um eine stellenweise vollständige Wasserdurchdringung der Mörtelbeschichtung zu verhindern. Dies zeigen sowohl die Laborprüfungen als auch stellenweise undichte Beschichtungen in situ. Um das Risiko einer stellenweise vollständigen Wasserdurchdringung zu verringern, sollte eine deutlich größere Mindestschichtdicke als 10 mm , z.B. 20 mm , eingehalten werden. Wird eine gleichmäßige Schichtdicke mit geringem Materialverbrauch angestrebt, bietet das Anschleuderverfahren offensichtlich Vorteile.
- Trotz Schwierigkeiten und Unsicherheiten bei der Ausführung der **Wasserdichtheitsprüfungen** (vgl. Abschnitt 4.3.1.4) bestanden 8 von 17 geprüften Schächten die Prüfung gemäß ATV-M143, Teil 6.
- Fast alle bei den Sanierungsmaßnahmen entnommenen Mörtelmischungen unterschritten die von den Herstellern angegebenen **Biegezug- und Druckfestigkeiten**, teilweise betrug die gemessenen Werte nur ein Drittel der angegebenen Werte.

Polyurethanbeschichtung

- **7 der 16** mit Polyurethan beschichteten Schächte zeigten sich bei der **optischen Inspektion in einwandfreiem Zustand**. 9 Schächte wiesen Mängel wie Hohlstellen, Fehlstellen oder Undichtigkeiten in der Beschichtung auf. 5 dieser Schächte wiesen nur **örtlich begrenzt auftretende Mängel** auf, die fast alle durch eine gründliche Kontrolle nach Abschluss der Beschichtungsarbeiten hätten erkannt und beseitigt werden können. Bei 3 Schächten wurden eine Häufung von Schäden oder **gravierende**

-
- a Mindestanforderung an die Haftzugfestigkeit von Beschichtungsmörteln auf Mauerwerk gemäß GSTT-Informationen Nr. 18 [38]: Im Mittel $\geq 0,5 \text{ N/mm}^2$.
- b Mindesthaftzugfestigkeiten nach ZTV-SIB90 [63] und Instandsetzungs-Richtlinie des DAfStb [50]: Im Mittel $\geq 1,5 \text{ N/mm}^2$ mit einem kleinsten Einzelwert von $1,0 \text{ N/mm}^2$.
- c Mindestschichtdicke für kunststoffmodifizierte Mörtel gemäß Instandsetzungs-Richtlinie des Deutschen Ausschusses für Stahlbeton [50].

Mängel festgestellt bzw. war die gesamte Beschichtung schadhaft. Bei zwei Beschichtungen scheint die Ursache eine zu geringe Haftzugfestigkeit von Polyurethan auf feuchtem Mauerwerk zu sein. In einem weiteren Fall kam es aufgrund eines Ausführungsfehlers vermutlich zu einem falschen Mischungsverhältnis, die Beschichtung war großflächig nicht ausgehärtet. **Schwierige Geometrien** wie z.B. horizontale Versprünge hatten keine Schwachstellen in den Polyurethanbeschichtungen zur Folge. Die Zu- und Abläufe waren i.d.R. gut angebunden. In zwei Fällen wurden im Bereich der **Zu- und Abläufe** im Sohlenbereich mittels Polyurethanharz getränkte Kurzliner eingesetzt, um eine dichte Anbindung der Schachtbeschichtung an den Kanal zu gewährleisten. Betriebliche Belastungen mit Wasserhochdruckspülung führten in diesen Fällen zu keinen wesentlichen Veränderungen an den betroffenen **Anbindungsstellen**. Eine höhere Schadenshäufigkeit bei den durch **Straßenverkehr** hochbelasteten Schächten wurde nicht festgestellt.

- Grundsätzlich wiesen die gemessenen **Haftzugwerte große Schwankungen** auf, so wurden Werte von 0,1 bis 5,1 N/mm² gemessen. Die ermittelten Haftzugfestigkeiten der Polyurethanbeschichtungen auf **Mauerwerk** lagen im Mittel bei 0,4 N/mm². Für diesen Anwendungsfall liegen keine Anforderungen vor. Allerdings hätte nur eine Polyurethanbeschichtung auf Mauerwerk die Anforderungen, die an Mörtelbeschichtungen gestellt werden^a, erfüllt. Als Ursache für dieses frühe Versagen sind insbesondere zu hohe Restfeuchten des Untergrundes und Schwächen in der Oberflächenvorbehandlung anzunehmen. In **korrodierten Mauerwerksschächten** limitierte die Vorbeschichtung aus mineralischem Mörtel in vielen Fällen die Haftzugfestigkeit der Polyurethanbeschichtungen. In den **Schächten aus Betonfertigteilen** wurden Haftzugfestigkeiten von im Mittel 2,0 N/mm² gemessen. Damit scheinen dort sowohl die Herstellerangaben als auch die Anforderungen der maßgeblichen Richtlinien^b erfüllbar zu sein. Vier der 7 Polyurethanbeschichtungen in den Schächten aus Betonfertigteilen erfüllten diese Anforderungen.
- Wird eine gleichmäßige **Schichtdicke** angestrebt, bietet das Sprüh-Schleuderverfahren möglicherweise Vorteile.
- Trotz Schwierigkeiten und Unsicherheiten bei der Ausführung der **Wasserdichtheitsprüfungen** (vgl. Abschnitt 4.3.1.4) bestanden 5 von 14 geprüften Schächten die Wasserdichtheitsprüfung gemäß ATV-M 143, Teil 6.

a Mindestanforderung an die Haftzugfestigkeit von Beschichtungsmörteln auf Mauerwerk gemäß GSTT-Informationen Nr. 18: Im Mittel $\geq 0,5$ N/mm².

b Mindestuntergrundfestigkeiten nach Instandsetzungs-Richtlinie des DAfStb [50] bzw. ZTV-SIB90[63]: Im Mittel $\geq 1,5$ N/mm² mit einem kleinsten Einzelwert von 1,0 N/mm².

5 Laborversuche

Ergänzend zu den In-situ-Maßnahmen wurden in Laborversuchen die **Auswirkung von dynamischen Belastungen** auf die Qualität einer Schachtbeschichtung sowie das **Verbundverhalten von Beschichtungen auf wassergesättigten Betonoberflächen** untersucht.

5.1 Auswirkungen von dynamischen Belastungen auf Schachtbeschichtungen

Während einer erwarteten Lebensdauer eines Schachtes von ca. 50 Jahren (vgl. [34]) ist für eine Straße der Bauklasse IV mit ca. 3 Millionen Überfahrten durch Schwerverkehrsfahrzeuge zu rechnen. Diese dynamische Belastung wirkt über die in der Straßendeckschicht angeordnete Schachtabdeckung auch direkt auf den Schachtkörper. Hieraus können besondere Anforderungen an das Beschichtungsmaterial und den Verbund resultieren. Um die Dauerhaftigkeit von Mörtel- und Polyurethanbeschichtungen unter diesen Belastungen zu überprüfen, wurden 6 Schächte aus Betonfertigteilen mit definierten Schadensbildern in einem Versuchsstand des IKT von Fachfirmen beschichtet, unter einen Außenwasserdruck gesetzt, und anschließend bis zu 1,5 Millionen Mal mit bis zu 300 kN belastet. Nach den einzelnen Belastungsphasen wurden die Beschichtungen optisch auf Mängel untersucht. Jeweils zwei Tage nach Beendigung der Lastaufbringung wurden 9 Haftzugprüfungen an jedem beschichteten Schacht durchgeführt.

5.1.1 Versuchsaufbau und -durchführung

6 Schächte wurden nacheinander aus jeweils drei Betonfertigteilen (geschlossenes Schachtunterteil, Schachtring und Konus) in dem mittelformatigen Versuchsstand des IKT aufgebaut. Im Vorfeld waren die folgenden Schadensbilder in die Schachtelemente eingebracht worden:

- **Undichte Ringfugen:** Im Muffenbereich des Schachtbodens und des Schachtringes wurden jeweils fünf Vertiefungen ausgeschlagen, um Hinterläufigkeiten an den Dichtringen zu erzeugen (vgl. Abb. 123-A).
- **Punktuellen Undichtigkeiten in der Schachtwandung:** Schachtboden, Schachtring und Konus wurden jeweils 8 Mal von außen durchbohrt. Dabei platzte der Beton an der Innenwandung im Bereich der Bohrungen i.d.R. auf einer Fläche von ca. 5 x 5 cm ab (vgl. Abb. 123-B).
- **Flächige Ausbrüche in der Schachtwandung:** Jeweils 5 Mal auf den Innenwandungen von Schachtboden, Schachtring und Konus wurde der Beton auf einer Fläche von jeweils ca. 30 x 30 cm in einer Tiefe von ca. 0,5 – 1,0 cm abgestemmt, so dass in diesen Bereichen eine sehr raue Oberflächenstruktur vorlag und das Zuschlagskorn sichtbar war (vgl. Abb. 123-C).

- **Einragende Dichtung:** Beim Aufsetzen des Schachtringes und des Konus wurden die Dichtringe so in das Schachtinnere gezogen, dass diese anschließend in den Schachtinnenraum über eine Länge von ca. 20 - 30 cm einragten (vgl. Abb. 123-D).

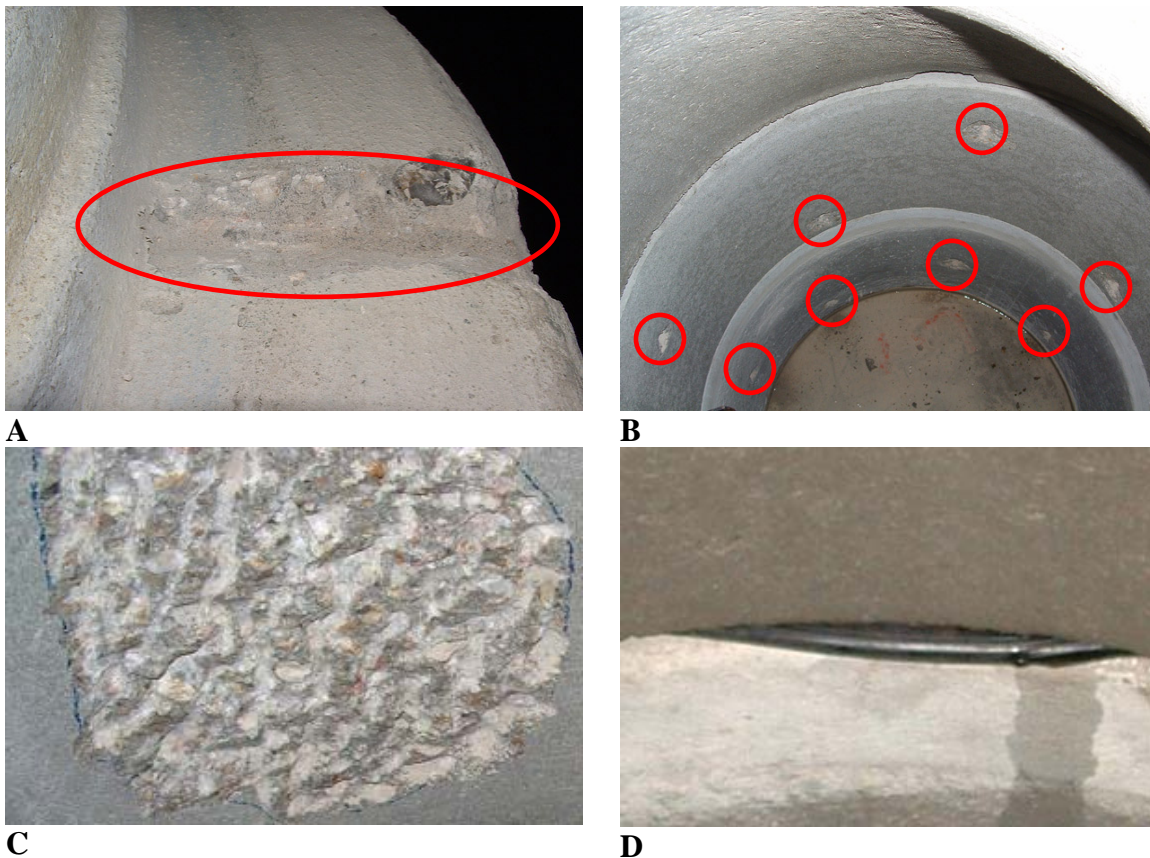


Abb. 123: Im Vorfeld in die Schächte eingebrachte Schadensbilder. **A:** Ringfuge undicht. **B:** Wandung punktuell undicht. **C:** Flächige Ausbrüche in der Wandung. **D:** Einragende Dichtung.

Die 6 Schächte wurden von zwei Fachfirmen (KUT Kanal- und Umwelttechnik GmbH, Leuna und PUR Technologie Hegemann, Hattingen) mit Mörtel- bzw. Polyurethanprodukten (Ergelit Kombina KS 1 und Oldodur WS 56) beschichtet (vgl. Abb. 124-A/B). Vor Aufbringung der Polyurethanbeschichtungen wurden die Ringfugen sowie die undichten Stellen und flächigen Ausbrüche in der Wandung mit Mörtelprodukten vorbeschicht, um einen ebenen Untergrund herzustellen. Direkt nach der Beschichtung des Schachtes Nr. VI bildete sich eine Blase in der Polyurethanbeschichtung (vgl. Abb. 124-C). Obwohl die Blase von der ausführenden Fachfirma großflächig aus der Beschichtung geschnitten und der Untergrund erneut gereinigt wurde (vgl. Abb. 124-D), bildete sich nach erneutem Polyurethanauftrag wieder eine Blase an gleicher Stelle. Zu vermuten ist, dass das Polyurethan mit dem vor der Beschichtung aufgetragenen fettlösendenden Reinigungsmittel bzw. dem Reparaturmörtel reagierte.

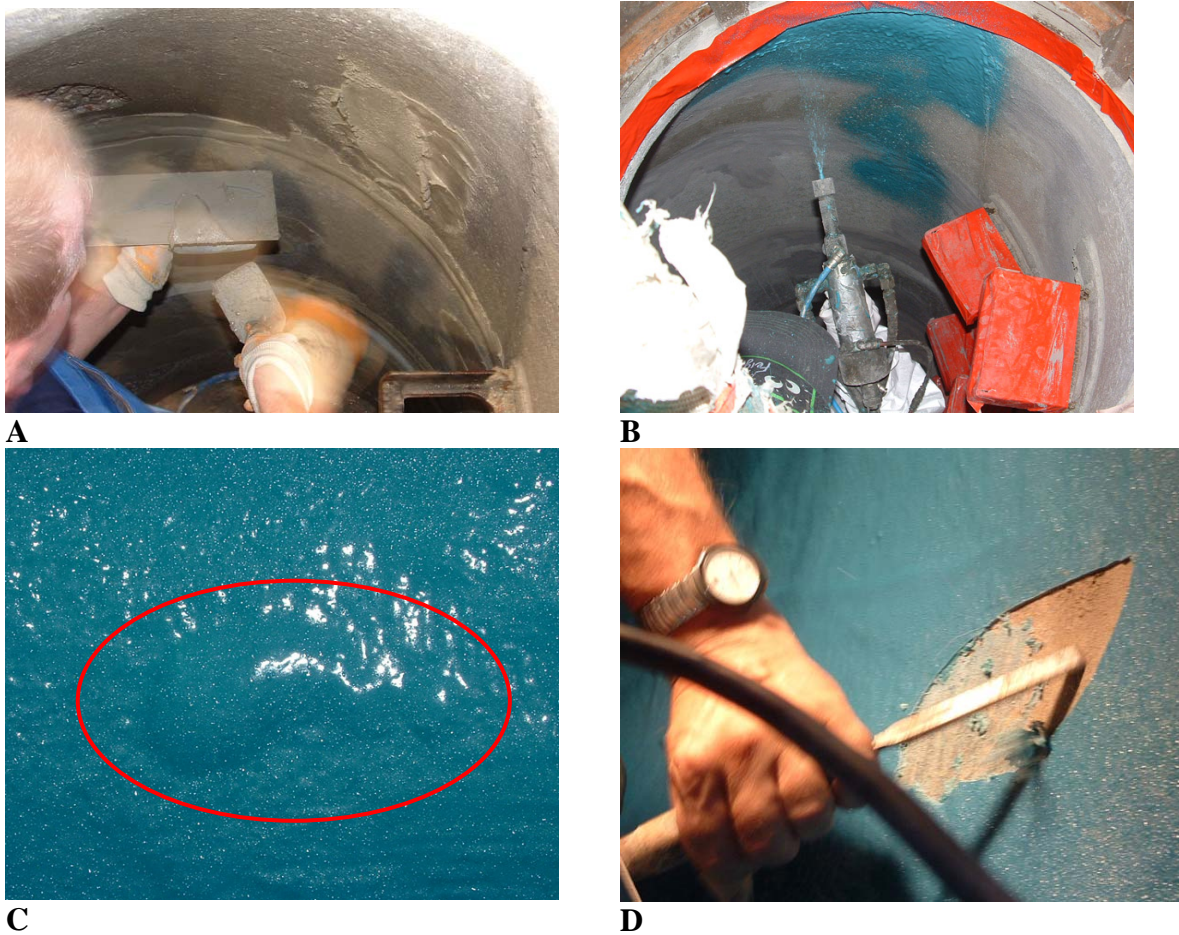


Abb. 124: Beschichtung der Versuchsschächte durch Fachfirmen. **A:** Mörtelauftrag von Hand. **B:** Polyurethanbeschichtung im Aufspritzverfahren. **C:** Blasenbildung in der Polyurethanbeschichtung in Schacht Nr. VI. **D:** Säuberung des Untergrundes nach dem großflächigen Ausschneiden der Blase.

Jeweils einen Tag nach der Beschichtung wurde der mittelformatige Versuchsstand mit Wasser gefüllt und der beschichtete Schacht so einem Außenwasserdruck ausgesetzt. Anschließend wurden zyklische Belastungen über den Schachtdeckel in die Schächte eingeleitet (vgl. Abb. 125). Dabei wurden zwei Belastungszenarien unterschieden:

➤ **Standardbelastung (50 KN – 100 KN)**

24 h nach Beschichtungsauftrag wird über 6 Tage eine Last in Höhe von 50 KN zyklisch aufgebracht (ca. 850 Lastwechsel). Die Last wurde jeweils 5 min konstant gehalten und der Schacht anschließend während weiterer 5 min komplett entlastet. Erst nach Abschluss dieser 7-tägigen Aushärtephase wurde die Belastung deutlich gesteigert. In dieser zweiten Phase wurden eine Million Lastwechsel von 100 KN in einer Frequenz von 3 Hz aufgebracht. Dies entspricht einer Belastung von ca. 4 bis zu ca. 60 Jahren (in Straßen der Bauklassen III – V, vgl. [96]) durch die Radlasten von Bemessungschwerlastwagen gemäß DIN 1072 [97] bei einer Überfahrtgeschwindigkeit von ca. 50 km/h.

➤ **Extrembelastung (100 kN – 300 kN)**

Als Extrembelastung wurden die Schächte direkt 24 h nach Beschichtungsauftrag 500.000 Mal mit 100 kN in einer Frequenz von 3 Hz belastet und die eingeleitete Last anschließend auf 200 kN und 300 kN (bei jeweils 500.000 Lastwechseln) gesteigert.

Insgesamt wurden 4 Schächte einer Standardbelastung und 2 Schächte einer Extrembelastung ausgesetzt. Tabelle 47 gibt eine Übersicht über die jeweiligen Schadensbilder, Belastungsszenarien und eingesetzten Beschichtungsverfahren der untersuchten Schächte.

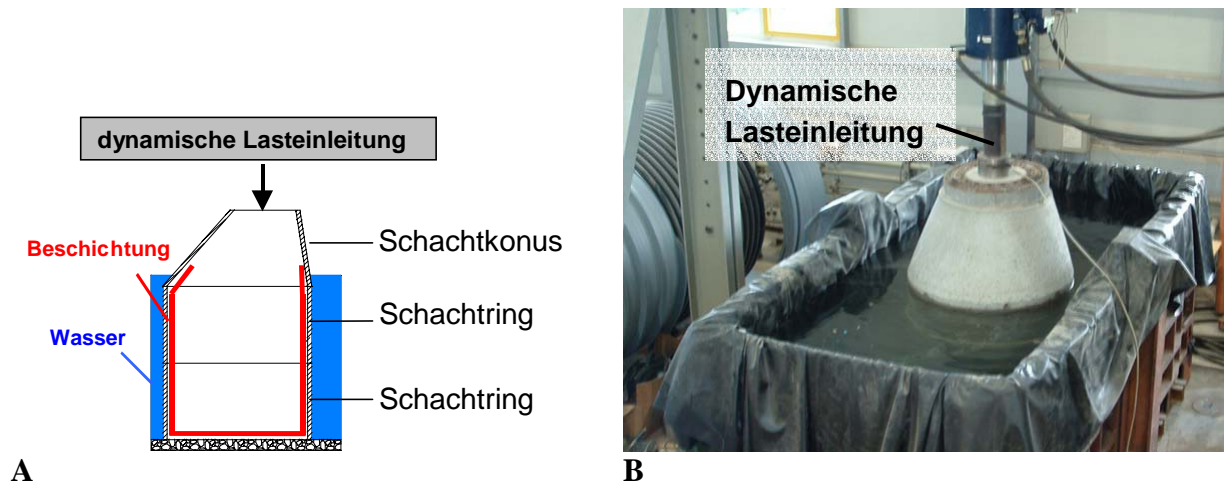


Abb. 125: Versuchsaufbau im mittelformatigen Versuchsstand des IKT. **A:** Schematische Darstellung. **B:** Versuchsaufbau während der Lasteinleitung.

Tabelle 47: Prüfbedingungen bei den dynamischen Belastungsversuchen

Schacht Nr.	Eingebrachte Schadensbilder (vgl. Abb. 123)	Vorreinigung	Beschichtungsmaterial und Auftragsart	Belastungszenarium
I	Ringfugen undicht	Wasserhochdruck mit Handlanze	Mörtel, Auftrag von Hand	Standardbelastung
II	Ringfugen undicht		Polyurethan ¹⁾ , Aufspritzverfahren	Standardbelastung
III	Ringfugen undicht, Wandung punktuell undicht		Mörtel Auftrag von Hand	Standardbelastung
IV	Ringfugen undicht, Wandung punktuell undicht		Polyurethan ¹⁾ , Aufspritzverfahren	Standardbelastung
V	Ringfugen undicht, Wandung punktuell undicht, Flächige Ausbrüche in Wandung, Dichtungsringe einragend		Mörtel, Auftrag von Hand	Extrembelastung
VI	Ringfugen undicht, Wandung punktuell undicht, Flächige Ausbrüche in Wandung, Dichtungsringe einragend		Polyurethan ¹⁾ , Aufspritzverfahren	Extrembelastung

1) die Schadstellen wurden partiell mit mineralischem Mörtel vorbeschichtet

Bei den beiden mit der Extrembelastung beaufschlagten Schächten wurde auch das **Verformungsverhalten der Beschichtung** während der einzelnen Belastungen auf der Fuge zwischen Konus und Schachtring in vertikaler, diagonaler und horizontaler Richtung mittels Dehnungsmessstreifen aufgezeichnet (vgl. Abb. 126). Eine Übersicht über die gemessenen Maximalwerte gibt Tabelle 48. Eine Verformung der Beschichtungen trat vor allem in vertikaler Richtung an Position 1 (vgl. Abb. 126-A) im Übergangsbereich Konus / Schachtring auf. Die zwischen Be- und Entlastung gemessenen Amplituden der vertikalen Dehnung an Position 2 waren demgegenüber vernachlässigbar klein.

Die Dehnung der **Mörtelbeschichtung** in vertikaler Richtung (max. Amplitude zwischen Be- und Entlastung zu Ende des jeweiligen Belastungsintervalls an Pos. 1) lag zwischen 3,3 $\mu\text{m}/\text{m}$ (bei 100 KN Auflast) und 6,2 $\mu\text{m}/\text{m}$ (bei 300 KN Auflast). Die sich daraus ergebenden **Span-**

nungen liegen - unter der Annahme eines mittleren E-Moduls von 28.000 N/mm^{2a} - bei ca. $0,1$ bzw. $0,2 \text{ N/mm}^2$ und damit **deutlich unter der im Rahmen der In-situ-Untersuchungen festgestellten Druckfestigkeit** von im Mittel $45,3 \text{ N/mm}^2$.

An der **Polyurethanbeschichtung** wurden wesentlich größere **Dehnungen** von $28,7 \mu\text{m/m}$ (bei 100 KN Auflast) bis $241,1 \mu\text{m/m}$ (bei 300 KN Auflast) gemessen. Die sich daraus ergebenden **Spannungen** (unter der Annahme eines E-Moduls der Polyurethanbeschichtung von 180 N/mm^2 , vgl. Abschnitt 4.3.4.2) sind mit $0,005$ bzw. $0,045 \text{ N/mm}^2$ ebenfalls vernachlässigbar klein und liegen **bei unter einem Prozent der durchschnittlichen Zugfestigkeit** der im Rahmen der In-situ-Untersuchungen entnommenen Proben.

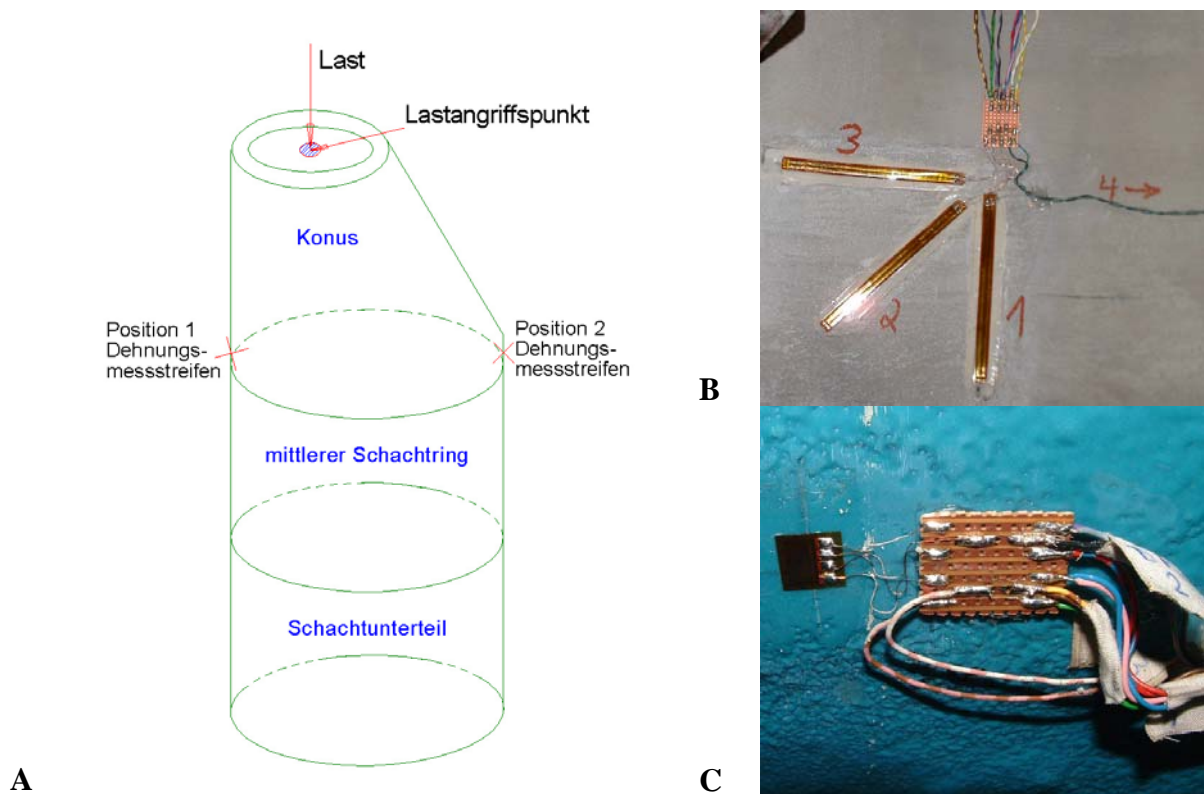


Abb. 126: Lage und Ansicht der Dehnungsmessstreifen zur Messung der Verformungen der Beschichtungen. **A:** Lage der Dehnungsmessstreifen in den Schächten. **B:** Auf Mörtelbeschichtung des Schachtes Nr. V. **C:** Auf Polyurethanbeschichtung des Schachtes Nr. VI.

a Mittelwert der im Rahmen des vorliegenden Forschungsprojektes an drei Mörtelproben ermittelten Elastizitätsmoduln.

Tabelle 48: Maximale Dehnung der Mörtel- und Polyurethanbeschichtungen unter den verschiedenen Laststufen

Last [KN]	Δ Dehnung an Pos. 1 ^{a)} [$\mu\text{m}/\text{m}$]			Δ Dehnung an Pos. 2 ^{a)} [$\mu\text{m}/\text{m}$]
	Vertikal	Diagonal	Horizontal	Vertikal
Mörtelbeschichtung				
100	3,3	1,2	0,5	0,2
200	3,7	2,6	0,9	0,4
300	6,2	5,6	1,3	0,5
Polyurethanbeschichtung				
100	28,7	2,6	15,7	0,5
200	82,0	6,8	33,4	0,5
300	241,1	27,4	54,3	0,7

a) maximale Dehnung der Beschichtung auf der Fuge zwischen Konus und Schachtring (vgl. Abb. 126), jeweils gemessen zwischen Be- und Entlastung des Schachtes zum Ende des Belastungsintervalles.

5.1.2 Optische Inspektion und Prüfung der Haftzugfestigkeit

Nach jeder Belastungsserie wurden die Beschichtungen **optisch inspiziert**. Die Beschichtungen der Schächte Nr. I – IV wurden zusätzlich während der Belastung mit 100 KN nach 100.000 und 300.000 Lastwechseln inspiziert. Sämtliche Ergebnisse der optischen Inspektionen sind in Tabelle 49 und Tabelle 50 dargestellt.

Mörtelbeschichtung









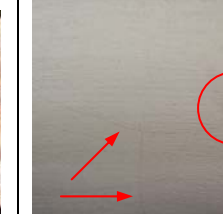
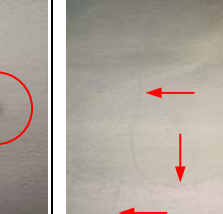




An **Schacht I** (Schadensbild: undichte Ringfugen; Standardbelastung) wurden bei der Inspektion nach Belastung mit 50 KN keine Mängel festgestellt, die Oberfläche der Beschichtung war glatt, Steigeisen und Schachtboden waren gut angebunden und es waren keine Risse in der Beschichtung erkennbar. Nach 100.000 Lastwechseln mit 100 KN zeigten sich feuchte Stellen in der Beschichtung im Bereich des Überganges vom Konus zum Schachtring und am Übergang Beschichtung / Schachtboden. Diese bildeten sich während des weiteren Verlaufes der Belastung immer weiter zurück und waren bei der letzten Inspektion nach insgesamt 1.000.000 Lastwechseln (ca. 12 Tage nach Beschichtungsauftrag) nicht mehr vorhanden. Dies könnte auf den Aushärteprozess des Mörtels zurückzuführen sein.

Schacht III (Schadensbild: undichte Ringfugen, Wandung punktuell undicht; Standardbelastung) zeigte direkt nach Beendigung der Belastung mit 50 KN eine größere feuchte Stelle im Übergang zwischen Beschichtung und Schachtboden. Während der Belastung mit 100 KN bildeten sich zusätzlich Risse und feuchte Stellen in der Beschichtung, wobei die Risse im Laufe der Belastung an Zahl und Breite zunahm. Da außer einer ca. alle 48 h durchgeführ-

ten Befeuchtung der Beschichtung keine weiteren Nachbehandlungsmaßnahmen ergriffen wurden, könnte die Rissbildung auch auf Schwindvorgänge in der Mörtelbeschichtung zurückzuführen sein.

Im **Schacht V** (Schadensbild undichte Ringfugen, Wandung punktuell undicht, flächige Ausbrüche in der Wandung, Dichtungsringe einragend; Extrembelastung) stand direkt bei der ersten Inspektion nach Beendigung der Belastung mit 100 KN Wasser in einer Höhe von ca. 1 cm auf dem Schachtboden. Es waren mehrere größere Risse und feuchte Stellen in der Beschichtung zu erkennen. Während der weiteren Belastung mit 200 KN und 300 KN bildeten sich die feuchten Stellen geringfügig zurück, es trat kein weiteres Wasser mehr in den Schacht ein. Dies könnte, wie bereits bei Schacht I, auf den Aushärtungsprozess des Mörtels zurückzuführen sein.

Tabelle 49: Übersicht über die optische Inspektion an den mit Mörtel beschichteten und mit dynamischen Lasten beaufschlagten Schächten

Schacht Nr. I (Rinfugen undicht; Standardbelastung)				
Ausgangszustand	50 KN	100 KN		
	Nach 850 LW	Nach 100.000 LW	Nach 300.000 LW	Nach 1.000.000 LW
				
Keine Mängel erkennbar	Keine Mängel erkennbar	4 x feuchte Stellen in der Beschichtung (Ø ca. 0,5-2 cm), feuchte Stelle am Übergang Beschichtung / Schachtboden (Ø ca. 10 cm)	Die feuchten Stellen sind im Vergleich zur vorherigen Inspektion kleiner geworden und weniger feucht	Keine Mängel erkennbar
Schacht Nr. III (Rinfugen undicht / Wandung punktuell undicht; Standardbelastung)				
Ausgangszustand	50 KN	100 KN		
	Nach 850 LW	Nach 100.000 LW	Nach 300.000 LW	Nach 1.000.000 LW
				
Keine Mängel erkennbar	Feuchter Bereich im Übergang Beschichtung / Schachtboden, Länge ca. 40 cm, Breite ca. 0,5 – 4 cm	Keine Veränderungen gegenüber der ersten Inspektion feststellbar	Risse (Ø bis ca. 0,2 mm) im Bereich der Steigeisen und im Übergang Konus / Schachtring, zwei feuchte Stellen in der Wandung (Ø ca. 2 cm), feuchter Bereich im Übergang Beschichtung / Schachtboden	Rissbildung gegenüber letzter Inspektion intensiver ausgeprägt (Ø bis ca. 0,4 mm), ansonsten keine Veränderungen
Schacht Nr. V (Rinfugen undicht / Wandung punktuell undicht, Flächige Ausbrüche in Wandung, Dichtungsringe einragend; Extrembelastung)				
Ausgangszustand	100 KN	200 KN	300 KN	
	Nach 500.000 LW	Nach 500.000 LW	Nach 500.000 LW	
				
Keine Mängel erkennbar	Wasser ist in den Schacht gelaufen (ca. 30 Liter), mehrere Risse und undichte Stellen in der Wandung (Ø ca. 20 cm) und zwischen den Steigeisen (Ø ca. 2 cm)	Feuchte Flecken an Wandung weniger intensiv ausgeprägt, zwischen den Steigeisen nicht mehr sichtbar, ansonsten keine Veränderungen gegenüber letzter Inspektion	Keine Veränderungen gegenüber der letzten Inspektion	

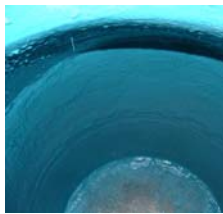


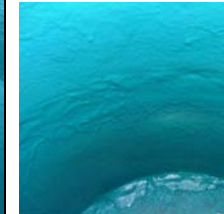







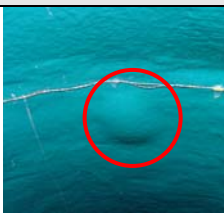


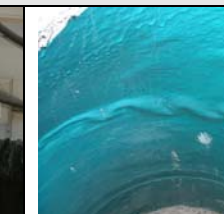
Polyurethanbeschichtung

In **Schacht II** (Schadensbild: undichte Ringfugen; Standardbelastung) waren während der gesamten Belastungsdauer (50 kN und 100 kN) keine Mängel in der Polyurethanbeschichtung erkennbar.

In **Schacht IV** (Schadensbild: undichte Ringfugen, Wandung punktuell undicht; Standardbelastung) waren ebenfalls während der gesamten Belastungsdauer (50 kN und 100 kN) keine Mängel in der Beschichtung erkennbar. Bereits vor Aufbringung der ersten Belastung hatte sich ein größerer feuchter Fleck auf dem Schachtboden gebildet. Dieser bildete sich während der Belastung zurück und war nach Abschluss der gesamten Belastung nicht mehr vorhanden. Zu vermuten ist, dass die zu Beginn der Belastung im Anfangsstadium des Aushärtungsprozesses befindliche Mörtelvorbeschichtung in den Ringfugen und Wandungsausbrüchen geringfügig wasserdurchlässig war.

In **Schacht VI** (Schadensbild undichte Ringfugen, Wandung punktuell undicht, flächige Ausbrüche in der Wandung, Dichtungsringe einragend; Extrembelastung) hatte sich bereits während des Beschichtungsauftrags eine Blase in der Beschichtung gebildet. Ansonsten waren nach Beendigung der Belastung mit 100 kN und 200 kN keine Mängel in der Beschichtung erkennbar. Nach 55.000 Lastzyklen mit 300 kN brach der Schachtdeckel. Dabei riss der Betonkonus über die gesamte Höhe und wurde um ca. 5 cm gegenüber dem Schachtring verdreht. Die Polyurethanbeschichtung riss auf einer Länge von ca. 30 cm ab der Oberkante des Schachtes ein und wurde im Übergangsbereich Konus / Schachtring aufgeworfen. Da sich der Riss in der Polyurethanbeschichtung oberhalb des Wasserspiegels befand, trat dabei kein Wasser in den Schacht ein.

Tabelle 50: Übersicht über die optische Inspektion an den mit Polyurethan beschichteten und mit dynamischen Lasten beaufschlagten Schächten

Schacht Nr. II (Rinngugen undicht; Standardbelastung)				
Ausgangs- zustand	50 KN	100 KN		
	Nach 850 LW	Nach 100.000 LW	Nach 300.000 LW	Nach 1.000.000 LW
				
Keine Mängel erkennbar	Keine Mängel erkennbar	Keine Mängel erkennbar	Keine Mängel erkennbar	Keine Mängel erkennbar
Schacht Nr. IV (Rinngugen undicht / Wandung punktuell undicht; Standardbelastung)				
Ausgangs- zustand	50 KN	100 KN		
	Nach 850 LW	Nach 100.000 LW	Nach 300.000 LW	Nach 1.000.000 LW
				
Keine Mängel erkennbar	Keine Mängel in der Beschichtung erkennbar, feuchter Fleck auf Schachtboden sichtbar (ca. 50 x 40 cm)	Keine Mängel in der Beschichtung erkennbar, feuchter Fleck auf Schachtboden sichtbar (ca. 50 x 40 cm)	Keine Mängel in der Beschichtung erkennbar, feuchter Fleck auf Schachtboden sichtbar (ca. 50 x 40 cm)	Keine Mängel erkennbar
Schacht Nr. VI (Rinngugen undicht / Wandung punktuell undicht, Flächige Ausbrüche in Wandung, Dichtungsringe einragend; Extrembelastung)				
Ausgangs- zustand	100 KN	200 KN	300 KN	
	Nach 500.000 LW	Nach 500.000 LW	Nach 55.000 LW	
				
Blase in der Beschichtung (Ø ca. 20 cm), ansonsten keine Mängel	Blase in der Beschichtung (Ø ca. 20 cm), ansonsten keine Mängel	Keine Veränderungen gegenüber der letzten Inspektion erkennbar	Nach 55.000 Lastwechseln mit 300 KN brach der Schachtdeckel. Bei dem Bruch riss der Konus über die gesamte Höhe, der Konus wurde um ca. 5 cm gegenüber dem Schachtring verdreht, die Polyurethanbeschichtung wurde im Verbindungsbereich Konus / Schachtring aufgeworfen, riss aber nicht	

Zwei Tage nach Abschluss der Belastungen wurden jeweils 9 **Haftzugprüfungen** an jedem beschichteten Schacht durchgeführt. Die Prüfung erfolgte analog zu dem in Abschnitt 4.3.1.2 beschriebenen Prüfablauf. Eine Ergebnisübersicht geben Tabelle 51 und Tabelle 52.

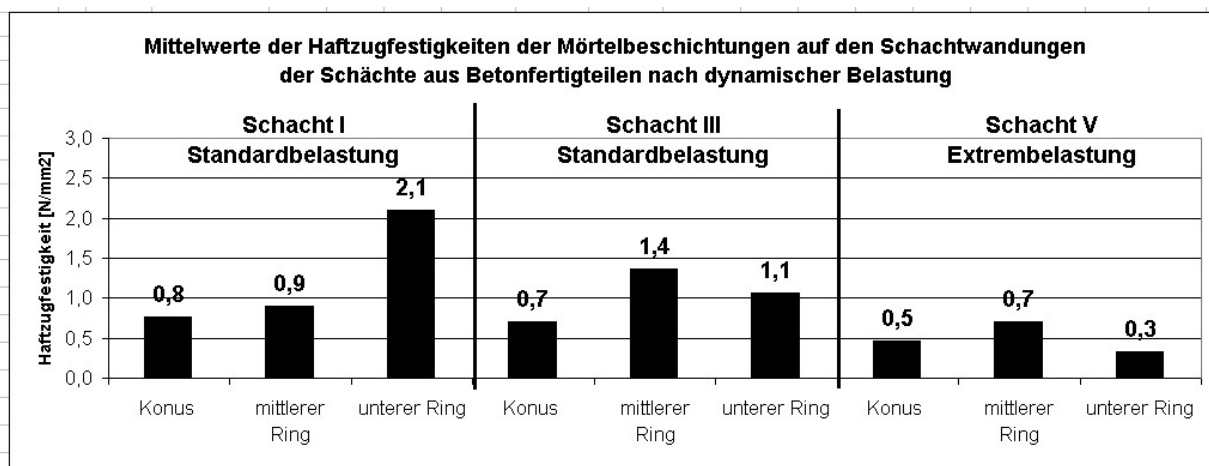
Die **Haftzugfestigkeiten der Mörtelbeschichtungen** lagen zwischen 0,2 und 2,3 N/mm². Bis auf zwei Ausnahmen, bei denen der Kleber versagte (Prüfung Nr. 1 im mittleren Ring des Schachtes Nr. I und Prüfung Nr. 1 im Unterteil des Schachtes Nr. I), lag die Bruchstelle bei den Prüfungen immer in der **Trennfuge** zwischen Mörtel und Betonuntergrund bzw. in der Beschichtung selbst. Die Haftzugfestigkeit der Beschichtung des **Schachtes Nr. I** betrug im Mittel ca. 1,0 N/mm², schwankte aber bei den einzelnen Prüfungen sehr stark. So wurden bei drei Prüfungen (Nr. 1 und Nr. 3 im Konus, Nr. 2 im mittlerem Schachtring) nur geringe Haftzugfestigkeiten von 0,2 – 0,4 N/mm², bei den restlichen vier Prüfungen allerdings recht hohe Haftzugfestigkeiten von 1,4 - 2,3 N/mm² gemessen. Die durchschnittliche Haftzugfestigkeit der Beschichtung des **Schachtes Nr. III** lag ebenfalls bei 1,0 N/mm² bei einer **starken Streuung** der Einzelwerte (0,2 – 2,1 N/mm²). Deutlich geringere Haftzugwerte wurden an der Beschichtung des **Schachtes Nr. V** gemessen, der einer intensiveren Belastung ausgesetzt worden war. Hier lagen die Haftzugfestigkeiten im Mittel bei 0,5 N/mm², wobei bei den Einzelprüfungen bis auf eine Ausnahme (Prüfung Nr. 1 im mittleren Schachtring) durchgängig recht niedrige Werte von 0,2 – 0,8 N/mm² gemessen wurden.

Tabelle 51: **Haftzugfestigkeiten der Mörtelbeschichtungen auf den Schachtwandungen der Schächte aus Betonfertigteilen nach dynamischer Belastung (ermittelt in Anlehnung an ZTV-SIB90 [63] bzw. DAfStb-Instandsetzungs-Richtlinie [50])**

Nr.	Schachtelelement	Haftzugfestigkeit nach Beschichtung [N/mm ²]												
		Prüfung Nr. 1				Prüfung Nr. 2				Prüfung Nr. 3				Mittelwert ²⁾
		BS ¹⁾	BT ¹⁾	BU ¹⁾	BK ¹⁾	BS ¹⁾	BT ¹⁾	BU ¹⁾	BK ¹⁾	BS ¹⁾	BT ¹⁾	BU ¹⁾	BK ¹⁾	
I	Konus	0,7				1,4				0,2				0,8
		40	60	0	0	0	90	10	0	0	100	0	0	
	mittlerer Ring	0,4				0,4				1,4				0,9
	10	0	0	90	0	100	0	0	30	70	0	0		
	Schachtunterteil	1,7				1,9				2,3				2,1 (2,0)
		0	0	0	100	0	100	0	0	0	80	20	0	
	Konus	0,2				0,6				1,3				0,7
	0	100	0	0	10	90	0	0	70	30	0	0		
III	mittlerer Ring	1,1				2,1				0,9				1,4
		0	100	0	0	0	100	0	0	0	100	0	0	
	Schachtunterteil	0,7				1,4				1,1				1,1
	0	100	0	0	0	100	0	0	0	100	0	0		
V	Konus	0,3				0,3				0,8				0,5
		0	100	0	0	0	100	0	0	0	100	0	0	
	mittlerer Ring	1,5				0,2				0,4				0,7
	0	80	20	0	0	100	0	0	0	100	0	0		
	Schachtunterteil	0,2				0,5				0,3				0,3
		80	20	0	0	0	100	0	0	100	0	0	0	

Anmerkung:

- 1) = in den Zeilen unter den Festigkeitswerten sind jeweils die prozentualen Oberflächenanteile der verschiedenen Versagensarten dargestellt (BS: Bruch im Sanierungsmaterial / BT: Bruch in der Trennfuge zwischen Sanierungsmaterial und Untergrund / BU: Bruch im Untergrund / BK: Bruch in der Klebefuge)
■ der dargestellte Haftzugwert kann nur als Hinweis auf die Beschichtungsqualität angesehen werden, da der Prüfkörper zu mehr als 25 % in der Klebefuge versagte
- 2) in Klammern sind die Mittelwerte der Haftzugfestigkeiten für den Fall dargestellt, dass auch Proben berücksichtigt werden, bei denen trotz Bruchs in der Klebefuge die Anforderungen nach [50] erfüllt sind



Die **Haftzugfestigkeiten der Polyurethanbeschichtungen** lagen zwischen 0,1 und 3,6 N/mm². Bei 8 Prüfungen versagte der Kleber, in diesen Fällen lagen die gemessenen Haftzugwerte bis auf eine Ausnahme (Prüfung Nr. 3 bei Schacht Nr. IV im mittleren Ring: 0,8 N/mm²) mit 2,1 – 3,6 N/mm² allerdings über den Anforderungen der maßgeblichen Richtlinien^a. An den Stellen, an denen eine Mörtelvorbeschichtung zur Angleichung der Oberfläche aufgetragen worden war, lag die Bruchstelle bei den Haftzugprüfungen immer in der Mörtelvorbeschichtung (Schacht Nr. VI, Prüfung Nr. 1 und 3 am mittleren Schachtring, Prüfung Nr. 2 und 3 am Schachtunterteil). Die Haftzugfestigkeit der Beschichtung des **Schachtes Nr. II** betrug im Mittel 1,7 N/mm² und lag mit einer Ausnahme (Prüfung Nr. 2 im Konus) stets über 1,0 N/mm². Die Haftzugfestigkeit der Beschichtung des **Schachtes Nr. IV** lag im Mittel bei 2,7 N/mm², hier wurden bei jeder Prüfung Werte über 2,0 N/mm² gemessen (die Prüfungen mit mehr als 25 % Versagen in der Klebefuge wurden hierbei nicht berücksichtigt). Deutlich geringere Haftzugfestigkeiten von im Mittel 0,7 N/mm² mit kleinsten Einzelwerten von 0,1 N/mm² wurden an der Beschichtung des **Schachtes Nr. VI** gemessen. Allerdings kam es bei diesem Schacht aufgrund des Bruchs des Schachtdeckels und der daraus resultierenden Drehung des Konus zu einer extremen Belastung der Beschichtung, die mit den Belastungen der restlichen Schächte nicht zu vergleichen ist.

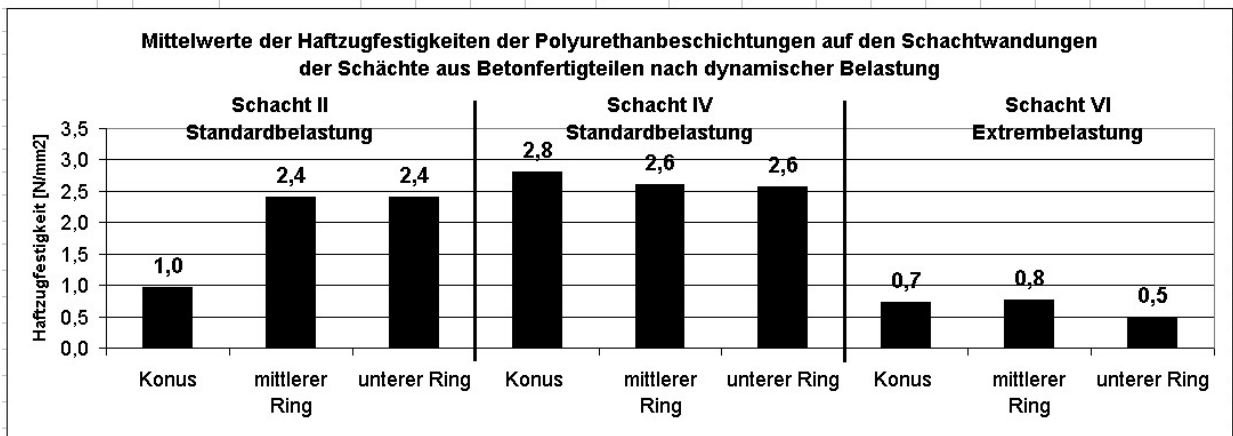
a Mindesthaftzugfestigkeiten nach Instandsetzungs-Richtlinie des DAfStb [50] bzw. ZTV-SIB90 [63]:
Im Mittel $\geq 1,5$ N/mm² mit einem kleinsten Einzelwert von 1,0 N/mm².

Tabelle 52: *Haftzugfestigkeiten der Polyurethanbeschichtungen auf den Schachtwandungen der Schächte aus Betonfertigteilen nach dynamischer Belastung (ermittelt in Anlehnung an ZTV-SIB90 [63] bzw. DAfStb-Instandsetzungs-Richtlinie [50])*

Nr.	Schachtelelement	Haftzugfestigkeit nach Beschichtung [N/mm ²]												
		Prüfung Nr. 1				Prüfung Nr. 2				Prüfung Nr. 3				Mittelwert ²⁾
		BS ¹⁾	BT ¹⁾	BU ¹⁾	BK ¹⁾	BS ¹⁾	BT ¹⁾	BU ¹⁾	BK ¹⁾	BS ¹⁾	BT ¹⁾	BU ¹⁾	BK ¹⁾	
II	Konus	1,1				0,4				1,4				1,0
		0	100	0	0	0	100	0	0	0	100	0	0	
	mittlerer Ring	3,0				2,3				1,9				2,4
	0	100	0	0	0	100	0	0	0	100	0	0		
	Schachtunterteil	2,2				1,8				3,2				1,8 (2,4)
		0	0	0	100	0	100	0	0	0	0	0	100	
IV	Konus	2,6				2,2				3,6				2,4 (2,8)
		0	100	0	0	0	100	0	0	0	0	0	100	
	mittlerer Ring	3,4				3,6				0,8				3,4 (3,5)
	80	20	0	0	0	0	0	100	0	0	0	100		
	Schachtunterteil	2,1				3,0				2,6				(2,6)
		0	0	0	100	0	0	0	100	0	0	0	100	
VI	Konus	1,1				0,8				0,3				0,7
		0	100	0	0	0	100	0	0	0	100	0	0	
	mittlerer Ring	1,1				0,1				1,1				0,8
	100	0	0	0	0	100	0	0	100	0	0	0		
	Schachtunterteil	0,3				0,6				0,6				0,5
		0	100	0	0	100	0	0	0	100	0	0	0	

Anmerkung:

- 1) = in den Zeilen unter den Festigkeitswerten sind jeweils die prozentualen Oberflächenanteile der verschiedenen Versagensarten dargestellt (BS: Bruch im Sanierungsmaterial / BT: Bruch in der Trennfuge zwischen Sanierungsmaterial und Untergrund / BU: Bruch im Untergrund / BK: Bruch in der Klebefuge)
■ der dargestellte Haftzugwert kann nur als Hinweis auf die Beschichtungsqualität angesehen werden, da der Prüfkörper zu mehr als 25 % in der Klebefuge versagte
- 2) in Klammern sind die Mittelwerte der Haftzugfestigkeiten für den Fall dargestellt, dass auch Proben berücksichtigt werden, bei denen trotz Bruchs in der Klebefuge die Anforderungen nach [50] erfüllt sind



5.1.3 Schlussfolgerungen

Aus den Versuchen zur Auswirkung von dynamischen Belastungen auf Mörtel- und Polyurethanbeschichtungen in Schächten aus Betonfertigteilen lassen sich folgende wesentliche Beobachtungen und Schlussfolgerungen festhalten:

Mörtelbeschichtungen

- Durch eine dynamische Belastung des Schachtes Nr. 1 (undichte Ringfugen, ansonsten unbeschädigte Wandung) mit 100 kN und einer Million Lastwechseln^a ergaben sich keine **optisch erkennbaren Mängel** (Risse, Hohlstellen, Undichtigkeiten) in der Mörtelbeschichtung. Die Mörtelbeschichtungen in den Schächten Nr. 3 und Nr. 5 zeigten nach der gleichen Belastungsintensität Undichtigkeiten und Risse in der Beschichtung. In beide Schächte waren vor der Beschichtung weitere Schadensbilder, wie punktuelle Undichtigkeiten und flächige Ausbrüche in der Wandung, eingebracht worden. Eine Steigerung der Last auf 200 kN und 300 kN führte nicht zu weiteren optisch erkennbaren Schädigungen.
- Die gemessenen **Haftzugwerte** der Mörtelbeschichtungen nach den dynamischen Belastungen wiesen starke Schwankungen auf, es wurden Werte von 0,2 N/mm² bis 2,3 N/mm² gemessen. Deutlich niedrigere Haftzugfestigkeiten von im Mittel 0,5 N/mm² wurden an der Mörtelbeschichtung des Schachtes Nr. 5 ermittelt, der einer intensiveren Belastung von bis zu 300 kN ausgesetzt worden war. Keine der untersuchten Beschichtungen erfüllte die Anforderungen der maßgeblichen Richtlinien^b.
- Die dynamische Belastung des Schachtes bewirkte nur geringe **Dehnungen in der Mörtelbeschichtung**. Die daraus resultierenden **Spannungen** in der Mörtelbeschichtung erreichten selbst bei 300 kN Auflast weniger als ein Prozent der im Rahmen der In-situ-Untersuchungen ermittelten Mörtelfestigkeiten.

Polyurethanbeschichtungen

- Intensive dynamische Belastungen von bis zu einer Million Lastwechseln und bis zu 200 kN zeigten - für die hier untersuchten Schadensbilder und Betonfertigteilschächte - keine negativen Auswirkungen auf die **Qualität** der Polyurethanbeschichtung. An keinem der untersuchten Schächte entstanden während der dynamischen Belastung Risse oder Undichtigkeiten in der Beschichtung.
- Die **Haftzugfestigkeit** der Polyurethanbeschichtungen war auch nach den dynamischen Belastungen grundsätzlich hoch, sie lag bei Schacht Nr. 4 (nach 1 Mio. Lastwechsel mit

a Dies entspricht je nach Lage des Schachtes einer realen Belastung durch Schwerverkehr von ca. 4 Jahren (Straße der Bauklasse III) bis zu ca. 60 Jahren (Straße der Bauklasse V).

b Anforderungen an Haftzugfestigkeiten gemäß Instandsetzungs-Richtlinie des DAfStb [50] bzw. ZTV-SIB 90 [63]: 1,5 N/mm² im Mittel, kleinster Einzelwert von 1,0 N/mm².

200 kN) im Mittel bei $2,7 \text{ N/mm}^2$ mit einem kleinsten Einzelwert von $2,2 \text{ N/mm}^2$. Diese Werte entsprachen den Anforderungen der maßgeblichen Richtlinien^a und den Angaben des Herstellers ($1,4 \text{ N/mm}^2$ bis $2,6 \text{ N/mm}^2$). Bei Schacht Nr. I (1 Mio. Lastwechsel mit 100 kN) lag nur ein Einzelwert mit $0,4 \text{ N/mm}^2$ unterhalb der Anforderungen. In den Bereichen der Schachtwandung, die vor Aufbringung des Polyurethans mit Mörtelprodukten bearbeitet worden waren, lag der Bruch bei Prüfung der Haftzugfestigkeit immer im Mörtel. Die höchsten Haftzugfestigkeiten wurden an den Stellen gemessen, an denen die Polyurethanbeschichtung direkt auf die Betonwandung aufgebracht worden war.

- Selbst unter **extremen Belastungen** (Belastung mit 300 kN, Bruch des Schachtdeckels, Drehung des Konus) blieb die Beschichtung dicht und riss im Übergangsbereich Konus – Schachtring nicht ein. Die Haftzugfestigkeit war allerdings mit durchschnittlich $0,7 \text{ N/mm}^2$ deutlich geringer.
- Die dynamische Belastung des Schachtes bewirkte größere **Dehnungen in der Polyurethanbeschichtung**. Die daraus resultierenden **Spannungen** in der Polyurethanbeschichtung erreichten aber selbst bei 300 kN Auflast weniger als ein Prozent der im Rahmen der In-situ-Untersuchungen ermittelten Polyurethan-Zugfestigkeiten.
- Direkt nach der Beschichtung des Schachtes Nr. VI bildete sich eine **Blase in der Beschichtung**. Zu vermuten ist, dass das Polyurethan mit dem vorher auf die Schachtwandung aufgetragenen fettlösenden Reinigungsmittel oder dem Reparaturmörtel reagiert hat.

a Anforderungen an Haftzugfestigkeiten gemäß Instandsetzungs-Richtlinie des DAfStb [50] bzw. ZTV-SIB 90 [63]: $1,5 \text{ N/mm}^2$ im Mittel, kleinster Einzelwert von $1,0 \text{ N/mm}^2$.

5.2 Verbundverhalten auf wassergelagerten Schachtelementen aus Beton

Sowohl mit Blick auf das Infiltrations- als auch das Exfiltrationspotenzial kommt der Dichtigkeit des Schachtunterteils eine besondere Bedeutung zu. So ist bei anstehendem Grundwasser der hydrostatische Druck im unteren Schachtbereich am größten und gerade im Gerinnebereich von einer ständigen Teilfüllung auszugehen. Gleichzeitig ist eine nahezu vollständige Wassersättigung der dort eingesetzten porenhaltigen Werkstoffe, wie z.B. Fugenmörtel und Beton, zu erwarten.

Um zu überprüfen, wie sich eine nahezu vollständige Wassersättigung des Betonuntergrundes auf die Verbundfestigkeit von Mörtel- und Polyurethanbeschichtungen auswirkt, wurden Schachtelemente aus Beton mehrere Tage unter Wasser gelagert und anschließend von Fachfirmen beschichtet. Nach einer erneuten Wasserlagerung einiger der beschichteten Elemente wurden die Beschichtungen optisch inspiziert und Haftzugprüfungen durchgeführt.

5.2.1 Probekörper





Um zusätzlich den Einfluss verschiedener Oberflächenrauigkeiten auf die Verbundfestigkeit zwischen Beschichtung und Wandung untersuchen zu können, wurden Schachtelemente verschiedener Qualität eingesetzt. In Tabelle 53 sind die verwendeten Schachttypen dargestellt.

Tabelle 53: Verwendete Schachttypen

	Typ 1	Typ 2
DIN-Norm	DIN 4034, Teil 1 [6]	DIN 4034, Teil 2 [98]
Maße (Innendurchmesser / Außenhöhe)	100 cm / 105 cm	100 cm / 65 cm
Sonstige Merkmale	FBS [99] – Qualität, in der Schalung erhärtet, mit Gerinne DN 300 zum Anschluss von Betonrohren, ohne Steighilfen	geschlossene Ausführung, ohne Steighilfen

Fortsetzung siehe nächste Seite

Tabelle 53 (Forts.): Verwendete Schachttypen

	Typ 1	Typ 2
Gesamtansicht		
Detailansichten	 <p>Wandung Berme Gerinne</p>	 <p>Wandung</p>

Schachttyp 1 stellt den Standardfall für die Herstellung von Abwasserschächten dar. Er zeichnet sich durch eine sehr glatte Oberflächenstruktur der Innenwandung aus. In die Schachttunteile dieses Typs wurden nachträglich Berme und Gerinne mit einem Beton geringerer Güte ausgebildet. Schachttyp 2 eignet sich ausschließlich zum Bau von Schächten für Brunnen- und Sickeranlagen. Trotzdem wurden diese Schachtbauteile oftmals im Bereich der öffentlichen Abwasserkanalisation eingesetzt (vgl. [100]). Bei allen Elementen dieses Typs konnte eine rauhe Oberflächenstruktur der Innenwandung festgestellt werden. Insgesamt kamen sieben Elemente des Schachttyps 1 und drei Elemente des Schachttyps 2 zum Einsatz.

5.2.2 Wassersättigung der Probekörper

Eine nahezu vollständige Wassersättigung der insgesamt zehn Schachtelemente wurde durch eine zwanzigtägige Wasserlagerung der Probekörper bei vollständiger Wasserüberdeckung erreicht. Um zu gewährleisten, dass eingeschlossene Luft aus den Betonporen entweichen kann, wurden die Probekörper in Anlehnung an [101] in drei Etappen gewässert. Jeweils eine Stunde lang wurde der Wasserpegel bei einem Drittel der Höhe der Prüfkörper, zwei Drittel der Höhe der Prüfkörper und der kompletten Höhe der Prüfkörper gehalten. In jedem Stadium wurden die Prüfkörper mehrfach mit einem Hammer in Schwingung gebracht, um das Ent-

weichen der Luftblasen zu erleichtern (vgl. Abb. 127-B/C). Anschließend wurde soviel Wasser zugegeben, bis eine Überdeckung von ca. zwei Zentimetern erreicht war (vgl. Abb. 127-D).



A



B



C



D

Abb. 127: Wassersättigung der Probekörper. A: Einsetzen der Schachtelemente in die Behälter für die Wasserlagerung. B: Anschlagen der Schachtelemente. C: Entweichen von Luftblasen aus dem Betongefüge. D: Vollständige Wasserlagerung der Schachtelemente.

5.2.3 Beschichtung und Nachbehandlung der Probekörper

Kurz vor der Beschichtung wurden die Schachtelemente aus dem Wasser genommen und anschließend von IKT-Mitarbeitern mittels Hochdruckwasserstrahlung mit Handlanze gereinigt (vgl. Abb. 128 und Abb. 129). Danach wurden die Schachtelemente bis zur Beschichtung durch Fachfirmen in der IKT-Versuchshalle unter einer Plane gelagert.



Abb. 128: Säuberung eines Schachtelementes mit Wasserhochdruck unter Verwendung einer Handlanze



Abb. 129: Ansicht eines gereinigten Schachtelementes

Die Beschichtungen wurden von insgesamt drei Fachfirmen (Rainer Kiel Kanalsanierung GmbH, Blomberg, Loos Pur Technik e.K., Neuenrade und KSX Kanalsanierung Xanten OHG, vgl. Tabelle 21) ausgeführt. Es kamen zwei Mörtel- und zwei Polyurethanprodukte zum Einsatz (vgl. Tabelle 54).

Tabelle 54: Übersicht über Vorbehandlung, Materialeinsatz, Auftragsart und Nachbehandlung der Schachtelemente

	Nr.	Schacht- typ	Lagerung vor Be- schichtung	Beschichtungswerkstoffe	Auftragsart	Lagerung / Nachbehand- lung nach Beschichtung
Mörtelbeschichtung	M1	Typ 2	20 Tage unter Wasser	Ergelit Kombina KT / Mapei Sewament 100	Auftrag von Hand	Lagerung in Versuchshalle unter Plane, alle 48 h Be- feuchtung der Beschich- tung
	M2	Typ 1		Ergelit Kombina KT / Mapei Sewament 100		
	M3	Typ 1		Ergelit Kombina KT		ab ca. 1 h nach Beschich- tung: Lagerung unter Was- ser für 27 Tage
	M4	Typ 1		Mapei Sewament 100		
	M5	Typ 2		Mapei Sewament 100		
	M6	Typ 2		Ergelit Kombina KT		
Polyurethanbeschichtung	P1	Typ 1	20 Tage unter Wasser	Oldodur WS 56	Aufspritz- verfahren	Lagerung in Versuchshalle unter Plane
	P2	Typ 1				ab ca. 1 h nach Beschich- tung: Lagerung unter Was- ser für 27 Tage
	P3	Typ 1		Baytec RT		Lagerung in Versuchshalle unter Plane
	P4	Typ 1				ab ca. 1 h nach Beschich- tung: Lagerung unter Was- ser für 27 Tage

Vor der Beschichtung der Probekörper wurden die Umgebungstemperatur, die Luftfeuchte sowie die Oberflächenfeuchte der zu beschichtenden Flächen an mehreren Stellen mittels

CM-Gerät gemessen. Die Umgebungstemperatur und die relative Luftfeuchte in der IKT-Versuchshalle lagen bei ca. 21°C bzw. 50 – 55 % relative Feuchte. Die Oberflächenfeuchte der zu beschichtenden Flächen lag zwischen 6 – 10 Masse%, wobei der Feuchtegehalt in den Bermen und Gerinnen der Schachtelemente des Typ 1 deutlich höher als in den Schachtwänden war. Dies ist vermutlich auf die stark unterschiedlichen Betonqualitäten und Verdichtungsgrade zurückzuführen.

Mörtelbeschichtung

Die Schachtelemente M1 – M6 wurden mit Mörtel im händischen Auftrag beschichtet. Der Mörtel wurde dabei mit einem Handrührgerät angemischt und in einer Schichtdicke von ca. zwei Zentimetern aufgetragen (vgl. Abb. 130 und Abb. 131). Um nach Aussage der ausführenden Sanierungsfirma eine bessere Verarbeitbarkeit des Mörtels zu erreichen, wurde von dem Personal der Firma Mischöl in einem ungefähren Mischungsverhältnis von 0,035:1 zum Mischwasser des Ergelit Kombina KT- Mörtels hinzugegeben. Vor Ausführung der Beschichtung wurde der ausführenden Fachfirma die Möglichkeit gegeben, weitere Verunreinigungen sowie stehendes Wasser auf der Oberfläche zu entfernen.



Abb. 130: Mischung des Mörtels von Hand Abb. 131: Mörtelbeschichtung im händischen Auftrag

Alle Schachtelemente vom Typ 1 wurden komplett, inklusive der Berme und des Gerinnes, beschichtet. Bei den Schachtelementen des Typ 2 wurde die Beschichtung nur auf die Schachtwänden aufgebracht. Die Schachtelemente M3 und M6 wurden jeweils zur Hälfte mit Ergelit Kombina KT und zur Hälfte mit Mapei Sewament 100 beschichtet.

Polyurethanbeschichtung

Die Schachtelemente P1 und P2 wurden mit dem Polyurethanprodukt Oldodur WS 56 im Aufspritzverfahren in einer Schichtdicke von ca. 2- 3 mm und die Schachtelemente P3 und P4 mit dem Polyurethanprodukt Baytec RT in einer Schichtdicke von ca. 4-6 mm beschichtet (vgl. Abb. 132-B/C). Da seitens der Hersteller keine besonderen Anforderungen an die Rautiefe des Untergrundes gestellt wurden und bei den In-situ-Untersuchungen keine Unterschiede bzgl. des Haftverbundes von Polyurethan auf glatten und rauen Untergründen festgestellt

werden konnten (vgl. Abschnitt 4.3.4.2), wurden nur Schachtelemente des Typ 1 (glatte Wandungsfläche) mit Polyurethan beschichtet. Den ausführenden Fachfirmen wurde die Möglichkeit gegeben, Verunreinigungen und auf der Oberfläche stehendes Wasser zu entfernen. Um das Verbundverhalten auch unter extremen Bedingungen abschätzen zu können, wurde jeweils eine Hälfte der zu beschichtenden Probekörper (P1, P2, P3 und P4) kurz vor der eigentlichen Beschichtung abermals befeuchtet (vgl. Abb. 132-A). Direkt während des Beschichtungsvorganges mit Baytec RT bildeten sich auf einigen dieser befeuchteten Bereiche Blasen in der Beschichtung (vgl. Abb. 132-D).



A



B



C



D

Abb. 132: Beschichtung der wassergesättigten Schachtelemente mit Polyurethan.
A: Erneute Befeuchtung einer Hälfte des Probekörpers direkt vor Ausführung der Beschichtungen. **B:** Beschichtung mit Ododur WS 56 im Aufspritzverfahren. **C:** Beschichtung mit Baytec RT im Aufspritzverfahren. **D:** Blasen im Gerinnebereich direkt nach der Beschichtung mit Baytec RT.

Die Schachtelemente M3, M4, M5 und M6 sowie P2 und P4 wurden ca. eine Stunde nach der Beschichtung für 27 Tage unter Wasser gelagert, um auch die Beschichtung und die Verbundfuge zwischen Beton und Beschichtung einer Wasserbelastung auszusetzen. Die Schachtelemente M1, M2, P1 und P3 wurden nach dem Beschichtungsvorgang mit einer Plane abgedeckt und außerhalb des Wasserbehälters in der Versuchshalle des IKT gelagert. Die mit Mör-

tel beschichteten Schachtelemente M1 und M2 wurden während der Lagerung alle zwei Tage nachbefeuchtet.

5.2.4 Optische Inspektion und Prüfung der Haftzugfestigkeit

28 Tage nach Ausführung der Beschichtung wurden die beschichteten Schachtelemente optisch inspiziert und die Haftzugfestigkeiten der Beschichtungen überprüft.

Bei der **optischen Inspektion** der beiden mit **Oldodur WS 56** beschichteten Schachtelemente P1 und P2 wurden keine Mängel festgestellt. Die Oberfläche war sehr glatt und haftete augenscheinlich gut an der Betonoberfläche (vgl. Abb. 133). Blasenbildungen, wie sie z.B. in [5] bei einigen ausgeführten Polyurethanbeschichtungen beobachtet worden war, lagen nicht vor. Bei einem Abklopfen der Beschichtung wurden keine Hohlstellen gefunden.

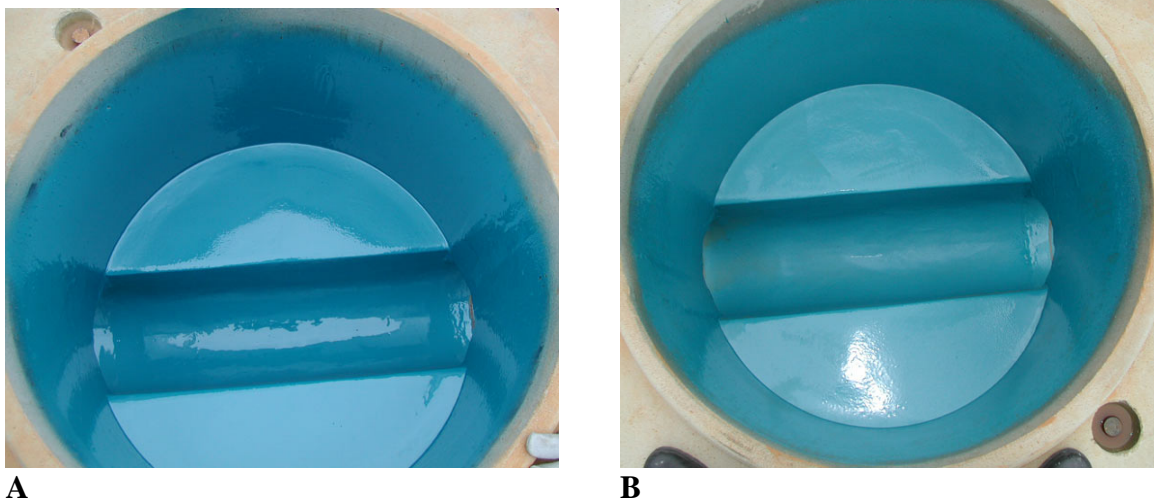


Abb. 133: Optische Inspektion der mit Oldodur WS 56 beschichteten Schachtelemente 28 Tage nach Ausführung der Beschichtung. A: Ansicht Schachtelement P1. B: Ansicht Schachtelement P2.

Die beiden mit **Baytec RT** beschichteten Schachtelemente P3 und P4 wiesen im Bereich der Wandung keine Mängel auf. Die Oberfläche war geringfügig wellig und haftete augenscheinlich gut an der Betonoberfläche. Bereits bei dem Beschichtungsvorgang hatten sich Blasen in der Beschichtung bzw. Hohlstellen hinter der Beschichtung im Bereich der Bermen und Gerinne der beiden Schachtelemente P3 und P4 gebildet (vgl. Abb. 134). Hier ergaben sich während der 28 Tage nach der Beschichtung keine weiteren Veränderungen mehr. Auf der gesamten Beschichtungsfläche des Schachtelementes P3 waren einzelne Poren von ca. 2 mm Durchmesser und von bis zu 2 mm Tiefe vorhanden. Diese reichten allerdings in keinem Fall bis zum Betonuntergrund.

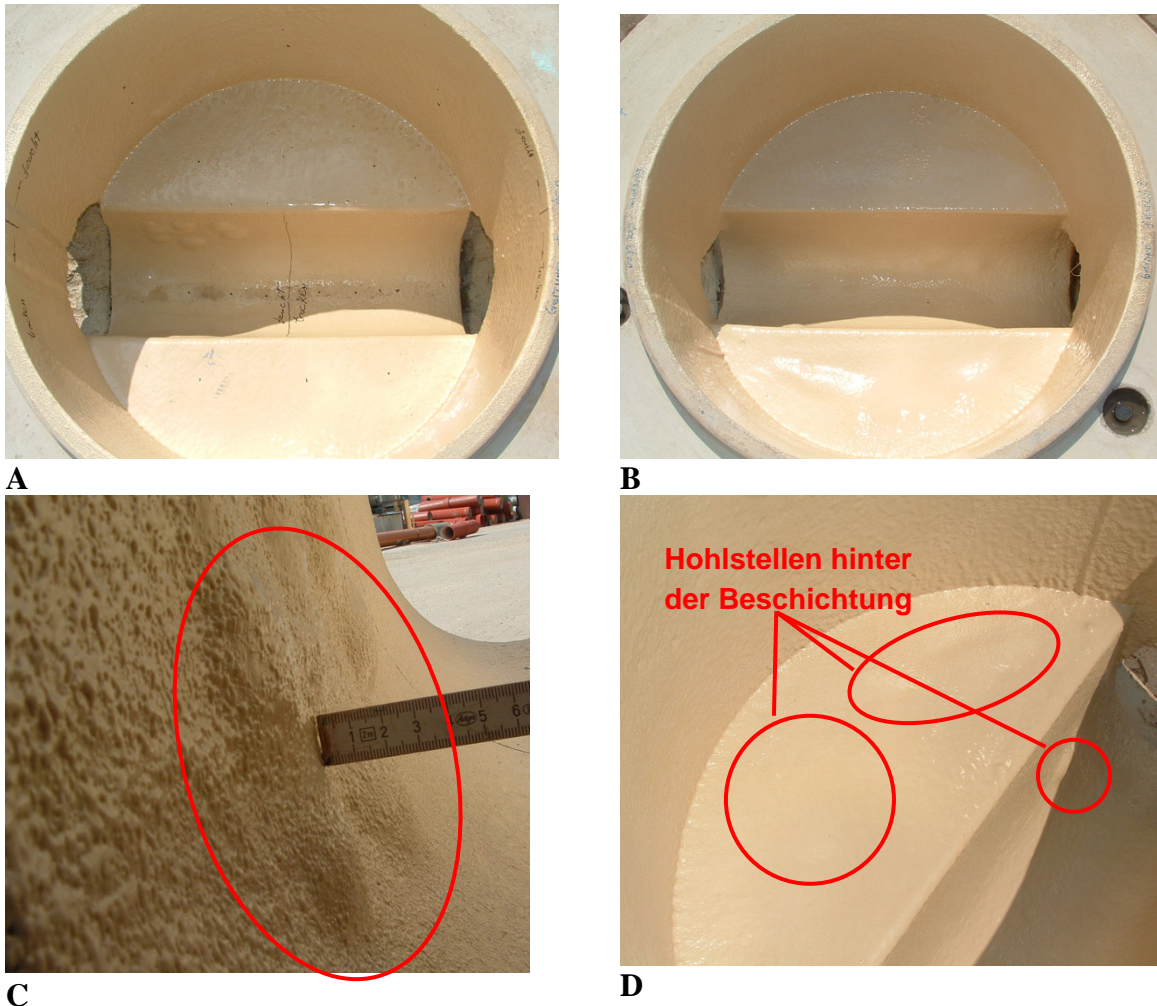


Abb. 134: Optische Inspektion der mit Baytec RT beschichteten Schachtelemente 28 Tage nach Ausführung der Beschichtung. **A:** Ansicht Schachtelement P3. **B:** Ansicht Schachtelement P4. **C:** Blasen in der Beschichtung im Gerinnebereich des Schachtelementes P3. **D:** Bereiche ohne Verbund zwischen Beschichtung und Untergrund in Berme und Gerinne des Schachtelementes P4

Bei den mit **Mörtel** beschichteten Schachtelementen, die nach der Beschichtung **außerhalb des Wassers gelagert** wurden (Schachtelemente M1 und M2), konnten sichtbare Mängel festgestellt werden. Hier lagen einerseits feine Risse auf der Beschichtungs Oberfläche (Schachtelement M1) sowie eine sichtbare Ablösung der Mörtelbeschichtung von der Betonwandung vor, welche über den gesamten Umfang der Wandung sichtbar war (Schachtelemente M1 und M2, vgl. Abb. 135-B/C/D). Die Risse sowie die Ablösung von der Betonwandung waren bei der Mörtelbeschichtung mit dem Produkt Ergelit Kombina KT stärker ausgeprägt. Der dumpfe Klang beim Abklopfen der Beschichtungs Oberflächen der Ergelit Kombina KT- und Mapei Sewament 100-Beschichtungen des Probekörpers M1 wies auf einen durchgehend schlechten Verbund zwischen Beschichtung und Betonoberfläche hin. Beim Probekörper M2 wurde dies nur im Bereich der Wandung festgestellt.

Die **Mörtelbeschichtungen** der Schachtelemente, die nach dem Beschichtungsvorgang **unter Wasser gelagert** waren (Schachtelemente M3, M4, M5 und M6), wiesen optisch keine Mängel auf. Hier waren keine Risse erkennbar, allerdings deutete der durchgehend dumpfe Klang bei einem Abklopfen der Beschichtungen auf den Wandungen der Probekörper M3, M4 und M5 auf Hohlstellen hin.

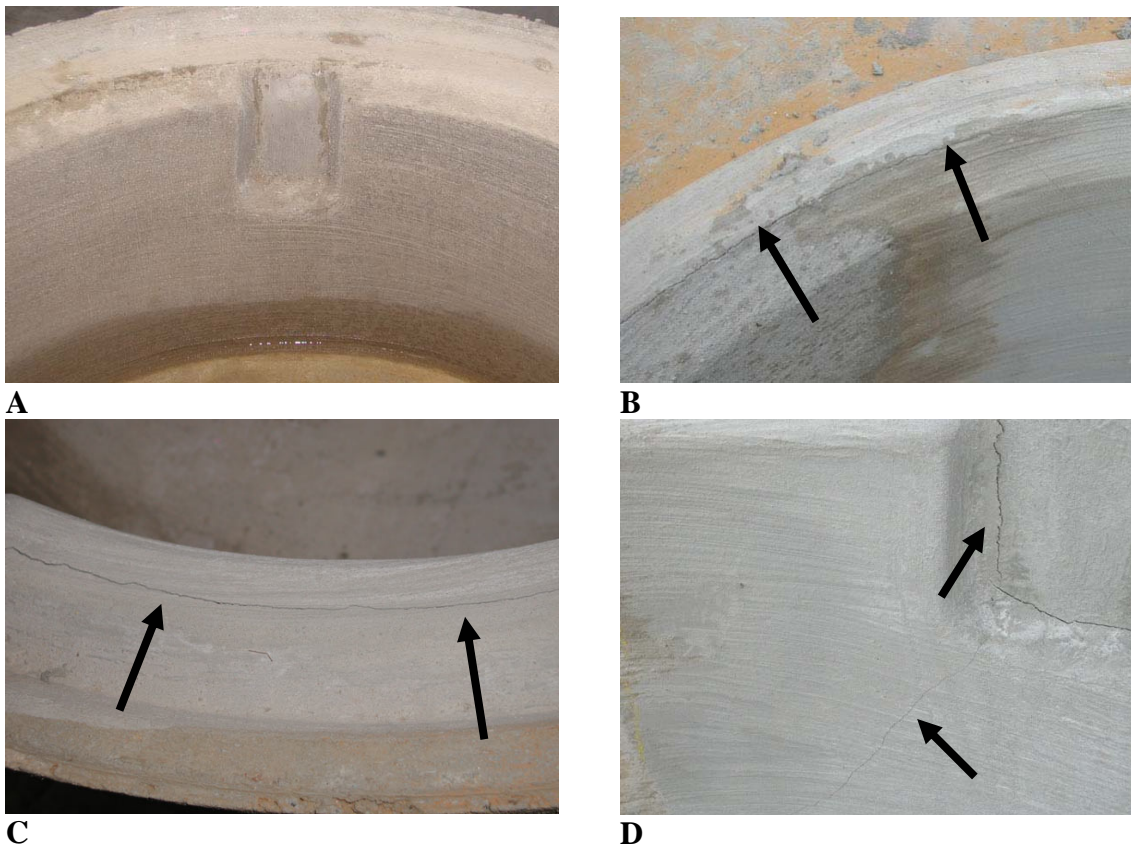


Abb. 135: *Optische Inspektion der beschichteten Schachtelemente 28 Tage nach der Beschichtung. A: Optisch keine Mängel erkennbar (Schachtelement M5). B: Spaltbildung zwischen Mörtelbeschichtung und Betonwandung (Schachtelement M1). C: Spaltbildung zwischen Mörtelbeschichtung und Betonwandung (Schachtelement M2). D: Risse in der Mörtelbeschichtung (Schachtelement M1).*

Nach der optischen Inspektion wurden **Haftzugprüfungen** an den Beschichtungen vorgenommen (vgl. Abb. 136). Bei den Schachtelementen des Typ 1 wurden pro Beschichtungswerkstoff und Oberfläche (Wandung, Berme, Gerinne) drei Haftzugprüfungen und bei den Schachtelementen des Typ 2 vier Haftzugprüfungen pro Beschichtungswerkstoff durchgeführt. Die Prüfung erfolgte analog zu dem unter Abschnitt 4.3.1.2 beschriebenen Prüfablauf. Auch hier zeigte sich die geringe Betonqualität der Bermen und Gerinne der Schachtelemente des Typ 1, da bei einer Vielzahl der dort durchgeführten Haftzugprüfungen der Beton frühzeitig versagte.



A



B

Abb. 136: Haftzugprüfungen an den Beschichtungen. **A:** Anbohren der Beschichtung als Vorbereitung für die Haftzugprüfung. **B:** Durchführung einer Haftzugprüfung.

In Tabelle 55, Tabelle 56 und Tabelle 57 sind die Ergebnisse der durchgeführten Haftzugprüfungen dargestellt.

Die Haftzugwerte der **Mörtelbeschichtung auf den Wandungen der Schachtelemente des Typ 2** waren sehr gering ($\varnothing 0,2 \text{ N/mm}^2$). Bis auf eine Ausnahme, bei der das Sanierungsmaterial selbst versagte, lag der Bruch immer in der Verbundfuge zwischen Mörtelbeschichtung und Untergrund. Auswirkungen einer unterschiedlichen Nachbehandlung (Lagerung unter Wasser bzw. in der Versuchshalle des IKT nach Beschichtung) waren an der Beschichtung mit **Ergelit Kombina KT** zu erkennen. Wie bereits bei der optischen Inspektion festgestellt worden war, hatte sich die Beschichtung des Schachtelementes M1 (Lagerung in IKT-Versuchshalle nach Beschichtung) fast vollständig von der Wandung gelöst. Entsprechend konnte das Haftzugprüfgerät kein einziges Mal eingesetzt werden, da sich die Prüfflächen direkt bei der



Abb. 137: Ablösung der Beschichtung bei Bohrung zur Vorbereitung der Haftzugprüfungen

Bohrung von der Wandung lösten und aus dem Bohrloch fielen (vgl. Abb. 137). Der Verbund der Beschichtung des Schachtelementes M6 (Lagerung unter Wasser nach Beschichtung) war geringfügig besser. Hohe Werte wurden aber auch hier nicht erzielt. Eine Probe fiel ebenfalls direkt bei der Bohrung zur Vorbereitung der Haftzugprüfung aus dem Bohrloch. Bei den weiteren Prüfungen wurden geringe Werte von 0,2 – 0,3 N/mm² gemessen. An der Beschichtung mit **Mapei Sewament 100** wurden ähnlich geringe Werte von im Mittel 0,4 N/mm² gemessen. Auch hier löste sich eine Probe direkt bei der Bohrung zur Vorbereitung der Haftzugprüfung von der Wandung. Zwischen den Haftzugfestigkeiten der Beschichtungen des Schachtelementes M1 (Lagerung in IKT-Versuchshalle nach Beschichtung) und des Schachtelementes M5 (Lagerung unter Wasser nach Beschichtung) konnten keine eindeutigen Unterschiede festgestellt werden.

Tabelle 55: Ergebnisse der **Haftzugprüfungen an Mörtelbeschichtungen auf wassergelagerten Schachtelementen aus Beton (Typ 2 gemäß DIN 4034 [98])**

	Nr.	Beschichtungswerkstoff	Ort der Prüfung	Haftzugfestigkeit nach Beschichtung [N/mm ²]															
				Prüfung Nr. 1				Prüfung Nr.2				Prüfung Nr. 3				Prüfung Nr. 4			
				BS ¹⁾	BT ¹⁾	BU ¹⁾	BK ¹⁾	BS ¹⁾	BT ¹⁾	BU ¹⁾	BK ¹⁾	BS ¹⁾	BT ¹⁾	BU ¹⁾	BK ¹⁾	BS ¹⁾	BT ¹⁾	BU ¹⁾	BK ¹⁾
Schachttyp 2	M 1	Mapei Sewament 100	Wandung	0,2				0,1				0,3				0,9			
		/	100	/	/	/	100	/	/	/	100	/	/	100	/	/	/		
	M 5	Ergelit Kombina KT	Wandung	0,0				0,0				0,0				0,0			
		/	100	/	/	/	100	/	/	/	100	/	/	/	100	/	/	/	
	M 6	Mapei Sewament 100	Wandung	0,0				0,2				0,3				0,3			
		/	100	/	/	/	100	/	/	/	100	/	/	/	100	/	/	/	
	M 6	Ergelit Kombina KT	Wandung	0,3				0,0				0,2				0,2			
		/	100	/	/	/	100	/	/	/	100	/	/	/	100	/	/	/	

Anmerkungen:

- 1) in den Zeilen unter den Festigkeitswerten sind jeweils die prozentualen Oberflächenanteile der verschiedenen Versagensarten dargestellt (BS: Bruch im Sanierungsmaterial / BT: Bruch in der Trennfuge zwischen Sanierungsmaterial und Untergrund / BU: Bruch im Untergrund / BK: Bruch in der Klebefuge)

An den **Mörtelbeschichtungen auf den Schachtelementen des Typ 1** wurden deutliche Unterschiede zwischen den Haftzugwerten an Wandung, Berme und Gerinne festgestellt. Bei sämtlichen Prüfungen an den Beschichtungen, die auf die **Wandungen** der Schachtelemente aufgebracht worden waren, versagte die Trennfuge zwischen Beschichtung und Untergrund frühzeitig (\emptyset -Haftzugfestigkeit: 0,06 N/mm²). Bei den Prüfungen an den Mörtelbeschichtungen des Schachtelementes M2 (Lagerung in IKT-Versuchshalle nach Beschichtung) lösten sich sämtliche Proben direkt bei der Bohrung zur Vorbereitung der Haftzugprüfung von der Wandung. Auf den **Bermen und Gerinnen** der Schachtelemente wurden höhere Haftzugfestigkeiten gemessen. Hier versagte bei 15 von 21 Prüfungen der Betonuntergrund bei Werten von 0,3 – 3,1 N/mm². Nur in einem Fall (Schachtelement M2, Beschichtung mit Ergelit Kombina KT, Prüfung Nr. 3 auf Berme) löste sich die Beschichtung direkt bei der Bohrung zur Vorbereitung der Haftzugprüfung von dem Untergrund. In drei Fällen (Schachtelement M2, Beschichtung mit Ergelit Kombina KT, Prüfung Nr. 1 auf Berme / Schachtelement M4, Be-

schichtung mit Sewament 100, alle drei Prüfungen im Gerinne) versagte das Sanierungsmaterial bei Werten von 0,3 – 1,4 N/mm².

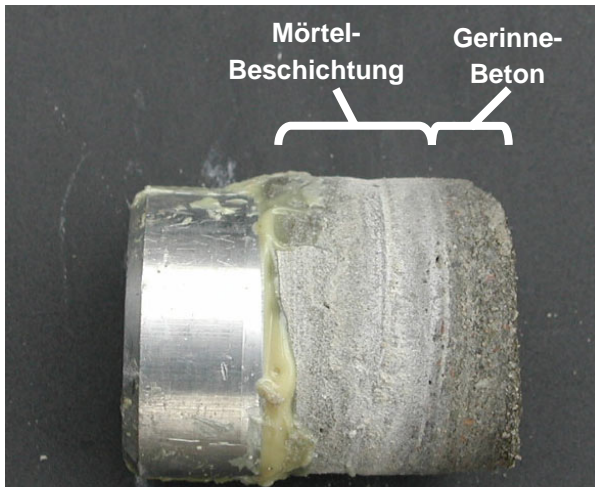


Abb. 138: Versagen des Schachtbetons bei Prüfung der Haftzugfestigkeit einer Mörtelbeschichtung im Gerinne eines Schachtelementes des Typ 1

Tabelle 56: Ergebnisse der **Haftzugprüfungen an Mörtelbeschichtungen** auf wassergelagerten Schachtelementen aus Beton (**Typ 1** gemäß DIN 4034 [6])

	Nr.	Beschichtungs- werkstoff	Ort der Prüfung	Haftzugfestigkeit nach Beschichtung [N/mm ²]											
				Prüfung Nr. 1				Prüfung Nr. 2				Prüfung Nr. 3			
				BS ¹⁾	BT ¹⁾	BU ¹⁾	BK ¹⁾	BS ¹⁾	BT ¹⁾	BU ¹⁾	BK ¹⁾	BS ¹⁾	BT ¹⁾	BU ¹⁾	BK ¹⁾
Schachtyp 1	M 2	Mapei Sewament 100	Wandung	0,0				0,0				0,0			
			/	100	/	/	/	100	/	/	/	100	/	/	
		Berme	1,0				0,8				0,7				
			/	/	100	/	/	/	100	/	/	100	/	/	
		Ergelit Kombina KT	Wandung	0,0				0,0				0,0			
			/	100	/	/	/	100	/	/	/	100	/	/	
	Berme	0,3				1,0				0,0					
		100	/	/	/	/	/	100	/	/	100	/	/		
	Gerinne	0,4				0,9				1,1					
		/	/	100	/	/	/	100	/	/	/	100	/		
	M 3	Ergelit Kombina KT	Wandung	0,0				0,1				0,1			
			/	100	/	/	/	100	/	/	/	100	/	/	
Berme			0,6				1,4				0,9				
/		/	100	/	/	/	100	/	/	/	100	/			
Gerinne		2,2				3,1				2,4					
		/	/	100	/	/	/	100	/	/	/	100	/		
M 4	Mapei Sewament 100	Wandung	0,0				0,2				0,3				
		/	100	/	/	/	100	/	/	/	100	/	/		
		Berme	0,3				0,4				0,3				
	/	/	100	/	/	/	100	/	/	/	100	/			
	Gerinne	1,0				0,7				1,4					
		100	/	/	/	100	/	/	/	100	/	/	/		

Anmerkungen:

- 1) in den Zeilen unter den Festigkeitswerten sind jeweils die prozentualen Oberflächenanteile der verschiedenen Versagensarten dargestellt (BS: Bruch im Sanierungsmaterial / BT: Bruch in der Trennfuge zwischen Sanierungsmaterial und Untergrund / BU: Bruch im Untergrund / BK: Bruch in der Klebefuge)

Bei den **Haftzugfestigkeiten der Polyurethanbeschichtungen** wurden große Unterschiede zwischen den eingesetzten Materialien festgestellt. Die Haftzugwerte der Polyurethanbeschichtung aus **Oldodur WS 56** an den **Wandungen** der Schachtelemente P1 und P2 waren mit durchschnittlich 3,2 N/mm² sehr hoch, in vielen Fällen versagte (teilweise) der Betonuntergrund. An den **Bermen** der Schachtelemente P1 und P2 wurden geringere Werte gemessen, allerdings war hier bei 11 von 12 Prüfungen die geringe Festigkeit des Untergrundes limitierend, die Bruchstellen lagen komplett im Betonuntergrund (vgl. Abb. 139-A/B). Bei einer Prüfung versagte die Verbundfuge zwischen Beschichtung und Betonuntergrund bereits bei 0,2 N/mm² (Schachtelement P1, befeuchtete Berme, Prüfung Nr. 1). Bei zwei Prüfungen an den sehr feuchten **Gerinnen** der Schachtelemente P1 und P2 lag die Bruchstelle zu einem Großteil im Betonuntergrund (Schachtelement P1, Gerinne, Prüfung Nr. 2: 0,5 N/mm² und Schachtelement P2, Gerinne, Prüfung Nr. 2: 1,3 N/mm²). Bei den restlichen vier Prüfungen wurden Haftzugfestigkeiten von 0,3 – 0,9 N/mm² ermittelt. Grundsätzlich war kein eindeutiger Unterschied zwischen den Haftzugfestigkeiten der Beschichtung des Schachtelementes P1 (Lagerung in IKT-Versuchshalle nach Beschichtung) und der Beschichtung des Schachtelementes P2 (Lagerung unter Wasser nach Beschichtung) feststellbar.

Die Haftzugfestigkeiten der Polyurethanbeschichtung aus **Baytec RT** an den **Wandungen** der Schachtelemente P3 und P4 waren mit durchschnittlich $1,2 \text{ N/mm}^2$ geringer als die Haftzugwerte der Beschichtung aus Oldodur WS 56. In den Bereichen der **Bermen**, die kurz vor der Beschichtung nicht erneut befeuchtet worden waren, wurde eine durchschnittliche Haftzugfestigkeit von $1,3 \text{ N/mm}^2$ gemessen, wobei bei allen drei Prüfungen an der Berme des Schachtelementes P3 die geringe Festigkeit des Betonuntergrundes limitierend war, da hier die Bruchstelle in allen Fällen komplett im Betonuntergrund lag. In den Bereichen der **Bermen, die kurz vor der Beschichtung erneut befeuchtet worden waren und an den sehr feuchten Gerinnen** wurden sehr geringe Haftzugfestigkeiten von im Mittel $0,2 \text{ N/mm}^2$ gemessen. Bei 7 von 12 Prüfungen (Schachtelement P3, befeuchtete Berme, Prüfung Nr. 1 und 3 / Schachtelement P3, Gerinne, Prüfung Nr. 1 und 2 / Schachtelement P4, befeuchtete Berme, Prüfung Nr. 1 und 3 / Schachtelement P4, Gerinne, Prüfung Nr. 3) löste sich die Beschichtung direkt bei der Bohrung zur Vorbereitung der Haftzugprüfung vom Untergrund (vgl. Abb. 139-C). Grundsätzlich war kein eindeutiger Unterschied zwischen den Haftzugfestigkeiten der Beschichtung des Schachtelementes P3 (Lagerung in IKT-Versuchshalle nach Beschichtung) und der Beschichtung des Schachtelementes P4 (Lagerung unter Wasser nach Beschichtung) feststellbar.

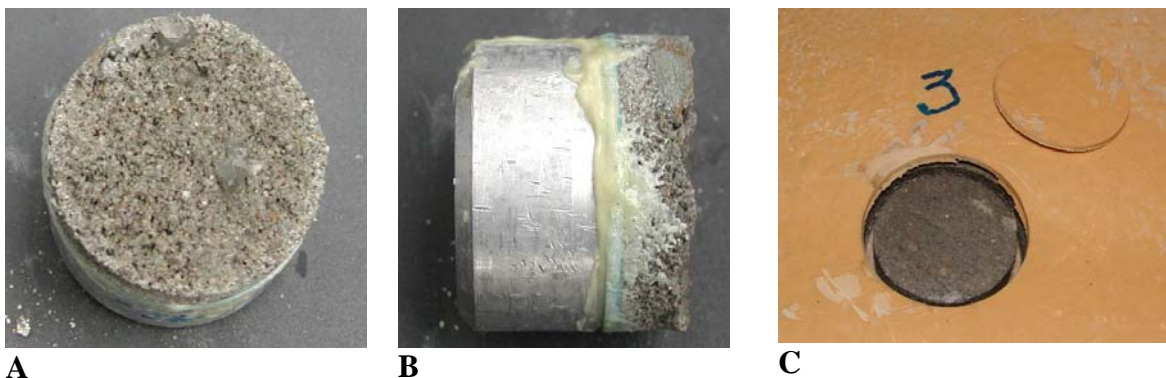


Abb. 139: Haftzugprüfungen an den Polyurethanbeschichtungen. **A:** Vollständiges Versagen des Betonuntergrundes, Frontalansicht des Probekörpers. **B:** Vollständiges Versagen des Betonuntergrundes, Seitenansicht des Probekörpers. **C:** Kein Verbund zum Betonuntergrund bei einer Polyurethanbeschichtung.

Tabelle 57: Ergebnisse der **Haftzugprüfungen an Polyurethanbeschichtungen** auf wassergelagerten Schachtelementen aus Beton (**Typ 1** gemäß DIN 4034 [6])

Nr.	Beschichtungs- werkstoff	Ort der Prüfung	Haftzugfestigkeit nach Beschichtung [N/mm ²]											
			Prüfung Nr. 1				Prüfung Nr. 2				Prüfung Nr. 3			
			BS ¹⁾	BT ¹⁾	BU ¹⁾	BK ¹⁾	BS ¹⁾	BT ¹⁾	BU ¹⁾	BK ¹⁾	BS ¹⁾	BT ¹⁾	BU ¹⁾	BK ¹⁾
P 1	Oldodur WS 56	Wandung	2,7				2,7				3,4			
			/	90	10	/	/	40	60	/	/	60	40	/
		befeuchtete Wandung*	3,4				3,8				2,8			
			/	50	50	/	/	90	10	/	/	50	50	/
		Berme	0,4				0,9				0,9			
			/	/	100	/	/	/	100	/	/	/	100	/
befeuchtete Berme*	0,2				1,4				1,5					
	/	100	/	/	/	/	100	/	/	/	100	/		
befeuchtetes Gerinne*	0,3				0,5				0,5					
	/	90	10	/	/	20	80	/	/	90	10	/		
P 2	Oldodur WS 56	Wandung	3,6				3,2				3,4			
			/	10	90	/	/	90	10	/	50	50	/	/
		befeuchtete Wandung*	2,9				2,9				3,3			
			/	60	40	/	/	50	50	/	/	/	100	/
		Berme	1,3				2,1				1,9			
			/	/	100	/	/	/	100	/	/	/	100	/
befeuchtete Berme*	0,6				1,4				0,5					
	/	/	100	/	/	/	100	/	/	/	100	/		
befeuchtetes Gerinne*	0,9				1,3				0,2					
	/	100	/	/	/	10	90	/	/	90	10	/		
P 3	Baytec RT	Wandung	1,9				0,9				1,5			
			/	/	100	/	/	90	10	/	/	/	/	100
		befeuchtete Wandung*	1,6				1,0				0,8			
			/	/	/	100	/	100	/	/	/	100	/	/
		Berme	1,3				1,1				1,3			
			/	/	100	/	/	/	100	/	/	/	100	/
befeuchtete Berme*	0,0				0,5				0,0					
	/	100	/	/	/	100	/	/	/	100	/	/		
befeuchtetes Gerinne*	0,0				0,0				0,1					
	/	100	/	/	/	100	/	/	/	100	/	/		
P 4	Baytec RT	Wandung	0,9				1,3				1,0			
			10	90	/	/	/	100	/	/	/	100	/	/
		befeuchtete Wandung*	1,2				1,1				1,8			
			/	100	/	/	20	80	/	/	10	90	/	/
		Berme	1,2				1,6				1,2			
			100	/	/	/	100	/	/	/	100	/	/	/
befeuchtete Berme*	0,0				0,7				0,0					
	/	100	/	/	/	100	/	/	/	100	/	/		
befeuchtetes Gerinne*	0,6				0,1				0,0					
	100	/	/	/	/	100	/	/	/	100	/	/		

Anmerkungen:

1) in den Zeilen unter den Festigkeitswerten sind jeweils die prozentualen Oberflächenanteile der verschiedenen Versagensarten dargestellt (BS: Bruch im Sanierungsmaterial / BT: Bruch in der Trennfuge zwischen Sanierungsmaterial und Untergrund / BU: Bruch im Untergrund / BK: Bruch in der Klebefuge)

*) der Untergrund wurde direkt vor Auftrag der Polyurethanbeschichtung benässt (vgl. Abb. 132-C)

■ der dargestellte Haftzugwert kann nur als Hinweis auf die Beschichtungsqualität angesehen werden, da der Prüfkörper zu mehr als 25 % in der Klebefuge versagte

5.2.5 Schlussfolgerungen

Aus den Versuchen zum Verbundverhalten von Mörtel- und Polyurethanbeschichtungen auf wassergelagerten Schachtelementen aus Beton können die folgenden Schlussfolgerungen gezogen werden:

Mörtelbeschichtungen

- In den Mörtelbeschichtungen, die nach der Beschichtung außerhalb des Wassers gelagert worden waren, zeigten sich bei der optischen Inspektion 28 Tage nach Beschichtungsauftrag trotz Abdecken der Schachtelemente mit einer Plane und Befeuchten der Beschichtung (alle 48 h) feine Risse sowie eine teilweise Ablösung der Mörtelbeschichtung von dem Betonuntergrund. Diese Mängel waren bei den unter Wasser gelagerten Beschichtungen nicht vorhanden. Somit zeigte sich erneut der **große Einfluss einer umfassenden Nachbehandlung** auf die Qualität von Mörtelbeschichtungen. Auch ist nicht auszuschließen, dass sich die von der Fachfirma bei einem Produkt gewählte **Zugabe von Mischöl negativ** auf die Verbundwirkung der Mörtelbeschichtungen auswirkte.
- Die ermittelten **Haftzugwerte** lagen auch bei dem ohne Mischöl verarbeiteten Mörtel deutlich unterhalb den Anforderungen, die an Mörtelbeschichtungen auf Betonuntergründen gestellt werden.^a Auch die angegebenen Werte der Hersteller von $> 2,0 \text{ N/mm}^2$ (vgl. [66], [95]) wurden damit deutlich unterschritten. Vor allem auf den sehr glatten Wandungen des Schachttyp 1 konnten nur sehr geringe Haftzugfestigkeiten von maximal $0,3 \text{ N/mm}^2$ erreicht werden. In einem Schachtelement lösten sich sämtliche Probekörper direkt bei Anbohren der Beschichtung zur Vorbereitung der Haftzugprüfung.
- Eine **Wassersättigung** der Beschichtung bzw. der Fuge zwischen Beschichtung und Beton ab ca. 1 h **nach Ausführung der Beschichtung** hatte keine negative Auswirkung auf den Verbund zwischen Mörtel und Beton. Im Gegenteil: die Haftzugwerte waren bei den Schachtelementen, die nach der Beschichtung unter Wasser gelagert wurden, in der Regel höher als bei den beschichteten Elementen, die außerhalb des Wassers gelagert wurden. An den Schachtelementen, die nach der Beschichtung außerhalb des Wassers gelagert wurden, bildeten sich in der Beschichtung trotz Abdecken der Schachtelemente mit einer Plane und Befeuchten der Beschichtung (alle 48 h) Risse.

a Instandsetzungs-Richtlinie des DAfStb [50], ZTV-SIB90 [63] bzw. GSTT-Informationen Nr. 18 [38]: $1,5 \text{ N/mm}^2$ im Mittel, kleinster Einzelwert von $1,0 \text{ N/mm}^2$

Polyurethanbeschichtungen

- Bei den Polyurethanbeschichtungen waren sehr **große Unterschiede zwischen den Produkten bereits beim Auftragen des Beschichtungsmaterials** zu erkennen. Während ein Produkt mit Blasenbildung auf einen hohen Feuchtegehalt des Betonuntergrundes reagierte, kam es bei dem anderen Produkt zu keinen optisch erkennbaren Reaktionen.
- Auch bei den **Haftzugfestigkeiten** wurden Unterschiede zwischen den untersuchten Produkten festgestellt. So konnte mit einem Produkt auf glattwandigen Betonoberflächen mit einer Untergrundfeuchtigkeit von ca. 6 Masse% (Wandung des Schachttyp 1) ein sehr guter Verbund mit Haftzugwerten von durchschnittlich ca. $3,2 \text{ N/mm}^2$ festgestellt werden. Die Anforderungen der maßgeblichen Richtlinien^a wurden damit erfüllt, die Angaben des Herstellers ($1,4 \text{ N/mm}^2$ bis $2,6 \text{ N/mm}^2$) deutlich übertroffen. Mit dem anderen Produkt wurden unter den gleichen Bedingungen Haftzugfestigkeiten von durchschnittlich ca. $1,2 \text{ N/mm}^2$ erzielt und die Anforderungen der maßgeblichen Richtlinien somit nicht erfüllt. Auf sehr feuchten Oberflächen (Feuchtegehalt ca. 10 Masse%) erfüllten beide Produkte die Anforderungen der maßgeblichen Richtlinien nicht, die gemessenen Haftzugfestigkeiten waren deutlich geringer.
- Die Wasserlagerung des beschichteten Probekörpers und damit auch die **Wassersättigung** der Fuge zwischen Beschichtung und Beton ab ca. 1 h **nach Ausführung der Beschichtung** hatten keine negative Auswirkung auf den Verbund zwischen Polyurethan und Beton. Zwischen den Haftzugfestigkeiten bei den Schachtelementen, die nach der Beschichtung unter Wasser gelagert wurden, und bei den Schachtelementen, die außerhalb des Wassers gelagert wurden, waren keine eindeutigen Unterschiede erkennbar.

a Anforderungen an die Haftzugfestigkeiten gemäß Instandsetzungs-Richtlinie des DAfStb [50] bzw. ZTV-SIB90 [63]: $1,5 \text{ N/mm}^2$ im Mittel, kleinster Einzelwert von $1,0 \text{ N/mm}^2$

6 Ergänzende Untersuchungen

Aus den Ergebnissen der In-situ-Untersuchungen und der Laborversuche ergaben sich, auch im Gespräch mit den beteiligten Netzbetreibern und Fachfirmen, die folgenden zusätzlichen Fragestellungen, die im Rahmen des Forschungsvorhabens weiter untersucht wurden:

Die in vielen Fällen deutlich unter den Anforderungen der maßgeblichen Richtlinien und Sachstandsberichten liegenden Haftzugfestigkeiten der Beschichtungen (vgl. Abschnitte 4.3.4 und 5.2.4) gaben Anlass zu intensiven Diskussionen. Dies vor allem vor dem Hintergrund, dass sich die derzeitigen Mindestzugfestigkeiten an den Anforderungen des Hoch- und Brückenbaus orientieren. Um die Höhe der Zugspannungen und wesentlichen Einflussgrößen unter den Randbedingungen in Abwasserschächten einzuschätzen zu können, wurden daher ergänzende **numerische Untersuchungen zu Haftzugspannungen** durchgeführt.

Die Schwächen bei der derzeitigen Oberflächenvorbereitung mit Wasserhochdruckstrahlen (vgl. Abschnitt 4.3.3.1) wurden ebenfalls intensiv diskutiert. Vorliegende Erfahrungen aus dem Bereich des Hochbaus (vgl. u.a. [102], [103]) zeigen, dass bei Einsatz einer Sandstrahlung mit Wasserzusatz hohe Oberflächenzugfestigkeiten und eine für die Haftung von Beschichtungen vorteilhafte Rauigkeit des zu beschichtenden Untergrundes erreicht werden können. Darüber hinaus liegen gute Erfahrungen mit einer derartigen Untergrundvorbereitung in Abwasserschächten bei einem beteiligten Netzbetreiber vor. Um weitere Anhaltspunkte über den Einfluss einer **Reinigung unter Beimischung von festem Strahlgut** zu gewinnen, wurden daher ergänzende Haftzugprüfungen an **vier Mauerwerksschächten** durchgeführt, bei denen verschiedene Methoden zur Reinigung des Untergrundes eingesetzt worden waren.

Während der Ausführung der Sanierungsarbeiten wurden nur geringe Abweichungen zwischen den Temperaturen und Luftfeuchten innerhalb und außerhalb des Schachtkörpers gemessen. In fast allen Fällen wurden nahezu keine bzw. nur unzureichende Nachbehandlungsmaßnahmen ergriffen, um bspw. die Mörtelbeschichtungen vor einer zu schnellen Austrocknung zu schützen (vgl. Abschnitt 4.3.3.2). In geschlossenen Schächten wird bislang von konstanten klimatischen Bedingungen^a ausgegangen, die für den Aushärteprozess eines Mörtels günstig sind. Um den **Einfluss des Außenklimas** auf das Klima in geschlossenen Abwasserschächten abschätzen zu können, wurden die Temperatur und Luftfeuchte in vier Schächten über einen Zeitraum von mehreren Tagen aufgezeichnet und den außerhalb des Schachtes ermittelten Werten gegenübergestellt.

Darüber hinaus zeigte sich, dass einige Netzbetreiber **Mörtelbeschichtungen in Kombination mit PE-HD-Auskleidungssystemen** einsetzen, um Kosten gegenüber einer Vollauskleidung des Schachtes einzusparen. Um hier vor allem die Qualität der Übergangsbereiche und

a Vgl. z.B. GSTT-Informationen Nr. 18 [38]: rel. Luftfeuchte ca. 80 – 100 %, Temperatur ca. +10 - +15°C.

die Dichtigkeit des Gesamtsystems abschätzen zu können, wurden an vier Schächten ergänzende optische Inspektionen und Dichtheitsprüfungen durchgeführt.

6.1 Numerische Untersuchungen zu Haftzugspannungen

Bei der Sanierung von Abwasserschächten mittels Mörtelbeschichtungen treten in der Fuge zwischen Beschichtung und Schachtwandung Zugspannungen auf, die durch mechanische Beanspruchungen, wie z.B. durch Erd- oder Grundwasserdruck bzw. durch Schwindprozesse im Zementstein im Zuge der Austrocknung der Mörtelbeschichtung verursacht werden. Um die Höhe dieser Zugspannungen und die wesentlichen Einflussgrößen unter den Randbedingungen in Abwasserschächten einzuschätzen, wurden vom Lehrstuhl für Statik und Dynamik an der Ruhr-Universität-Bochum (Prof. Dr. Günther Meschke) numerische Untersuchungen hinsichtlich der Haftzugspannungen in Abwasserschächten aus Betonfertigteilen durchgeführt (vgl. [104]). Deren wesentliche Ergebnisse sind nachfolgend für den vorliegenden Anwendungsfall zusammengefasst.

Die Berechnungen wurden auf **zweidimensionale Analysen von kreisrunden Betonschächten** beschränkt. Der Inendurchmesser des Schachtringes und die Dicke der Schachtwandung wurden gemäß DIN V 4034 [6] zu 1000 mm bzw. 120 mm angenommen. Als Schichtdicke der Mörtelbeschichtung wurden 20 mm, 30 mm und 40 mm gewählt (vgl. Abb. 140). Die gewählten Materialparameter für den Altbeton sowie für die Mörtelbeschichtung sind in Tabelle 58 zusammengefasst. Insgesamt wurden fünf Lastfälle untersucht. Eine Übersicht gibt Tabelle 59.

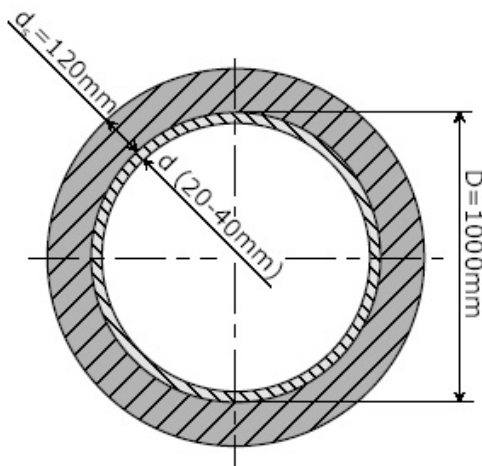


Abb. 140: Geometrie des beschichteten Abwasserschachtes (aus [104])

Tabelle 58: Gewählte Materialparameter für Altbeton und Beschichtungsmörtel

Materialparameter	Symbol [Einheit]	Altbeton	Beschichtungsmörtel
Elastizitätsmodul	E [N/mm ²]	33.500 ^{a)}	28.000 ^{c)}
Querdehnungszahl	ν [-]	0,2 ^{d)}	0,2 ^{d)}
Druckfestigkeit	f_{cu} [N/mm ²]	35 ^{a)}	62 ^{e)}
Zugfestigkeit	f_{ct} [N/mm ²]	3,2 ^{a)}	8,9 ^{e)}
Porosität	ϕ_0 [-]	0,146 ^{b)}	0,208 ^{f)}
initiale Durchlässigkeit	k_0 [mm ²]	$1,648 \cdot 10^{-15}$ ^{b)}	$5,549 \cdot 10^{-11}$ ^{f)}

a) Materialparameter eines Beton C 35/45 (vgl. Standardqualität Schachtfertigteile aus Beton in DIN V 4034 [6]).

b) Abschätzung auf Basis von Versuchsreihen, u.a. am Institut für Bauphysik der Universität Leuven (Belgien), [105], vgl. auch [106].

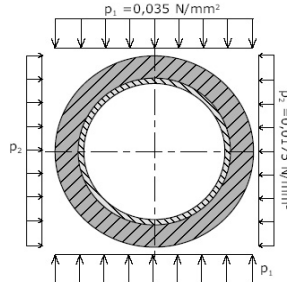
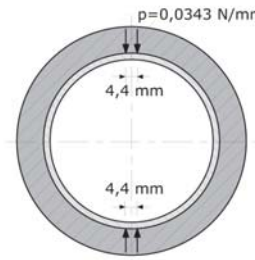
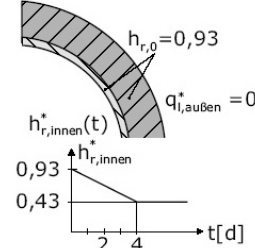
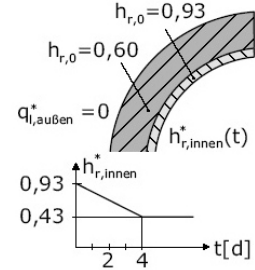
c) Mittelwert der im Rahmen des vorliegenden Forschungsprojektes an drei Mörtelproben ermittelten Elastizitätsmodule.

d) Angaben aus [107].

e) Herstellerangaben über die Materialkennwerte eines marktüblichen Beschichtungsmörtels [65].

f) Abschätzung aus umfangreichen Versuchsreihen, u.a. am Institut für Bauklimatik an der TU Dresden [105].

Tabelle 59: Bei den numerischen Untersuchungen berücksichtigte Lastfälle

Lastfälle	Lastannahme	Abbildungen (aus [104])
<p>Lastfall 1: Erdruck</p>	<p>Erddruck auf den Schacht von außen in einer Tiefenlage von 3,5 m gemäß Anhang K der DIN V 4034 [6]</p>	
<p>Lastfall 2: Grundwasserdruck</p>	<p>Auf eine Fläche von 0,20 cm² auf die Mörtelbeschichtung wirkender Grundwasserdruck von außen in einer Tiefenlage von 3,5 m, der durch zwei Einzelbelastungen idealisiert wird.</p>	
<p>Lastfall 3: Austrocknung nach Auftrag auf durchfeuchteten Betonuntergrund</p>	<p>Simulation einer Austrocknung der Mörtelbeschichtung (Annahme der Wassersättigung des Mörtels zu 93 %) durch Absenken der relativen Luftfeuchte von 93 % innerhalb von 4 Tagen auf 43 % (ausgehend von einem vollkommen durchfeuchteten Betonuntergrund mit einem Porenwassergehalt von 93 %). Der Feuchtefluss an der erdberührten Außenseite des Schachtes wird dabei zu Null angenommen.</p>	
<p>Lastfall 4: Austrocknung nach Auftrag auf trockenen Betonuntergrund</p>	<p>Simulation einer Austrocknung der Mörtelbeschichtung (Annahme der Wassersättigung des Mörtels zu 93 %) durch Absenken der relativen Luftfeuchte von 93 % innerhalb von 4 Tagen auf 43 % (ausgehend von einem trockenen Betonuntergrund mit einer Wassersättigung von 60 %). Der Feuchtefluss an der erdberührten Außenseite des Schachtes wird dabei zu Null angenommen.</p>	
<p>Lastfall 5: Erdruck aus Verkehrslasten</p>	<p>Seitlicher Erdruck aus Verkehrslasten gemäß DIN V 4034 [6] in Verbindung mit dem Arbeitsblatt ATV-DVWK-A 127 [108]. Der Schacht wurde dabei in Anlehnung an [109] entlang dem Umfang als elastisch gelagert angenommen. Die Bettungszahl wurde in Anlehnung an das Arbeitsblatt ATV-DVWK-A 127 [108] für einen bindigen Mischboden der Gruppe 3 mit $c_f = 5 \text{ N/mm}^2$ gewählt.</p>	<p style="text-align: center;">-</p>

Grundlage der zweidimensionalen numerischen Untersuchungen war die Methode der Finiten Elemente unter Verwendung dreidimensionaler 8-knotiger finiter Elemente und der Annahme eines ebenen Spannungszustandes. Für die Analysen wurden in Abhängigkeit des untersuch-

ten Lastfalls unterschiedliche Diskretisierungen herangezogen. Abb. 141-A/B zeigen die für die Lastfälle 1, 2, 3 und 4 verwendeten Finite-Elemente-Netze. Für den Lastfall 5 wurde wegen der Annahme einer einseitigen Verkehrslast die Hälfte des Schachtes diskretisiert. Die Feinheit des Netzes kann Abb. 141-A entnommen werden. Für die Analysen der Austrocknung des Schichtmörtels wurde ein am Lehrstuhl für Statik und Dynamik der Ruhr- Universität-Bochum entwickeltes hygro-mechanisches Modell für zementgebundene Werkstoffe eingesetzt [110, 111, 112]. Für alle Lastfälle wurden die Radialspannungen, Umfangsspannungen sowie Schubspannungen entlang der gesamten Grenzfläche zwischen Mörtelbeschichtung und Schachtwandung ermittelt und die Beanspruchungen der Mörtelschicht dokumentiert, sofern sie für etwaige Schadensrisiken relevant sind. Der dreidimensionale Charakter von Beanspruchungen, wie sie z.B. durch konzentriert angreifende Verkehrslasten oder durch Grundwasserbelastungen hervorgerufen werden können, blieb unberücksichtigt. Weiterhin wurden die Veränderungen der mechanischen Eigenschaften des Mörtels im Zuge der Hydratation nicht berücksichtigt. Tabelle 60 gibt eine Übersicht über die aus den untersuchten Lastfällen resultierenden maximalen Spannungen in der Verbundfuge zwischen Mörtelbeschichtung und Betonuntergrund. Die Ergebnisse werden dabei in Polarkoordinaten dargestellt, die entsprechenden Spannungskomponenten sind in Abb. 141-C abgebildet.

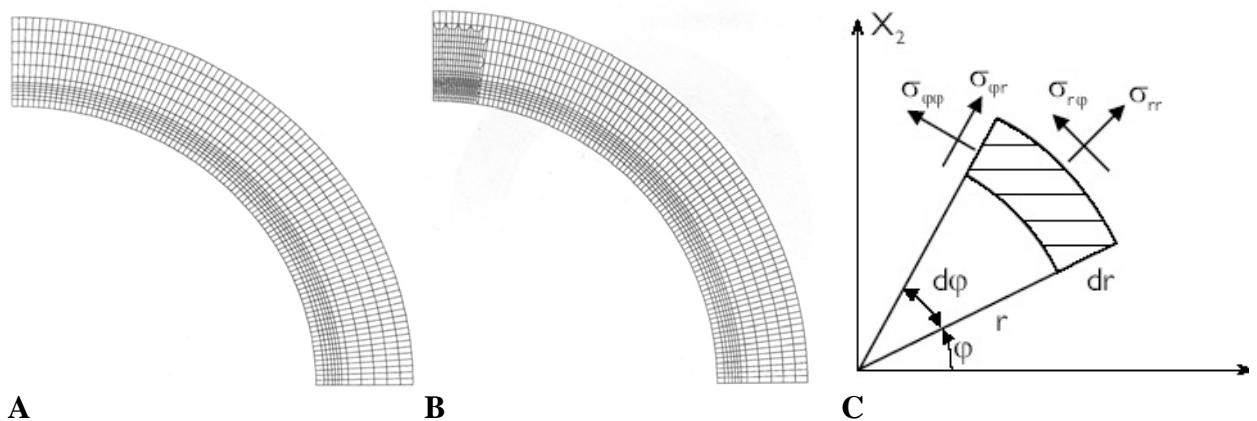


Abb. 141: Finite Elemente Diskretisierungen und Darstellung der Ergebnisse.
A: Diskretisierung für die Lastfälle 1, 3 und 4. **B:** Diskretisierung für den Lastfall 2. **C:** Spannungskomponenten $\sigma_{\phi\phi}$, σ_{rr} und $\sigma_{\phi r} = \sigma_{r\phi}$ (alle Abbildungen aus [104]).

Tabelle 60: Aus den einzelnen Lastfällen resultierende maximale Spannungen in der Verbundfuge zwischen Mörtelbeschichtung und Betonuntergrund

Lastfall	Resultierende max. Spannungen [N/mm ²]		
	Radialspannung σ_{rr}	Umfangsspannung $\sigma_{\phi\phi}$	Schubspannung $\sigma_{\phi r}$
1 (Erddruck)	$\approx 0,0107 \text{ N/mm}^2$ für Schichtdicke d = 30 mm	$\approx 0,223 \text{ N/mm}^2$ für Schichtdicke d = 20 mm	$\approx - 0,0369 \text{ N/mm}^2$ für Schichtdicke d = 40 mm
2 (Grundwasserdruck)	$\approx 0,0212 \text{ N/mm}^2$ für Schichtdicke d = 20 mm	$\approx 0,014 \text{ N/mm}^2$ für Schichtdicke d = 20 mm	$\approx - 0,005 \text{ N/mm}^2$ für Schichtdicke d = 20-40 mm
3 (Austrocknung, feuchter Beton)	$\approx 0,24 \text{ N/mm}^2$ für Schichtdicke d = 40 mm	$\approx - 0,41 \text{ N/mm}^2$ für Schichtdicke d = 20 mm	$0,0 \text{ N/mm}^{2*}$
4 (Austrocknung, trockener Beton)	$\approx 0,41 \text{ N/mm}^2$ für Schichtdicke d = 20 mm	$\approx 2,284 \text{ N/mm}^2$ für Schichtdicke d = 20 mm	$0,0 \text{ N/mm}^{2*}$
5 (Erddruck aus Verkehrslasten)	$\approx 0,013 \text{ N/mm}^2$ für Schichtdicke d = 30 mm	$\approx 0,199 \text{ N/mm}^2$ für Schichtdicke d = 30 mm	$\approx 0,018 \text{ N/mm}^2$ für Schichtdicke d = 30 mm

* die Schubspannungen sind aufgrund des auftretenden hydrostatischen Spannungszustandes Null

Tabelle 60 ist zu entnehmen, dass vor allem die Beanspruchungen infolge der Austrocknung des Beschichtungsmörtels maßgeblich sind (Lastfälle 3 und 4). Die Ergebnisse der Berechnung dieser beiden Lastfälle werden im Folgenden detailliert dargestellt.

Lastfall 3 und 4: Austrocknung der Mörtelbeschichtung

Für die Modellierung der Austrocknung der innenliegenden Mörtelbeschichtung wurden zwei grenzwertige Szenarien untersucht. In **Lastfall 3** wird von einem vollkommen durchfeuchten Zustand^a des Schachtringes zum Zeitpunkt der Aufbringung der Mörtelschicht ausgegangen. Die Austrocknung der Mörtelbeschichtung erfolgt somit ausschließlich von der inneren Oberfläche her. In **Lastfall 4** wird ein weitgehend ausgetrockneter Zustand des Schachtringes zugrundegelegt. Die Austrocknung der Mörtelbeschichtung erfolgt somit sowohl von der inneren Oberfläche als auch von der Grenzfläche zwischen Beschichtung und Schachtwandung her in Richtung des trockenen Schachtbetons. Die initialen hygrischen Bedingungen im (trockenen) Schachtbeton werden dabei mit $h_{r,0} = 0,6$ angenommen. In beiden Lastfällen wird die Austrocknung an der Innenseite durch das Absenken der relativen Luftfeuchte von $h_{r,\text{innen}} = 0,93$ innerhalb von 4 Tagen auf $h_{r,\text{innen}} = 0,43$ modelliert. Weiterhin wird in beiden Lastfällen

a Initiale Wassersättigung des Betons von 93 % (Porenwassergehalt), entsprechend $h_{r,0} = 0,93$

an der (erdberührten und stets erdfeuchten) Außenseite der Feuchtefluss zu $q_l = 0$ angenommen.

Abb. 142 enthält die zeitlichen Verläufe der Radialspannung σ_{rr} und der Umfangsspannung $\sigma_{\phi\phi}$ in der Haftpuge zwischen Mörtelbeschichtung und Schachtring für eine **Austrocknung der Mörtelbeschichtung ausgehend von feuchtem Altbeton (Lastfall 3)**. Die Schubspannungen $\sigma_{\phi r}$ sind aufgrund des dabei auftretenden hydrostatischen Spannungszustandes Null. Bei den angegebenen Spannungskomponenten handelt es sich um effektive Spannungen, also um jene Spannungen, die direkt auf das Zementsteinskelett wirken und für die Bemessung von Zugfestigkeiten maßgeblich sind. Die maximale Haftzugspannung tritt für die Schichtdicke $d = 40$ mm nach ca. 50 Tagen auf. Sie beträgt $\sigma_{rr} \approx 0,24$ N/mm². Abb. 143 zeigt die Verläufe der Radial- und Umfangsspannungen über die Dicke des beschichteten Schachtrings nach 4 Tagen, also unmittelbar nach dem Aufbringen der hygrischen Randbedingungen an der Innenseite, für die drei untersuchten Schichtstärken. Es ist zu erkennen, daß an der Innenseite durch den Austrocknungsprozess hohe Zugspannungen von etwa $\sigma_{\phi\phi} \approx 3$ N/mm² an der Innenseite der Mörtelbeschichtung in Umfangsrichtung hervorgerufen werden. Diese sind zwar kleiner als die Herstellerangaben zur Zugfestigkeit des erhärteten Mörtels. Im Zuge der Hydratation könnten jedoch aufgrund der niedrigeren Festigkeitswerte des jungen Mörtels schwindinduzierte Schäden auftreten. In radialer Richtung werden im Abstand von etwa 10,7 / 17,0 / 24,0 mm für die Schichtdicken 20 / 30 / 40 mm von der Innenseite Druckspannungen in der Mörtelschicht aufgebaut. Innerhalb der Mörtelschicht bildet sich in einem Abstand von etwa 9,5 – 16,2 mm von der Haftpuge eine Zone von radialen Zugspannungen in der Größenordnung von etwa $\sigma_{rr} \approx 0,5$ N/mm² aus. Diese Spannungen sind kleiner als die vorher erwähnten Zugspannungen in der Mörtelschicht in Umfangsrichtung.

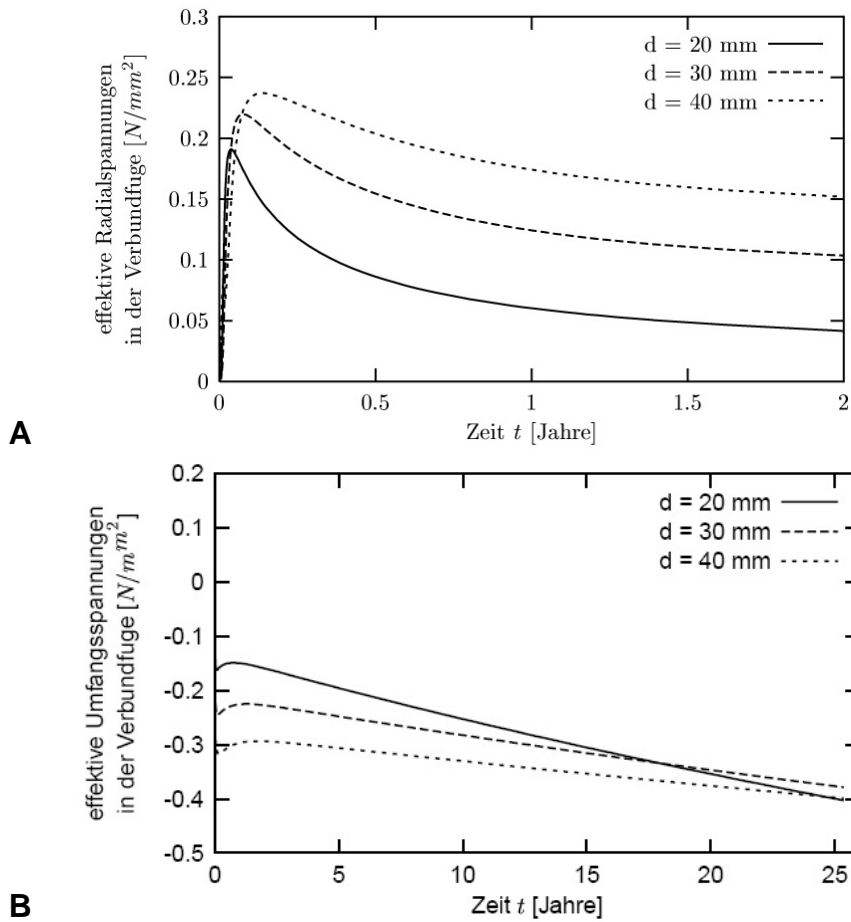


Abb. 142: Verlauf der Spannungen innerhalb der Fuge zwischen Mörtelbeschichtung und Schachtring für Lastfall 3 ($0 \leq \phi \leq 90^\circ$). **A:** Radialspannungen. **B:** Umfangsspannungen. (aus [104])

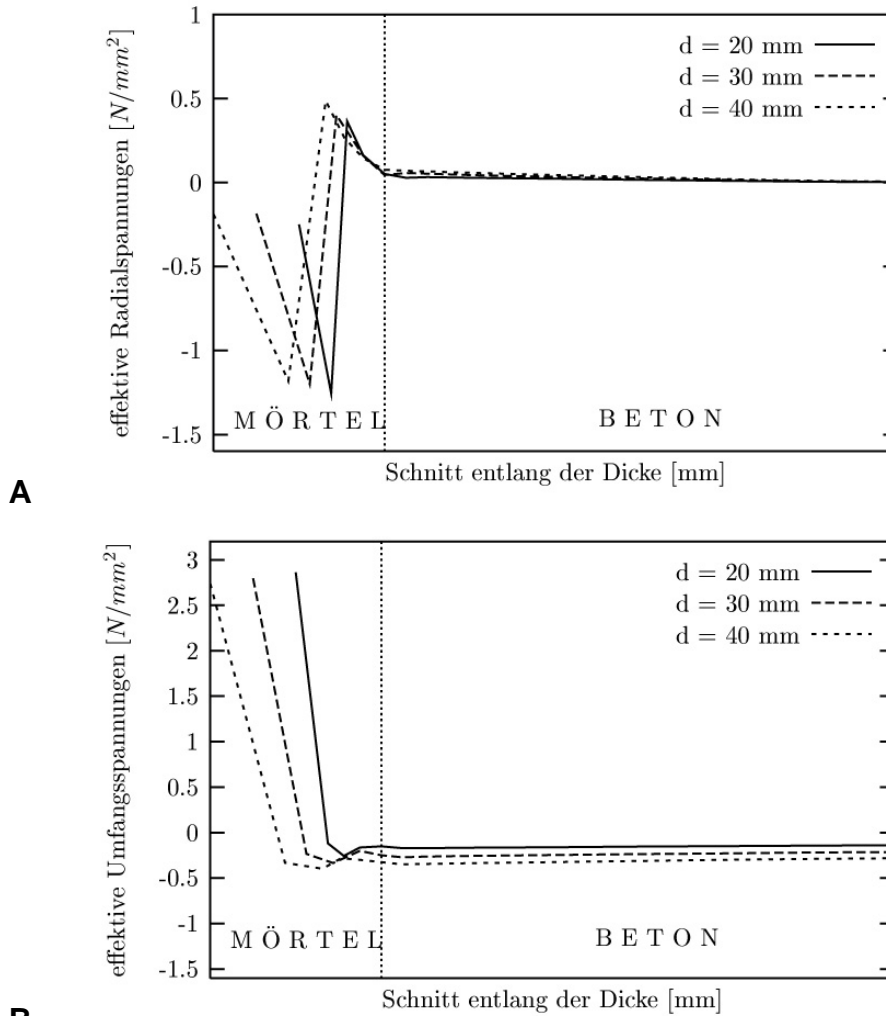


Abb. 143: Verlauf der Spannungen über die Dicke des beschichteten Schachtrings für Lastfall 3 ($t = 4d$). **A:** Radialspannungen. **B:** Umfangsspannungen. (aus [104])

Der **Lastfall 4 (Austrocknung der Mörtelbeschichtung ausgehend von einem trockenen Altbeton)** ist durch zwei Austrocknungsfronten gekennzeichnet, die gleichzeitig auftreten: Die Austrocknung an der Innenseite und eine Austrocknung vom frischen Beschichtungsmörtel in den trockenen Schachtring hinein. Abb. 144 enthält die zeitlichen Verläufe der Radialspannung σ_{rr} und der Umfangsspannung $\sigma_{\phi\phi}$ in der Haftpuge zwischen Mörtelbeschichtung und Schachtring. Die maximale Haftzugspannung tritt für die Schichtdicke $d= 20$ mm nach ca. 8 Tagen auf. Sie beträgt $\sigma_{rr} \approx 0,41$ N/mm². Abb. 145 zeigt die Verläufe der Radial- und Umfangsspannungen über die Dicke des beschichteten Schachtrings nach 4 Tagen, also unmittelbar nach dem Aufbringen der hygrischen Randbedingungen an der Innenseite, für die drei untersuchten Schichtstärken. Hier treten die maximalen Radialspannungen im Schachtbeton, etwa 5 cm von der Haftpuge entfernt, auf. Die maximalen Umfangsspannungen hingegen ergeben sich am Innenrand der Beschichtung und weisen eine Größenordnung von $\sigma_{rr} \approx 1,55$ N/mm² bzw. $\sigma_{\phi\phi} \approx 3$ N/mm² auf.

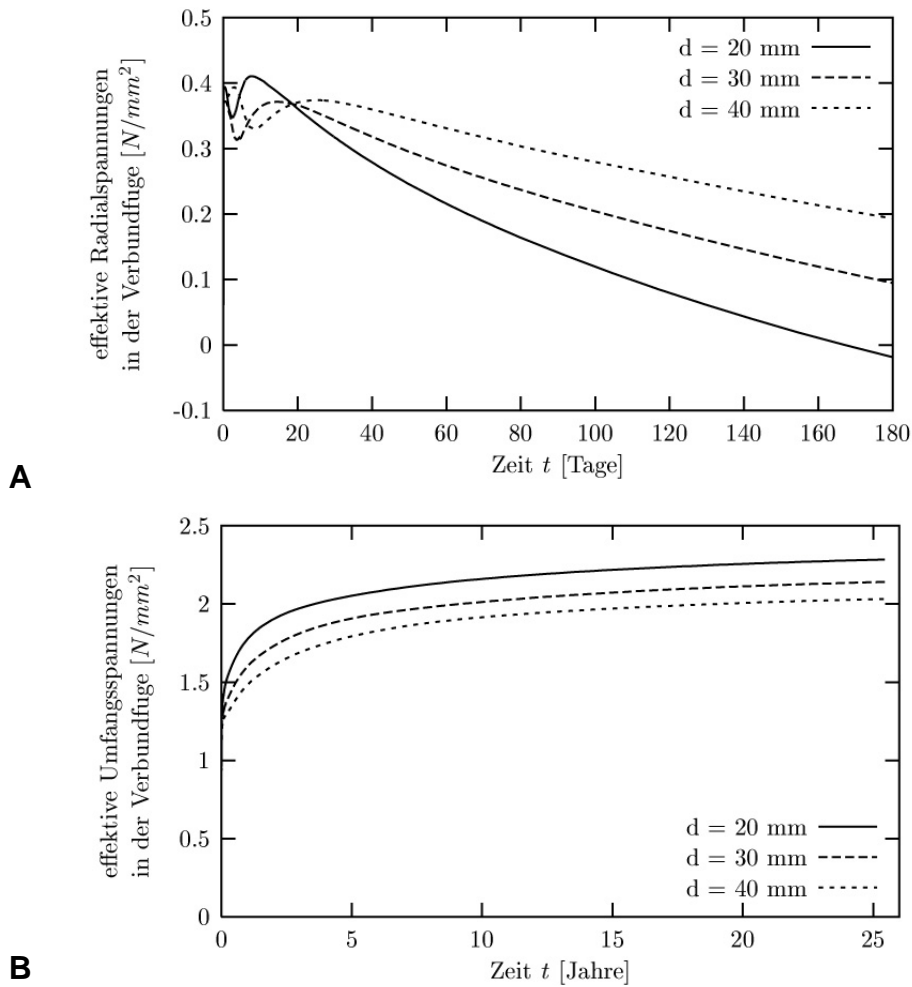


Abb. 144: Verlauf der Spannungen innerhalb der Fuge zwischen Mörtelbeschichtung und Schachtring für Lastfall 4 ($0 \leq \phi \leq 90^\circ$). **A:** Radialspannungen. **B:** Umfangsspannungen. (aus [104])

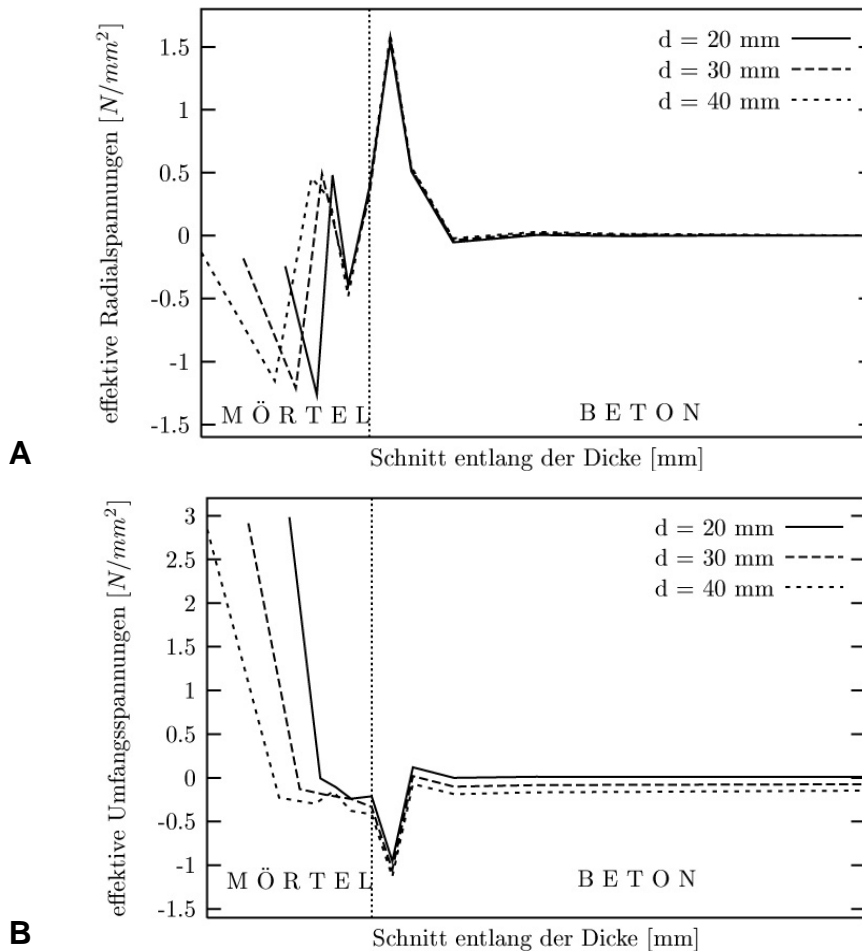


Abb. 145: Verlauf der Spannungen über die Dicke des beschichteten Schachtrings für Lastfall 4 ($t = 4d$). **A:** Radialspannungen. **B:** Umfangspannungen. (aus [104])

Aus den vorliegenden numerischen Analysen von beschichteten Abwasserkanälen können die nachfolgenden **Schlussfolgerungen** gezogen werden. Diese Schlussfolgerungen beziehen sich auf die untersuchte Situation (gekennzeichnet durch eine gewählte Größenordnung des Durchmessers des Schachts und der Dicke der Schachtrings). Eine Verallgemeinerung ist daher nicht ohne Weiteres möglich.

Im Ergebnis erwiesen sich die Beanspruchungen infolge der **Austrocknung des Beschichtungsmörtels** als maßgeblich für die Beanspruchung der Haftpuge zwischen Mörtelschicht und Schachtbeton. Die Belastungen durch Erd- und Grundwasserdruck sowie durch seitlichen Erddruck in Folge von Straßenverkehrslasten sind im vorliegenden Fall nur von untergeordneter Bedeutung. Insbesondere der **Feuchtegehalt des Untergrundes** hat großen Einfluss auf die Höhe der auftretenden Spannungen. Wird die Beschichtung auf einen vollständig durchfeuchteten Altbeton aufgebracht, so treten (in den untersuchten Fällen) in der Verbundfuge maximale Haftzugspannungen in der Größenordnung von $\approx 0,18 - 0,25\text{ N/mm}^2$ auf, wobei die maximalen Spannungen mit steigender Dicke der Mörtelschicht zunehmen. Wird die Be-

schichtung auf einen vollständig trockenen Altbeton aufgebracht, so treten (bei den untersuchten Fällen) in der Verbundfuge maximale Haftzugspannungen in der Größenordnung von $\approx 0,36 - 0,41 \text{ N/mm}^2$ auf, wobei der kleinste Wert bei $d = 30 \text{ mm}$ und der größte Wert bei $d = 40 \text{ mm}$ auftritt. Diese Zugspannungen stellen sich in beiden Austrocknungsszenarien bereits in den ersten Tagen bzw. Wochen ein, d.h. noch vor Erreichen der üblicherweise diskutierten 28-Tage-Festigkeit des Mörtels.

Im Zuge der Austrocknung treten in frühem Stadium der Austrocknung auch **innerhalb der Mörtelschicht große Zugspannungen** in Radialrichtung und in Umfangsrichtung auf, die für die Dauerhaftigkeit von beschichteten Abwasserschächten maßgeblich sein können. Diese Zugspannungen können - auch verstärkt durch Zwangsbeanspruchungen infolge **hydratationsbedingtem chemischen Schwinden** des Mörtels - zu Mikrorissen in radialer Richtung und damit zu Spannungsumlagerungen führen. Weiterhin wird der Feuchtetransport durch solche Mikrorisse sehr stark beeinflusst, so dass der gesamte Austrocknungsprozess und in weiterer Folge die entstehenden Beanspruchungen der Grenzschicht zwischen Schachtring und Mörtelschicht erheblich beeinflusst werden können. Inwieweit die Veränderung der Materialeigenschaften des Mörtels und der Haftzugfestigkeitswerte sowie chemisches Schwinden im Zuge der Hydratation eine besondere Rolle für die Beurteilung von Schadensrisiken beschichteter Abwasserschächte spielen, ist ggf. auf Basis weiterführender Untersuchungen zu klären.

In jedem Fall empfiehlt sich für die als kritisch erkannten Beanspruchungsbilder und typischen räumlichen Belastungen (Verkehrslasten) der Übergang von 2D- zu 3D-Analysen, um die tatsächliche Geometrie, insbesondere die Verjüngung von Abwasserschächten im oberen Bereich, besser abbilden zu können. Lokale Beanspruchungen in der Umgebung der Lasteinleitung und das Ausmaß möglicher Schädigungen des Schichtmörtels und der Grenzschicht können so zuverlässiger ermittelt werden.

6.2 Reinigung unter Beimischung von festem Strahlgut

Die Stadtwerke Essen sanieren bereits seit mehreren Jahren einen Großteil ihrer schadhafte Mauerwerksschächte im Beschichtungsverfahren mit eigenem Personal. Als Beschichtungsmaterial wird die zementgebundene Dichtschlämme Ombran ASP eingesetzt. Eine Reinigung der Schachtwandung wurde zunächst mit Wasserhochdruck unter Verwendung einer Handlanze vorgenommen. Nachdem Probleme mit dem Haftverbund der Beschichtung bei einigen Schächten festgestellt worden waren, wurde zusätzlich festes Strahlgut dem Wasser hinzugegeben, um die Oberfläche stärker anrauen und die Mauerwerksfugen tiefer ausräumen zu können. Seit einigen Monaten wird nach der o.a. Reinigung zusätzlich eine erneute Wasserhochdruckreinigung unter Einsatz einer rotierenden Reinigungsdüse durchgeführt.

In vier beschichteten Mauerwerksschächten im Essener Stadtgebiet, bei denen im Vorfeld verschiedene Methoden zur Reinigung des Untergrundes eingesetzt worden waren, wurden im Rahmen des Projektes Haftzugprüfungen in Anlehnung an ZTV-SIB 90 [63] bzw. DAfStb-Instandsetzungs-Richtlinie [50] durchgeführt, um weitere Anhaltspunkte über den Einfluss der Untergrundvorbehandlung zu gewinnen. Eine Übersicht über die untersuchten Schächte sowie sämtliche Ergebnisse der Haftzugprüfungen zeigt Tabelle 61. Zur Reinigung der Schachtwandung waren die folgenden Verfahren eingesetzt worden:

- Schacht R-1: Wasserhochdruckreinigung (ca. 120 bar) mit Handlanze
- Schacht R-2: Wasserhochdruckreinigung (ca. 300 bar) mit rotierender Reinigungsdüse
- Schacht R-3: Wasserhochdruckreinigung (ca. 120 bar) mit Handlanze unter Beimischung von festem Strahlgut (vgl. Abb. 146)
- Schacht R-4: Wasserhochdruckreinigung (ca. 300 bar) mit rotierender Reinigungsdüse und anschließend Wasserdruckreinigung (ca. 120 bar) mit Handlanze unter Beimischung von festem Strahlgut (vgl. Abb. 146)

Bei der Reinigung mit Wasserhochdruck unter Beimischung von festem Strahlgut konnten die Mauerwerksziegel gut von schwarzen Belägen und Glasuren gereinigt und die Fugen des Mauerwerks effektiver als mit der alleinigen Wasserhochdruckreinigung ausgeräumt werden. Die Arbeitsbedingungen für den ausführenden Techniker waren allerdings schlecht. Wie bei der „normalen“ Wasserhochdruckreinigung mittels Handlanze war es dem ausführenden Techniker aufgrund der beengten Platzverhältnisse im Schacht kaum möglich, das Strahlgut annähernd senkrecht auf die Schachtwandung zu bringen (vgl. Abschnitt 4.3.3.1 und Abb. 146). Zusätzlich musste sich der Techniker mit entsprechend fester Kleidung und einem Gesichtsschutz vor dem rückprallenden Strahlgut schützen.







A **B**
 Abb. 146: *Reinigung einer Schachtwandung mit Wasserhochdruck unter Beimischung von festem Strahlgut. A: Wasserhochdrucklanze mit Strahlgutzuführung. B: Ausführung der Reinigung in einem Schacht.*

Ähnlich wie bei den Prüfungen der Abreißfestigkeit (vgl. Abschnitt 4.3.1.2) und den Prüfungen der Haftzugfestigkeit der Mörtel- und Polyurethanbeschichtungen (vgl. Abschnitt 4.3.4.1 und Abschnitt 4.3.4.2) sind auch hier im Einzelfall die Versagensart bzw. die Bruchbilder bei der Bewertung zu berücksichtigen. Bei drei Prüfungen (Schacht R-1-oben und Schacht R-3-oben/unten) versagte der Prüfkörper zu mehr als 25 % in der Klebefuge, allerdings lagen bei allen drei Prüfungen die gemessenen Haftzugwerte über den Anforderungen der maßgeblichen Richtlinien.

Auffallend ist, dass bei den Prüfungen an den Beschichtungen in den Schächten R-1 und R-2, die beide ausschließlich mit Wasserhochdruck vorgereinigt worden waren, bei vier von insgesamt fünf Prüfungen ein **Versagen des Untergrundes bzw. der Trennfuge** zwischen Beschichtung und Untergrund vorlag. Bei den Prüfungen an den Schächten R-3 und R-4, bei denen **festes Strahlgut** bei der Reinigung beigemischt worden war, kam es demgegenüber in keinem Fall zu einem kompletten Versagen des Untergrundes bzw. der Trennfuge, hier lag die **Bruchstelle** immer zu einem Großteil **im Beschichtungswerkstoff** selbst. Dies lässt vermuten, dass eine Schachtwandung aus Mauerwerk mit einer (zusätzlichen) Reinigung unter Beimischung von festem Strahlgut besser als mit einer reinen Wasserhochdruckreinigung für die Beschichtung mit zementgebundenen Beschichtungswerkstoffen vorbereitet werden kann. Allerdings zeigte sich deutlich, dass eine Wasserhochdruckreinigung unter Beimischung von festem Strahlgut mit vorhandenen Gerät aufgrund der beengten Platzverhältnisse in einem Abwasserschacht schwierig ist. Hier bietet sich eine **Geräteentwicklung** an. Ein Ansatzpunkt könnte die Modifizierung der rotierenden Reinigungsdüse sein, um das Strahlgut maschinell auf die Schachtwandung aufbringen zu können.

Tabelle 61: Haftzugfestigkeiten an 4 mit ombran ASP beschichteten Mauerwerksschächten bei Einsatz verschiedener Reinigungsmethoden

Nr.	Lage	Zustand	Werkstoff	Oberflächen-vorbereitung	Schachttansicht nach Sanierung	Haftzugfestigkeit [N/mm ²]											
						oberer Schachtbereich				mittlerer Schachtbereich				unterer Schachtbereich			
						BS ¹	BT ¹	BU ¹	BK ¹	BS ¹	BT ¹	BU ¹	BK ¹	BS ¹	BT ¹	BU ¹	BK ¹
R-1	in einer Seitenstraße (BK V)	Mauerwerk, undicht, leichte Fugenkorrosion	Ombran ASP*, Auftrag von Hand	Wasserhochdruck, ca. 120 bar, Handlanze		1,5				0,3				1,5			
						0	0	0	100	0	0	100	0	0	0	100	0
R-2	in einer Seitenstraße (BK V)	Mauerwerk, undicht, leichte Fugenkorrosion		Wasserhochdruck, ca. 300 bar, rotierende Reinigungsdüse		0,2				/				0,9			
						0	100	0	0	/	/	/	/	0	40	60	0
R-3	in einer Seitenstraße (BK V)	Mauerwerk, undicht, leichte Fugenkorrosion	Wasserhochdruck, ca. 120 bar, Handlanze + Strahlgut mit Handlanze		2,4				2,5				2,3				
					50	0	0	50	100	0	0	0	50	0	0	50	
R-4	in einer mittelstark befahrenen Straße (BK IV)	Mauerwerk, undicht, leichte Fugenkorrosion	Wasserhochdruck, ca. 300 bar, rotierende Reinigungsdüse + Strahlgut mit Handlanze		0,8				0,8				0,5				
					100	0	0	0	100	0	0	0	80	20	0	0	

Anmerkungen:

- 1) in den Zeilen unter den Festigkeitswerten sind jeweils die prozentualen Oberflächenanteile der verschiedenen Versagensarten dargestellt (BS: Bruch im Sanierungsmaterial / BT: Bruch in der Trennfuge zwischen Sanierungsmaterial und Untergrund / BU: Bruch im Untergrund / BK: Bruch in der Klebefuge)
- * Ombran ASP = zementgebundene Dichtungsschlämme, u.a. zur Abdichtung erdberührter Bauteile
- der dargestellte Haftzugwert kann nur als Hinweis auf die Beschichtungsqualität angesehen werden, da der Prüfkörper zu mehr als 25 % in der Klebefuge versagte
- / auf die Prüfung wurde aufgrund geringer Schachttiefe (< 2 m) verzichtet

6.3 Einfluss des Außenklimas

Temperatur und Luftfeuchtigkeit können einen großen Einfluss auf den Aushärtungsprozess und die Endfestigkeiten sowie den Haftverbund von zementgebundenen Beschichtungssystemen haben (vgl. Abschnitt 6.1). Für das Klima in einem in Betrieb befindlichen Abwasserschacht wird bislang von konstanten Bedingungen, ähnlich denen in einem Abwasserkanal, ausgegangen (vgl. z.B. GSTT-Informationen Nr. 18 [38]: rel. Luftfeuchte ca. 80 – 100 %, Temperatur ca. +10 bis +15°C).

Um den Einfluss des Außenklimas auf das Klima in geschlossenen Abwasserschächten bei unterschiedlichen Schachttiefen und Abflussmengen im Gerinne beispielhaft abzuschätzen, wurden in 4 Schächten (Nr. 33, 37, 38 und 42) die Temperatur und die relative Luftfeuchte während des normalen Betriebes über einen Zeitraum von mehreren Tagen aufgezeichnet. Dazu wurde jeweils ein 4-Kanal-Feuchte/Temperaturlogger im mittleren Bereich der Schächte an die Wandung angebracht. Mit einem externen Sensor wurde auch die Temperatur im oberen Drittel des Schachtkörpers dokumentiert (vgl. Abb. 147). Um die aufgezeichneten Werte mit dem lokalen Außenklima vergleichen zu können, wurden Wetterdaten von Messstationen des Deutschen Wetterdienstes, die sich in räumlicher Nähe der untersuchten Schächte befanden, herangezogen. Tabelle 62 zeigt eine Übersicht über die für die Untersuchungen ausgewählten Schächte mit Angabe der gemessenen min/max–Werte der rel. Luftfeuchte und Lufttemperatur innerhalb und außerhalb der Schächte.

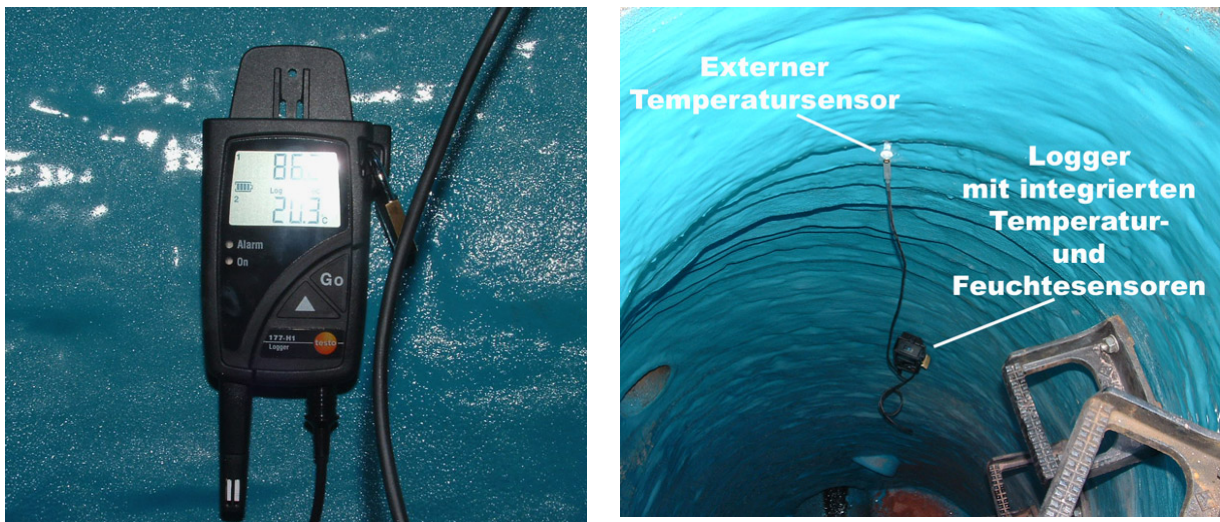



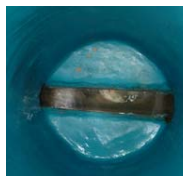


Abb. 147: Langzeit-Aufzeichnung von Temperatur, Taupunkttemperatur und relativer Luftfeuchtigkeit mittels Feuchte/Temperaturlogger „Testo 177-H1“ mit externem Temperatursensor

Tabelle 62: Übersicht über die für die Untersuchungen des Langzeit-Klimas ausgewählten Schächte mit Angabe der gemessenen min/max-Werte der rel. Luftfeuchte und Lufttemperatur innerhalb und außerhalb der Schächte

Nr.	Schacht Tiefe	Netzbedingungen	Schachtansicht	Aufzeichnungszeitraum	rel. Luftfeuchte min/max [%]		Lufttemperatur min/max [°C]	
					außerhalb des Schachtes	innerhalb des Schachtes*	außerhalb des Schachtes	innerhalb des Schachtes*
33	ca. 5,2 m	Schmutzwasser, Zu- und Ab- lauf Mauerwerk Eiprofil DN 800 / 1200		24.11. bis 30.11. 2004	min: 52 %	min: 100 %	min: -1,2 °C	min: 10,8 °C
					max: 100 %	max: 100 %	max: 9,6 °C	max: 13,2 °C
37	ca. 3,3 m	Schmutzwasser, Zu- und Ab- lauf Stzg. DN 300		03.09. bis 16.09. 2004	min: 31 %	min: 47 %	min: 6,6 °C	min: 18,3 °C
					max: 100 %	max: 100 %	max: 26,6 °C	max: 23,4 °C
38	ca. 2,6 m	Schmutzwasser, Zu- und Ab- lauf Stzg. DN 300		24.11. bis 30.11. 2004	min: 42 %	min: 83 %	min: -0,2 °C	min: 9,8 °C
					max: 100 %	max: 100 %	max: 8,3 °C	max: 13,0 °C
42	ca. 2,0m	Schmutzwasser, hinter Druckleitung gelegen, Zu- und Ab- lauf Stzg. DN 250		05.10. bis 28.10. 2004	min: 45 %	min: 55 %	min: 2,3 °C	min: 10,8 °C
					max: 100 %	max: 100 %	max: 19,3 °C	max: 17,4 °C

* die dargestellten Werte wurden jeweils in der Schachtmitte aufgezeichnet

Die **Lufttemperaturen** schwankten vor allem in den weniger tiefen Abwasserschächten mit geringeren Volumenströmen im Gerinne (Schächte Nr. 37, 38 und 42) deutlich. Hier wurden in der Mitte der Schächte Lufttemperaturen zwischen 9,8 °C (Schacht Nr. 38) und 21,4 °C (Schacht Nr. 37) bei Außentemperaturen von -0,2 bis 26,6 °C gemessen. Direkt unterhalb des Konus lagen die Werte mit 7,5 °C (Schacht Nr. 38) und 23,9 °C (Schacht Nr. 37) näher an den Außentemperaturen. Bei dem mit ca. 5,2 m recht tiefen Schacht Nr. 33, bei dem auch ein sehr hoher Volumenstrom im Gerinne vorlag, wurden nur geringe Schwankungen von ca. 2° gemessen (min: 10,8 °C / max: 13,2 °C).

Die **rel. Luftfeuchtigkeit** lag in zwei Schächten (Nr. 33 und Nr. 38) immer oberhalb von 80 %, in Schacht Nr. 33 wurde über den gesamten Messzeitraum eine rel. Luftfeuchtigkeit von 100 % gemessen. Dagegen schwankte die rel. Luftfeuchte in den Schächten Nr. 37 und 42 deutlich, hier lag der geringste gemessene Wert bei nur 47 % (Schacht Nr. 37).

Als **Fazit** der Untersuchungen kann festgehalten werden, dass das Außenklima einen deutlichen Einfluss auf das Klima im geschlossenen Schacht haben kann. Die im Rahmen der Untersuchungen in der Mitte der Schächte gemessenen Temperaturen von 9,8°C bis 21,4°C sowie die teilweise geringen gemessenen Luftfeuchtigkeiten von bis zu 47 % rel. Feuchte wichen deutlich von den nach [38] angenommenen Bedingungen in Abwasserkanälen ab. Grundsätzlich sollten daher **umfangreiche Nachbehandlungsmaßnahmen** bei Mörtelbeschichtungen in Abwasserschächten zum Schutz der Austrocknung des Mörtels vorgesehen werden.

6.4 Kombiniertes Einsatz mit PE-HD - Auskleidungssystemen

Einige Netzbetreiber setzen derzeit Mörtelbeschichtungen in Kombination mit PE-HD-Auskleidungssystemen für die Sanierung von Abwasserschächten ein, um Kosten gegenüber der Vollauskleidung mit PE-HD-Elementen einzusparen. So wird der untere Teil des Schachtes mit PE-HD-Elementen ausgekleidet und der obere Teil mit Mörtel beschichtet. Um mögliche Schwachstellen, z.B. im Übergangsbereich Mörtel-PE-HD zu erkennen, wurden 4 Schächte, die mit dieser Verfahrenskombination saniert worden waren, ca. 6 Monate nach Ausführung der Sanierung optisch inspiziert und Wasserdichtheitsprüfungen gemäß ATV-M 143, Teil 6 und DIN EN 1610 durchgeführt. Zwei Schächte bestanden die Dichtheitsprüfung nach ATV-M 143, Teil 6, allerdings zeigten sämtliche Schächte offensichtliche Mängel wie Risse, Hohlstellen oder Undichtigkeiten. Die optische Inspektion (einschließlich Abklopfen der Wandung) bestätigte – auch für die als dicht geprüften Schächte –, dass insbesondere im Bereich des Überganges zwischen PE-HD-Auskleidung und Mörtelbeschichtung Mängel zu erwarten sind (vgl. z.B. Abb. 148). Offen bleibt allerdings, ob es sich hierbei um Ausführungsmängel oder grundsätzliche Schwächen dieser Verfahrens- bzw. Materialkombination handelt. Hier könnten ggf. detaillierte Materialuntersuchungen an Probekörpern des Übergangsbereiches für die jeweiligen Sanierungssysteme und Mörtel zu weiteren Erkenntnissen führen.



A



B

*Abb. 148: Beispiele für optisch feststellbare Mängel an den mittels PE-HD-Auskleidungssystem und Mörtelbeschichtung sanierten Schächten. **A:** Risse in der Mörtelbeschichtung. **B:** Undichtigkeiten im Übergang PE-HD-Auskleidung und Mörtelbeschichtung.*

7 Zusammenfassung und Schlussfolgerungen

Für die Sanierung von schadhafte Abwasserschächten bieten sich insbesondere Beschichtungsverfahren an, die in vielen Fällen eine kostengünstige Alternative zur Erneuerung der Schächte darstellen. Bei der Schachtsanierung mittels Beschichtungsverfahren wird ein spezielles Beschichtungsmaterial auf die Schachtwandung aufgebracht und erhärtet dort zu einer in sich zusammenhängenden Schicht. Beschichtungen können zur Wiederherstellung der Wasserdichtheit, des Widerstandsvermögens gegenüber biogener Schwefelsäurekorrosion und der Wiederherstellung der statischen Tragfähigkeit des Schachtbauwerkes dienen.

Die Gesamtzahl der Schächte in öffentlichen Verkehrsflächen lässt sich für die Bundesrepublik Deutschland mit ca. 10 Mio. bzw. für Nordrhein-Westfalen mit ca. 2 Mio. abschätzen (vgl. [1], [2]). Ein konkreter Handlungsdruck ergibt sich für die Netzbetreiber aus der Selbstüberwachungsverordnung Kanal (SüwV Kan) [3]. Diese fordert die vollständige Aufnahme des baulichen und betrieblichen Zustands des Kanalnetzes sowie der mit diesem verbundenen Bauwerke der Ortsentwässerung bis zum 31.12.2005. Werden Undichtigkeiten am Schachtkörper oder ein schadhafter Allgemeinzustand des Schachtes festgestellt, sind gemäß des Runderlasses [4] des Ministeriums für Umwelt und Naturschutz, Landwirtschaft und Verbraucherschutz des Landes Nordrhein-Westfalen Abdichtungs- und Instandsetzungsmaßnahmen vorzunehmen.

Eine Umfrage zur Sanierung von Schachtbauwerken im Bereich der Abwassertechnik [5] aus dem Jahr 2001 zeigte, dass sich insgesamt 12 % aller Schächte grundsätzlich für den Einsatz von Beschichtungsverfahren eignen. Mit Blick auf ein damit mögliches Investitionsvolumen von ca. 2,7 Mrd. Euro ist also für die Zukunft noch mit erheblichen Aufwendungen in diesem Bereich zu rechnen. Grundsätzlich bestehen bei den Netzbetreibern allerdings große Unsicherheiten hinsichtlich der Einsatzgrenzen der angebotenen Beschichtungsverfahren und der Dauerhaftigkeit der Sanierungsergebnisse. So zeigten die Umfrageergebnisse in [5] ebenfalls, dass zwar bundesweit bereits 37 % der Netzbetreiber Beschichtungsverfahren für die Schachtsanierung einsetzen, allerdings bei 2/3 dieser Betreiber lediglich Probemaßnahmen mit maximal 15 Schachtsanierungen zur Ausführung kamen.

Offen bleibt derzeit, welche Qualitätseinflüsse für den Einsatz von Beschichtungsverfahren maßgebend sind und wo die Anwendungsgrenzen der einzelnen Verfahren liegen. Nur in wenigen Ausnahmefällen wird der Sanierungserfolg, z.B. durch Materialprüfungen und detaillierte optische Inspektionen, bei den zahlreichen „Versuchsbaustellen“ der Netzbetreiber überprüft. Eine stichhaltige Aussage zu den Einsatzmöglichkeiten und –grenzen von Beschichtungsverfahren ist auf der Basis des bisher vorliegenden Datenmaterials daher nicht möglich.

Vor diesem Hintergrund beauftragte das Ministerium für Umwelt und Naturschutz, Landwirtschaft und Verbraucherschutz des Landes Nordrhein-Westfalen das IKT-Institut für Unterirdische Infrastruktur mit dem in diesem Bericht dargestellten Forschungsprojekt.

Ziel des Vorhabens ist es, die wesentlichen Qualitätseinflüsse bei der Ausführung von Beschichtungsmaßnahmen zu erkennen, Einsatzmöglichkeiten und –grenzen einzelner Verfahrenskombinationen zu identifizieren und geeignete Methoden zur Qualitätssicherung abzuleiten. Besondere Berücksichtigung finden dabei die speziellen Randbedingungen bei der Beschichtung von Abwasserschächten, wie z.B. ein i.d.R. hoher Verschmutzungsgrad, ggf. eindringendes Grundwasser und schwierige Arbeitsbedingungen in tiefen bzw. engen Schächten.

Um dieses Ziel zu erreichen, wurde eine stark **praxisorientierte Vorgehensweise** gewählt. Auf Basis einer Marktrecherche und Gesprächen mit Dienstleistern, Netzbetreibern und weiteren Fachleuten wurden am Markt verbreitete bzw. innovative Produkte, Verfahren und Werkzeuge ausgewählt und deren Einsatz bei 42 Beschichtungsmaßnahmen begleitet und umfangreiche Qualitätsprüfungen durchgeführt. Sämtliche Maßnahmen wurden durch die beteiligten Netzbetreiber beauftragt. An die vor Ort tätigen Fachfirmen wurden seitens der Netzbetreiber übliche Vertragsanforderungen gestellt und lediglich Vorgaben zur Verfahrensauswahl (Material, Verfahrenstechnik) geäußert. Auf Hinweise zur Sanierungsdurchführung wurde bewusst verzichtet, um die üblichen Arbeitsprozesse, die tatsächliche Sanierungsqualität sowie mögliche Fehlerquellen und Verbesserungspotenziale wirklichkeitsgetreu erkennen zu können. In anschließenden Laborversuchen wurde das Verbundverhalten von Beschichtungen auf wassergesättigten Betonoberflächen sowie die Auswirkung von Verkehrsbelastungen auf die Beschichtungsqualität weitergehend untersucht. Ergänzende Untersuchungen zur Qualität der Verbindungsbereiche und Einsatzmöglichkeiten alternativer Vorbehandlungstechniken sowie numerische Untersuchungen zur Haftzugfestigkeit runden das Bild ab.

Zur Erfassung möglicher Ansatzpunkte für eine zuverlässigere Ausführung und Qualitätssicherung wurden **Beschichtungsmaßnahmen in situ** (vgl. Kapitel 4) begleitet. Im Vordergrund stand dabei sowohl das Erkennen möglicher Schwachstellen der einzelnen Verfahren als auch die Auswahl und Umsetzung geeigneter Prüfmethode unter In-situ-Bedingungen. Im einzelnen wurden Untersuchungen an 42 Abwasserschächten in den Netzen der Städte bzw. Gemeinden **Ahaus, Bochum, Dortmund, Düsseldorf, Göttingen, Hohenhameln, Neuenrade, Möhnesee, Selm und Velen** durchgeführt.

Die Schadensarten „Undichtigkeiten“ und „Korrosion“ stellen sowohl in Mauerwerks- als auch Betonschächten typische Schadensbilder dar (vgl. Abschnitt 3.2). Als Beschichtungsmaterialien werden insbesondere Zementmörtel und Polyurethane eingesetzt. Schachtkörper und Schachtabdeckungen unterliegen vielfältigen Belastungen, insbesondere Verkehrslasten. Weitere Einflussfaktoren sind die Oberflächenvorbereitung, Auftragsart der Beschichtung und anstehendes Grundwasser sowie die Tiefenlage des Schachtes (z.B. < 3,0 m bzw. > 3,0 m), die Geometrie des Schachtes (rund bzw. eckig), der Einsatz von Beschichtungswerkstoffen verschiedener Hersteller und der anstehende Baugrund und die Witterung. Die Vielfalt der örtlichen Randbedingungen unterstreicht, dass es sich stets um nur **schwer vergleichbare Einzelbauwerke** handelt. In der Folge stand auch nicht die statistische Auswertung der aufgenommenen Daten im Vordergrund der Betrachtung, sondern das Erkennen grundsätzlicher Einflüsse auf die in der Praxis zu erwartenden Anwendungsfälle, Lösungsmöglichkeiten und

Qualitätssicherungsmaßnahmen. Um dieses Ziel zu erreichen, wurden mit den beteiligten Netzbetreibern in einem ersten Schritt relevante Schachtbauwerke auf der Basis von Datenbankabfragen eingegrenzt, ca. 150 grundsätzlich geeignete Schächte unterschiedlichster Randbedingungen vor Ort besichtigt und schließlich 42 Schächte für die weiteren Untersuchungen so ausgewählt, dass eine möglichst große Bandbreite der o.a. Randbedingungen abgedeckt war.

Grundsätzlich kamen **am Markt verbreitete bzw. innovative Produkte, Verfahren und Werkzeuge** zum Einsatz, die im Vorfeld auf Basis einer Marktrecherche und Gesprächen mit Dienstleistern, Netzbetreibern und weiteren Fachleuten ausgewählt worden waren. Es wurden kunststoffvergütete Mörtel und Polyurethane mit verschiedenen Verfahrenstechniken, wie Anspritz- und Anschleuderverfahren, auf die Schachtwandung aufgebracht. Zur Reinigung der Schachtwandung wurden die in der Praxis zum Einsatz kommende Wasserhochdruckreinigung mit Handlanze sowie mit rotierender Reinigungsdüse, ein Spezialverfahren zur Reinigung von Schachtinnenwänden, eingesetzt. In allen Fällen wurde der Zustand der Schächte vor der Sanierungsmaßnahme aufgenommen, der Sanierungsablauf dokumentiert und die beschichteten Schächten zahlreichen Qualitätsprüfungen unterzogen. Im Ergebnis konnten weitreichende Schlussfolgerungen zur Anwendbarkeit einzelner Methoden zur Qualitätssicherung von Beschichtungsmaßnahmen, zu den Schwierigkeiten und Schwachpunkten bei der Sanierungsausführung sowie zur Auswirkung verschiedener Randbedingungen auf die Sanierungsqualität gezogen werden.

Die in Richtlinien, Informationsschriften, Sachstandsberichten bzw. Verarbeitungsrichtlinien aufgeführten **Methoden zur Qualitätssicherung** von Beschichtungsmaßnahmen orientieren sich grundsätzlich an den im Betonbau üblichen Bedingungen des Hoch- und Brückenbaus. Nur in Einzelfällen finden sich ergänzende Ausführungen für den Einsatz in Bauwerken der Ortsentwässerung, z.B. in [38] mit Blick auf zementhaltige, mineralische Mörtel. Vor diesem Hintergrund stellt sich die grundsätzliche Frage, inwieweit mögliche Methoden zur Qualitätssicherung von Beschichtungsmaßnahmen tatsächlich auch auf den vorliegenden Anwendungsfall mit vertretbarem Aufwand und ausreichender Aussagekraft übertragbar sind. Dies betraf vor allem die Bestimmung der Oberflächenfeuchte, die Bestimmung der Abreißfestigkeit des Untergrundes bzw. der Haftzugfestigkeit der Beschichtungen sowie die Entnahme von Frischmörtelproben und die Bestätigung des Sanierungserfolgs durch Wasserdichtsprüfungen. Im Rahmen des Vorhabens wurden beispielhaft einzelne Prüfverfahren untersucht und auch die Aussagekraft der Prüfergebnisse hinterfragt bzw. Optimierungspotentiale aufgezeigt:

Bei der **Bestimmung der Oberflächenfeuchte** in den 42 Schächten zeigte sich, dass durch einen angepassten Einsatz der CM-Methode der Feuchtegehalt der Schachtwandung deutlich zuverlässiger zu bestimmen ist, als bei Messung mit einem analogen Widerstandsmessgerät. Der höhere Aufwand für die Messwert-Bestimmung scheint insbesondere bei feuchtigkeitsempfindlichen Beschichtungsmaterialien gerechtfertigt.

Bei der **Prüfung der Abreiß- bzw. Haftzugfestigkeit** empfiehlt es sich, die Kernbohrungen vor Ort mittels handgeführtem Bohrgerät durch stets denselben, speziell eingewiesenen Ingenieur bei nachträglicher Sichtkontrolle des Zylinderstumpfes durchzuführen. Der Aushärteprozess des Klebers kann durch die i.d.R. hohe Feuchtigkeit der Schachtwandung negativ beeinträchtigt werden. Daher empfiehlt es sich auch grundsätzlich, den Schacht mindestens einen Tag vor Ausführung der Prüfungen zu reinigen und die Prüffläche vor Beginn der Prüfung zu trocknen. Grundsätzlich ist der Schacht vor zulaufendem Regenwasser zu schützen. Die i.d.R. notwendige Aushärtezeit von ca. 3 h sollte bei der Planung der Untersuchungen berücksichtigt werden. Zur praxisnahen **Entnahme von Frischmörtelproben** zur Bestimmung der Biegezug- und Druckfestigkeiten bietet sich der Einsatz von Einweg-Styroporschalungen an. Vergleichsprüfungen mit verschiedenen Schalungstypen bestätigten die gute Übereinstimmung der Prüfergebnisse mit denen von Laborproben. Bei der Probennahme zur Bestimmung der Wassereindringtiefe konnten mit speziellen Hilfskonstruktionen die Besonderheiten der verschiedenen Auftragsarten berücksichtigt werden.

Im Rahmen des Vorhabens wurden **Wasserdichtheitsprüfungen** an vier Schächten vor Ausführung der Sanierung und an 31 Schächten nach Ausführung der Sanierung durchgeführt. Es zeigte sich, dass eine Wasserdichtheitsprüfung im Schacht nicht immer zuverlässige Aussagen zum Erfolg einer Beschichtungsmaßnahme liefert. Es ist insbesondere zu vermuten, dass die Prüfergebnisse z.B. aufgrund von Umläufigkeiten im Bereich der Absperrblasen häufig nicht verwertbar sind. Im vorliegenden Fall wurden z.T. nach der Sanierung sogar größere Wasserverluste gemessen als vor Ausführung der Maßnahme. Oft stehen die Kosten nicht im Verhältnis zum Nutzen. Nur wenn auch der Sohlenbereich einschließlich Gerinne sowie die einbindenden Kanalhaltungen saniert wurden, kann eine Prüfung mit Luft- bzw. Wasserdruck in Einzelfällen zielführend sein. Grundsätzlich scheint dann eine Wasserdichtheitsprüfung gemäß ATV-M 143, Teil 6 [29] kombiniert mit einer optischen Inspektion des oberen Schachtbereiches sinnvoll. In allen anderen Fällen bietet eine umfassende optische Inspektion zuverlässigere Informationen zur Wasserdichtheit der Schachtwandung als eine Prüfung mit Wasserinnendruck. Der Zustand einer Beschichtung sollte durch Inaugenscheinnahme des gesamten Schachtbauwerkes einschließlich Einbindungsbereichen, Gerinne und Steigeisen erfasst und fotografisch dokumentiert werden. Idealerweise sollte diese Untersuchung bei hohen Grundwasserständen durchgeführt werden, damit Fehlstellen in der Beschichtung auch durch Wassereintritt erkannt werden können.

Vor der Sanierung wurde der **Ist-Zustand der Schächte** detailliert aufgenommen. Zunächst wurden im Rahmen einer optischen Inspektion die Randbedingungen, der Allgemeinzustand sowie die kritischen Bereiche der Schächte erfasst. Anschließend wurden die Oberflächenfeuchte und der Sulfat- und Carbonatgehalt der Schachtwandungen bestimmt und die Abreißfestigkeit der Schachtwandungen an drei Stellen ermittelt (vgl. Abschnitt 4.3.2).

Es zeigte sich, dass nahezu alle Schächte im unteren Bereich des Schachtkörpers starke **Schäden** aufwiesen, in vielen Fällen waren die Bermen, Gerinne und Anbindungen an die abge-

henden Kanäle ebenfalls sanierungsbedürftig. Wenn Zuläufe in die Schachtwandung eingebunden waren, so waren diese fast immer undicht bzw. schadhafte. Im Übergangsbereich Mauerwerk-Beton fanden sich häufig Undichtigkeiten und Querschnittsprünge, die eine Sanierung im Beschichtungsverfahren erschweren können. Insbesondere die Mauerwerksschächte wiesen eine hohe **Oberflächenfeuchte** auf. Hier wurden bei 17 der 23 untersuchten Schächte Oberflächenfeuchten von mehr als 8 Masse% gemessen und somit die Vorgaben der Polyurethanhersteller für die maximale Untergrundfeuchtigkeit überschritten. Eine hohe **Sulfatkonzentration** in der Schachtwandung wurde nur in den Schächten aus Betonfertigteilen gemessen, bei denen Korrosionserscheinungen (z.B. durch biogene Schwefelsäure) bereits deutlich sichtbar waren. Eine Messung des Sulfatgehaltes der Schachtwandung vor Ausführung der Beschichtung scheint daher i.d.R. für den vorliegenden Anwendungsfall nicht zwingend erforderlich.

Bei der Prüfung der **Abreißfestigkeit des Untergrundes** zeigte sich, dass trotz Schwierigkeiten bei der Aushärtung des Klebers und Prüfung am unvorbehandelten Untergrund an den **Mauerwerksschächten** i.d.R. Untergrundfestigkeiten $\geq 0,5 \text{ N/mm}^2$ gemessen werden konnten und somit die Anforderungen des maßgeblichen Sachstandberichtes erfüllt wurden. Nur in Einzelfällen wurden Untergrundfestigkeiten $\geq 1,5 \text{ N/mm}^2$ erzielt, so dass sich die Forderung einiger Beschichtungswerkstoffhersteller nach einer messbaren Mindestuntergrundfestigkeit $\geq 1,5 \text{ N/mm}^2$ ohne besonderen Aufwand für die Untergrundvorbereitung bzw. Verbesserung der Klebtechnik offensichtlich kaum erfüllen lässt. In den Schächten aus **Betonfertigteilen ohne Betonkorrosion** scheinen die Anforderungen der maßgeblichen Richtlinien nach einer Untergrundfestigkeit von $\geq 1,5 \text{ N/mm}^2$ mit einem kleinsten Einzelwert von $1,0 \text{ N/mm}^2$ i.d.R. selbst ohne umfangreiche Untergrundvorbehandlungsmaßnahmen erreichbar zu sein. Die in den Schächten aus **Betonfertigteilen mit Korrosion** gemessenen Untergrundfestigkeiten waren deutlich geringer als die Anforderungen der maßgeblichen Richtlinien. Hier sind grundsätzlich umfangreiche Untergrundvorbehandlungsmaßnahmen zum Erreichen der notwendigen Untergrundfestigkeiten zu empfehlen.

Die **Ausführung sämtlicher Sanierungsmaßnahmen** wurde vor Ort durch einen IKT-Mitarbeiter begleitet. An die vor Ort tätigen Fachfirmen wurden seitens der Netzbetreiber übliche Vertragsanforderungen gestellt und lediglich Vorgaben zur Verfahrensauswahl (Material, Verfahrenstechnik) geäußert. Auf Hinweise zur Sanierungsdurchführung wurde bewusst verzichtet, um die üblichen Arbeitsprozesse, die tatsächliche Sanierungsqualität sowie mögliche Fehlerquellen und Verbesserungspotenziale wirklichkeitsgetreu erkennen zu können. Die einzelnen Arbeitsschritte wurden insbesondere mit Blick auf die Umsetzung der Herstellervorgaben, Anforderungen an die Arbeitssicherheit und den Umgang mit schwierigen örtlichen Randbedingungen, wie z.B. eindringendes Grundwasser und tiefe Schachtbauwerke, aufgenommen. Im einzelnen betraf dies die Arbeitsschritte Vorbereitende Maßnahmen, Auftragen der Beschichtung und Nachbehandlung. Die Vorbereitung der Sanierungsmaßnahme umfasste grundsätzlich die Schachtreinigung mit Wasserhochdruck sowie ggf. weitere Maßnahmen zur Untergrundvorbereitung, wie Ausstemmarbeiten und die Abdichtung z.B. durch Injektion,

sowie die Vorbeschichtung der Schachtwandung bei groben Unebenheiten (vgl. Abschnitt 4.3.3).

Bei der **Reinigung mit Wasserhochdruck** zeigte sich, dass sich nach Abschluss der Reinigungsarbeiten in vielen Fällen noch Schmutzrückstände in Teilbereichen auf der Wandung befanden und eine abschließende Kontrolle der Schachtwandung vor dem Auftrag der Beschichtung durch die Fachfirmen nur in Ausnahmefällen durchgeführt wurde. In einigen Fällen wurde die Schachtwandung bereits Tage vor Ausführung der Beschichtungsarbeiten gereinigt, so dass sich ein erneuter Schmutzfilm auf der Wandung bilden konnte. Gegenüber der Wasserhochdruckreinigung mit Handlanze bietet der Einsatz einer rotierenden Reinigungsdüse Vorteile. Es können gleichmäßigere Reinigungsergebnisse erzielt werden und die Arbeitsbedingungen für den Ausführenden sind besser. Grundsätzlich scheint eine Reinigung mit Wasserhochdruck unter den Bedingungen in einem Abwasserschacht aber nicht geeignet zu sein, um eine ausreichende Rautiefe für eine Mörtelbeschichtung zu erzielen bzw. die Fugen in Mauerwerksschächten in ausreichender Tiefe auszuräumen und schwarze Beläge und Glasuren von den Mauerwerksziegeln zu entfernen.

Speziell in Mauerwerksschächten und Schächten aus Betonfertigteilen mit Korrosion sind i.d.R. **weitere Maßnahmen zur Untergrundvorbereitung** vor Auftrag der Beschichtung erforderlich. In Schächten aus Betonfertigteilen ohne Korrosion beschränken sich die vorbereitenden Arbeiten i.d.R. auf die Ringfugen. Für die in vielen Fällen notwendige Abdichtung der Schachtwandung können in Schächten aus Betonfertigteilen i.d.R. mit Injektionen (z.B. mit Polyurethanharzen) gute Ergebnisse erzielt werden. Die Abdichtung mittels Injektionen ist in Mauerwerksschächten aufwändiger. Falls kein stark drückendes Grundwasser ansteht, sind hier besonders schnellabbindende Reparaturmörtel geeignet. Vor einem maschinellen Beschichtungsauftrag (Mörtel und Polyurethan) sind flächige Vorbeschichtungen mit mineralischem Mörtel i.d.R. vor allem in Mauerwerksschächten mit Fugenkorrosion notwendig. Bei Einsatz von Polyurethanbeschichtungen müssen Mauerwerksschächte i.d.R. getrocknet werden, z.B. mit einem Heißluftgebläse. Allerdings wurde der zulässige Wert für die maximale Untergrundfeuchte trotz dieser Trocknungsmaßnahmen in einigen Fällen überschritten. In korrodierten Mauerwerksschächten wurde in Einzelfällen ebenfalls ein Heißluftgebläse eingesetzt, dann allerdings erst nach Aufbringen der Vorbeschichtung. Hier besteht das Risiko einer Beeinträchtigung der Aushärtung der mineralischen Vorbeschichtung.

Bei einer **Beschichtung** im Anschleuderverfahren (Mörtel und Polyurethan) bilden sich Spritzschatten an den Steigbügelbzw. Steigeisen. Diese Bereiche müssen somit zusätzlich von Hand sorgsam vorbereitet oder nachgearbeitet werden. Sämtliche Mörtelmischungen wurden nach Augenmaß angemischt, die zugegebenen Flüssigkeitsmengen wurden in keinem Fall exakt abgemessen, vielmehr orientierten sich das Personal der ausführenden Firmen an eigenen Erfahrungen mit der Mörtelkonsistenz. Trotzdem konnte eine gleichbleibende Konsistenz erreicht werden. In zahlreichen Fällen wurden allerdings die Herstellervorgaben bzw. allgemeinen Anforderungen an das Ausbreitmaß nicht eingehalten.

Bei fast allen Mörtelbeschichtungsmaßnahmen wurden nahezu keine bzw. nur unzureichende **Nachbehandlungsmaßnahmen** ergriffen. Bereits während des Beschichtungsauftrags wurden die einzelnen, bereits angetrockneten Schichten vor dem Auftrag einer neuen Schicht nicht angeraut und die Mörtelbeschichtung nicht feucht gehalten. Bei einigen Beschichtungsmaßnahmen war die Mörtelbeschichtung vor allem im Konusbereich einer direkten Sonnenbestrahlung ausgesetzt. Bei Polyurethanbeschichtungen scheinen umfangreiche Nachbehandlungsmaßnahmen nicht erforderlich zu sein. Allerdings sollte eine detailliertere optische Kontrolle nach Auftrag der Beschichtung durchgeführt werden, um Fehlstellen in der Beschichtung erkennen und direkt beseitigen zu können.

Darüber hinaus konnten weitere **Auffälligkeiten** sowie **Abweichungen** von den Vorgaben der Hersteller und den Anforderungen der maßgeblichen Richtlinien bzw. Sachstandsberichte beobachtet werden:

In vielen Fällen wurden **offensichtlich ungeeignete Materialien**, insbesondere zur Vorbeschichtung, eingesetzt. So wurden z.T. ohne Absprache mit dem Auftraggeber schnellabbindende Vergussmörtel und Reparaturmörtel für die Beschichtung bzw. flächige Vorbeschichtung verwendet. Betonschächte mit starker Korrosion waren zunächst mit Mörtelprodukten, die nur bedingt für den Einsatz bei sehr aggressiven Abwässern geeignet sind, großflächig vorbeschichtet worden, bevor hochwiderstandsfähige Mörtel- bzw. Polyurethanbeschichtungen aufgebracht wurden. In Einzelfällen wurde leicht angehärteter Mörtel erneut mit Wasser aufgemischt und für die Beschichtung verwendet. Eine Firma gab zu allen Mörtelmischungen Mischöl hinzu, um den Mörtel nach Aussage des Personals besser verarbeitbar für den händischen Auftrag zu machen.

Die **Grenzwerte für die klimatischen Bedingungen** während des Beschichtungsauftrags wurden in einigen Fällen nicht eingehalten. Bei mehreren Mörtelbeschichtungen lag die Temperatur im oberen Teil des Schachtkörpers außerhalb des in den maßgeblichen Richtlinien empfohlenen Bereiches. Bei den Polyurethanbeschichtungen wurde in Einzelfällen bei sehr hoher Luftfeuchtigkeit bzw. einem zu geringen Taupunktabstand beschichtet.

Bei zwei Beschichtungsmaßnahmen wurde eine **fehlerhafte Bedienung der Maschinenteknik** beobachtet, die zu schlechten Sanierungsergebnissen führte. In einem Fall verrutschte das Zugseil bei der Mörtelbeschichtung im Anschleuderverfahren während des Auf- und Abfahrens des Schleuderkopfes mehrfach auf der Zugspindel, wodurch sich eine wellenartige Oberflächenstruktur der Beschichtung ergab. Bei einer Polyurethanbeschichtung war vor Beginn der Beschichtung der Befüllungsgrad der Behälter für die Rohstoffkomponenten nicht kontrolliert worden, so dass es während des Beschichtungsvorganges zu einem vollständigen Verbrauch der Stamm-Komponente und somit höchstwahrscheinlich zu einem Abweichen von dem erforderlichen Mischungsverhältnis kam. Bei den Mörtelbeschichtungen im Nassspritzverfahren wurde erwartungsgemäß ein vergleichsweise geringer Abstand der Düse zur Schachtwandung (ca. 10 – 20 cm) gewählt. Vor dem Auftrag der nächsten Schicht wurde jede

Schichtlage von der ausführenden Fachfirma entgegen den Empfehlungen der maßgeblichen Richtlinien von Hand geglättet.

Nach Abschluss der Sanierungsmaßnahmen wurden sämtliche Schachtbeschichtungen vor Ort untersucht (vgl. Abschnitt 4.3.4). Sowohl nach ca. 28 Tagen als auch nach ca. 6 Monaten (3 Monaten) wurden die Schächte optisch inspiziert, kritische Bereiche bewertet und Fehlstellen in der Beschichtung, wie z.B. Risse, Hohlstellen oder Blasen, aufgenommen. Nach ca. 28 Tagen wurden an 31 Schächten Wasserdichtheitsprüfungen und an sämtlichen Schächten Haftzugprüfungen ausgeführt. Die Haftzugprüfungen wurden ergänzt durch eine Bestimmung der Beschichtungsdicke an jeweils fünf Stellen je untersuchtem Schacht. Die während des Beschichtungsvorgangs entnommenen Materialproben wurden im Labor geprüft und wesentliche Materialkennwerte ermittelt.

Bei der optischen Inspektion der **Mörtelbeschichtungen** zeigten sich 10 der 26 beschichteten Schächte in einwandfreiem **Zustand**. 16 Schächte wiesen **Mängel** wie Risse, Hohlstellen, Fehlstellen oder sichtbare Undichtigkeiten in der Beschichtung auf. Bei 7 dieser Schächte zeigten sich nur örtlich begrenzt auftretende Mängel, bei 9 Schächten wurde eine Häufung von Schäden oder gravierende Mängel festgestellt bzw. war der gesamte Beschichtungskörper mit Rissen versehen. Auffallend ist hierbei, dass bei 5 der Schächte mit gravierenden Mängeln bei der Beschichtung ein fettlösendes Reinigungsmittel eingesetzt und der Mörtel mit einem Mischöl angemischt worden war. Bei zwei weiteren Schächten mit gravierenden Mängeln war die Beschichtung nach Anwendung des Anschleuderverfahrens nicht kontrolliert bzw. nachgearbeitet, in einem weiteren Fall ein falsches Mörtelprodukt eingesetzt worden. Besonders häufig lagen Mängel wie Rissbildung, Hohlstellen und zu geringer Materialauftrag im Bereich der **Steigeisen** vor. In einigen Fällen war die Mindestaufttrittstiefe der Steigeisen nach der Beschichtung nicht mehr ausreichend. **Schwierige Geometrien** wie z.B. horizontale Versprünge stellten keine Schwachstellen in den Mörtelbeschichtungen dar. Die Zu- und Abläufe waren i.d.R. gut angebunden. Eine höhere Schadenshäufigkeit bei den durch **Straßenverkehr** hochbelasteten Schächten wurde nicht festgestellt. Die o.a. Mängel in den Mörtelbeschichtungen waren häufig erst nach einem Zeitraum von mehreren Monaten (6 bzw. 3 Monate) eindeutig bzw. erstmalig zu erkennen.

Grundsätzlich wiesen die in situ gemessenen **Haftzugwerte** große Schwankungen auf. So wurden in Einzelfällen Haftzugfestigkeiten von bis zu $2,8 \text{ N/mm}^2$ erzielt, in vielen Fällen war die Haftzugfestigkeit aber wesentlich geringer bzw. kaum gegeben. Als mögliche Ursache für dieses frühe Versagen sind insbesondere Schwächen in der Oberflächenvorbereitung, der Einsatz von nicht geeignetem Beschichtungsmaterial bzw. die Nicht-Einhaltung der Herstellervorgaben zu nennen. Hohe Haftzugfestigkeiten $\geq 2,0 \text{ N/mm}^2$ wurden nur in Ausnahmefällen (bei 3 der insgesamt 77 Prüfungen) und bei einem **Auftrag im Anschleuderverfahren** gemessen. In einigen Fällen wurden die Haftzugfestigkeiten der angeschleuderten Beschichtungen durch die zuvor von Hand aufgetragenen Vorbeschichtungen (z.B. in korrodierten Beton-schächten bzw. Mauerwerksschächten mit starker Fugenkorrosion) limitiert. Auf **Mauerwerk**

lag die in situ gemessene Haftzugfestigkeit der Mörtelbeschichtungen im Mittel bei ca. $0,6 \text{ N/mm}^2$. Damit wurden die Herstellerangaben zwar deutlich verfehlt, die Anforderungen des maßgeblichen Sachstandberichtes scheinen aber durchaus erfüllbar zu sein. Bei drei der 14 untersuchten Mörtelbeschichtungen in Mauerwerksschächten lagen alle gemessenen Werte über diesen Anforderungen. In den **Schächten aus Betonfertigteilen** wurden Haftzugfestigkeiten von im Mittel $0,5 \text{ N/mm}^2$ gemessen. Damit wurden sowohl die Herstellerangaben als auch die Anforderungen der maßgeblichen Richtlinien deutlich verfehlt. Keine der 12 untersuchten Mörtelbeschichtungen in Schächten aus Betonfertigteilen erfüllte diese Anforderungen.

Bei der Bestimmung der **Materialkennwerte** der bei den Sanierungsmaßnahmen entnommenen Proben zeigte sich, dass fast alle Mörtelmischungen die von den Herstellern angegebenen Biegezug- und Druckfestigkeiten unterschritten. Teilweise betrug die gemessenen Werte nur ein Drittel der angegebenen Werte. Ursache hierfür sind vermutlich Schwachstellen in der Bauausführung. Bei weiteren Prüfungen zur Bestimmung der **Schichtdicke und Wassereindringtiefe** konnte festgestellt werden, dass das Anschleuderverfahren offensichtlich Vorteile bietet, wenn eine gleichmäßige Schichtdicke mit geringem Materialverbrauch angestrebt wird. Um das Risiko einer stellenweise vollständigen Wasserdurchdringung zu verringern, sollte eine deutlich größere Mindestschichtdicke als 10 mm, z.B. 20 mm, eingehalten werden.

Bei der optischen Inspektion der **Polyurethanbeschichtungen** zeigten sich 7 der 16 mit Polyurethan beschichteten Schächte in einwandfreiem **Zustand**. 9 Schächte wiesen **Mängel** wie Hohlstellen, Fehlstellen oder Undichtigkeiten in der Beschichtung auf. 5 dieser Schächte wiesen nur örtlich begrenzt auftretende Mängel auf, die fast alle durch eine gründliche Kontrolle nach Abschluss der Beschichtungsarbeiten hätten erkannt und beseitigt werden können. Bei 3 Schächten wurde eine Häufung von Schäden oder gravierende Mängel festgestellt bzw. war die gesamte Beschichtung schadhaft. Bei zwei Beschichtungen scheint die Ursache eine zu geringe Haftzugfestigkeit von Polyurethan auf feuchtem Mauerwerk zu sein. In einem weiteren Fall kam es aufgrund eines Ausführungsfehlers vermutlich zu einem falschen Mischungsverhältnis, die Beschichtung war großflächig nicht ausgehärtet. **Schwierige Geometrien** wie z.B. horizontale Versprünge stellten keine Schwachstellen in den Polyurethanbeschichtungen dar. Die **Zu- und Abläufe** waren i.d.R. gut angebunden. In zwei Fällen wurden die Zu- und Abläufe im Sohlenbereich unter Einsatz von polyurethanharz-getränkten Kurzlinern erfolgreich angebunden und abgedichtet. Auch nach **betrieblicher Belastung** durch Wasserhochdruckspülungen zeigten diese Kurzliner keine erkennbaren Qualitätsverschlechterungen. Eine höhere Schadenshäufigkeit bei den durch **Straßenverkehr** hochbelasteten Schächten wurde nicht festgestellt.

Grundsätzlich wiesen die gemessenen **Haftzugwerte** große Schwankungen auf, es wurden Werte von $0,1$ bis $5,1 \text{ N/mm}^2$ gemessen. Die ermittelten Haftzugfestigkeiten der Polyurethanbeschichtungen auf **Mauerwerk** lagen im Mittel bei $0,4 \text{ N/mm}^2$. Für diesen Anwendungsfall liegen keine Anforderungen vor. Allerdings hätte nur eine Polyurethanbeschichtung auf Mauerwerk die Anforderungen, die an Mörtelbeschichtungen gestellt werden, erfüllt. Als Ursache

für dieses frühe Versagen sind insbesondere zu hohe Restfeuchten des Untergrundes und Schwächen in der Oberflächenvorbehandlung zu nennen. In korrodierten Mauerwerksschächten limitierte die Vorbeschichtung aus mineralischem Mörtel in vielen Fällen die Haftzugfestigkeit der Polyurethanbeschichtungen. In den **Schächten aus Betonfertigteilen** wurden Haftzugfestigkeiten von im Mittel $2,0 \text{ N/mm}^2$ gemessen. Damit scheinen sowohl die Herstellerangaben als auch die Anforderungen der maßgeblichen Richtlinien erfüllbar zu sein. Vier der 7 Polyurethanbeschichtungen in den Schächten aus Betonfertigteilen erfüllten diese Anforderungen.

Ergänzend zu den In-situ-Maßnahmen wurden in **Laborversuchen** (vgl. Kapitel 5) die Auswirkung von dynamischen Belastungen auf die Qualität einer Schachtbeschichtung sowie das Verbundverhalten von Beschichtungen auf wassergelagerten Schachtelementen aus Beton untersucht.

Im Rahmen der **Untersuchungen zur Auswirkung von dynamischen Belastungen** (vgl. Abschnitt 5.1) wurden 6 Schächte aus Betonfertigteilen mit definierten Schadensbildern in einem Versuchsstand des IKT von Fachfirmen beschichtet (3 x Mörtel, 3 x Polyurethan), unter einen Außenwasserdruck gesetzt und anschließend dynamisch belastet. Ziel war es, eine erste Einschätzung der Dauerhaftigkeit von Mörtel- und Polyurethanbeschichtungen bei einer Belastung des Schachtes durch Schwerlastverkehr zu gewinnen. Bei vier Schächten (2 x Mörtel-, 2 x Polyurethanbeschichtung) wurde 24 h nach Beschichtungsauftrag über 6 Tage eine Last in Höhe von 50 kN zyklisch aufgebracht (ca. 850 Lastwechsel). Die Last wurde jeweils 5 min konstant gehalten und der Schacht anschließend während weiterer 5 min komplett entlastet. Erst nach Abschluss dieser 7-tägigen Aushärtephase wurde die Belastung deutlich gesteigert. In dieser zweiten Phase wurden eine Million Lastwechsel von 100 kN in einer Frequenz von 3 Hz aufgebracht. Dies entspricht einer Belastung von ca. 4 bis zu ca. 60 Jahren (in Straßen der Bauklassen III – V, vgl. [96]) durch die Radlasten von Bemessungschwerlastwagen gemäß DIN 1072 [97] bei einer Überfahrtgeschwindigkeit von ca. 50 km/h. Bei zwei weiteren Schächten (1x Mörtel-, 1 x Polyurethanbeschichtung) sollten die Auswirkungen von extremen Belastungszenarien untersucht werden. Daher wurden die Schächte direkt 24 h nach Beschichtungsauftrag 500.000 Mal mit 100 kN in einer Frequenz von 3 Hz belastet und die eingeleitete Last anschließend auf 200 kN und 300 kN (bei jeweils 500.000 Lastwechseln) gesteigert.

Bei diesen beiden Schächten wurde auch das Verformungsverhalten der Beschichtung während der einzelnen Belastungen auf der Fuge zwischen Konus und Schachtring in vertikaler, diagonaler und horizontaler Richtung mittels Dehnungsmessstreifen aufgezeichnet. Nach den einzelnen Belastungsphasen sowie nach Abschluss der Gesamtbelastung wurden die Beschichtungen auf optische Mängel untersucht. Jeweils zwei Tage nach Beendigung der Lastaufbringung wurden 9 Haftzugprüfungen an jedem beschichteten Schacht durchgeführt.

Durch die dynamische Belastung mit 100 kN und einer Million Lastwechseln eines **mit Mörtel beschichteten Schachtes**, bei dem undichte Ringfugen, ansonsten aber eine unbeschädigte Wandung vor Beschichtungsauftrag vorlag, ergaben sich keine optisch erkennbaren Mängel in

der Beschichtung. Die zwei weiteren Schächte, in die vor der Beschichtung weitere Schadensbilder, wie punktuelle Undichtigkeiten und flächige Ausbrüche in der Wandung, eingebracht worden waren, zeigten nach der gleichen Belastungsintensität Undichtigkeiten und Risse in der Beschichtung. Eine Steigerung der Last auf 200 kN und 300 kN führte nicht zu weiteren optisch erkennbaren Schäden. Die gemessenen **Haftzugwerte** der Mörtelbeschichtungen nach den dynamischen Belastungen wiesen starke Schwankungen auf, es wurden Werte von $0,2 \text{ N/mm}^2$ bis $2,3 \text{ N/mm}^2$ gemessen. Deutlich niedrigere Haftzugfestigkeiten von im Mittel $0,5 \text{ N/mm}^2$ wurden an der Mörtelbeschichtung des Schachtes ermittelt, der einer intensiveren Belastung von bis zu 300 kN ausgesetzt worden war. Keine der Mörtelbeschichtungen erfüllte die Anforderungen der maßgeblichen Richtlinien. Die dynamische Belastung des Schachtes bewirkte nur geringe **Dehnungen in der Mörtelbeschichtung**. Die daraus resultierenden **Spannungen** in der Mörtelbeschichtung erreichten selbst bei 300 kN Auflast weniger als ein Prozent der im Rahmen der In-situ-Untersuchungen ermittelten Mörtelfestigkeiten.

Intensive dynamische Belastungen von bis zu einer Million Lastwechseln und bis zu 200 kN zeigten - für die hier untersuchten Schadensbilder und Betonfertigteilschächte - keine negativen Auswirkungen auf die Qualität der **Polyurethanbeschichtung**. An keinem der untersuchten Schächte entstanden während der dynamischen Belastung Risse oder Undichtigkeiten in der Beschichtung. Direkt nach der Beschichtung eines Schachtes bildete sich eine Blase in der Beschichtung. Zu vermuten ist, dass das Polyurethan mit dem vorher auf die Schachtwandung aufgetragenen fettlösenden Reinigungsmittel oder dem Reparaturmörtel reagiert hat. Die gemessenen **Haftzugwerte** waren auch nach den dynamischen Belastungen grundsätzlich hoch, die Anforderungen der maßgeblichen Richtlinien wurden bis auf einen Einzelwert erfüllt. In den Bereichen der Schachtwandung, die vor Aufbringung des Polyurethans mit Mörtelprodukten bearbeitet worden waren, lag der Bruch bei Prüfung der Haftzugfestigkeit immer im Mörtel. Die höchsten Haftzugfestigkeiten wurden an den Stellen gemessen, an denen die Polyurethanbeschichtung direkt auf die Betonwandung aufgebracht worden war. Selbst unter **extremen Belastungen** (300 kN, Bruch des Schachtdeckels, Drehung des Konus) blieb die Beschichtung dicht und riss im Übergangsbereich Konus - Schachtring nicht ein. Die Haftzugfestigkeit war allerdings mit durchschnittlich $0,7 \text{ N/mm}^2$ deutlich herabgesetzt. Die dynamische Belastung des Schachtes bewirkte größere **Dehnungen in der Polyurethanbeschichtung**. Die daraus resultierenden **Spannungen** in der Polyurethanbeschichtung erreichten aber selbst bei 300 kN Auflast weniger als ein Prozent der im Rahmen der In-situ-Untersuchungen ermittelten Polyurethan-Zugfestigkeiten.

Im Rahmen der **Untersuchungen zum Verbundverhalten von Beschichtungen** (vgl. Abschnitt 5.2) wurden Schachtelemente aus Beton mehrere Tage unter Wasser gelagert und anschließend von Fachfirmen beschichtet. Nach einer erneuten Wasserlagerung einiger der beschichteten Elemente wurden die Beschichtungen optisch inspiziert und Haftzugprüfungen durchgeführt. Ziel war es, eine erste Einschätzung des Verbundverhaltens von Mörtel- und Polyurethanbeschichtungen auf nahezu vollständig mit Wasser gesättigten Schachtelementen aus Beton, wie sie z.B. häufig im Sohlenbereich der Schächte vorzufinden sind, zu gewinnen.

Um zusätzlich den Einfluss verschiedener Oberflächenrauigkeiten auf den Haftverbund einschätzen zu können, wurden Schachtelemente mit verschiedenen Betonqualitäten eingesetzt. Die insgesamt zehn Schachtelemente wurden zwanzig Tage unter Wasser gelagert, mittels Wasserhochdruck mit Handlanze gereinigt, und anschließend von Fachfirmen mit zwei verschiedenen Mörtel- und zwei verschiedenen Polyurethanprodukten beschichtet. Um auch die Auswirkung einer erneuten Wasserbelastung der Fuge zwischen Beschichtung und Betonuntergrund kurz nach der Beschichtung berücksichtigen zu können, wurden sechs der beschichteten Schachtelemente ab ca. eine Stunde nach der Beschichtung erneut unter Wasser gelagert.

Bei den **Polyurethanbeschichtungen** waren sehr *große Unterschiede* zwischen den Produkten bereits beim Auftragen des Beschichtungsmaterials zu erkennen. Während ein Produkt mit Blasenbildung auf einen hohen Feuchtegehalt des Betonuntergrundes reagierte, kam es bei dem anderen Produkt zu keinen optisch erkennbaren Reaktionen. Auch bei den 28 Tage nach Beschichtungsauftrag gemessenen *Haftzugfestigkeiten* wurden große Unterschiede zwischen den untersuchten Produkten festgestellt. So konnte mit einem Produkt auf glattwandigen Betonoberflächen mit einer Untergrundfeuchtigkeit von ca. 6 Masse% ein sehr guter Verbund mit Werten von durchschnittlich ca. $3,2 \text{ N/mm}^2$ festgestellt werden. Die Anforderungen der maßgeblichen Richtlinien wurden damit erfüllt, die Angaben des Herstellers sogar deutlich übertroffen. Mit dem anderen Produkt wurden unter den gleichen Bedingungen Haftzugfestigkeiten von durchschnittlich ca. $1,2 \text{ N/mm}^2$ erzielt und die Anforderungen der maßgeblichen Richtlinien somit nicht erfüllt. Auf sehr feuchten Oberflächen (Feuchtegehalt ca. 10 Masse%) erfüllten beide Polyurethanprodukte die Anforderungen der maßgeblichen Richtlinien nicht, die gemessenen Haftzugwerte waren deutlich geringer bzw. es war bei einem Produkt in vielen Fällen kein Verbund zum Untergrund vorhanden. Eine Wasserbelastung der Beschichtung bzw. der Fuge zwischen Beschichtung und Beton ca. 1 h nach Aufbringen der Beschichtung schien keine negativen Auswirkungen auf den Verbund zum Untergrund zu haben.

In den **Mörtelbeschichtungen**, die nach der Beschichtung außerhalb des Wassers gelagert worden waren, zeigten sich bei der optischen Inspektion 28 Tage nach Beschichtungsauftrag trotz Abdecken der Schachtelemente mit einer Plane und Befeuchten der Beschichtung (alle 48 h) feine Risse sowie eine teilweise Ablösung der Mörtelbeschichtung von dem Betonuntergrund. Diese Mängel waren bei den unter Wasser gelagerten Beschichtungen nicht vorhanden. Somit zeigte sich erneut der große Einfluss einer umfassenden *Nachbehandlung* auf die Qualität von Mörtelbeschichtungen. Auch ist nicht auszuschließen, dass sich die von der Schachtfirma bei einem Produkt gewählte *Zugabe von Mischöl* negativ auf die Verbundwirkung der Mörtelbeschichtungen auswirkte. Die ermittelten *Haftzugwerte* lagen allerdings auch bei dem ohne Mischöl verarbeiteten Mörtel i.d.R. deutlich unterhalb den Anforderungen, die an Mörtelbeschichtungen auf Betonuntergründen gestellt werden. Auch die angegebenen Werte der Hersteller wurden deutlich unterschritten. Vor allem auf den sehr glatten Wandungen des Schachttyp 1 konnten nur geringe Haftzugfestigkeiten von maximal $0,3 \text{ N/mm}^2$ erreicht werden. In einem Schachtelement lösten sich sämtliche Probekörper direkt bei Anboh-

ren der Beschichtung zur Vorbereitung der Haftzugprüfung. Eine Wassersättigung der Beschichtung bzw. der Fuge zwischen Beschichtung und Beton ab ca. 1 h nach Ausführung der Beschichtung hatte keine negative Auswirkung auf den Verbund zwischen Mörtel und Beton. Im Gegenteil: die Haftzugwerte waren bei den Schachtelementen, die nach der Beschichtung unter Wasser gelagert wurden, in der Regel höher als bei den beschichteten Elementen, die außerhalb des Wassers gelagert wurden.

Vor dem Hintergrund der Ergebnisse der In-situ-Untersuchungen und der Laborversuche ergaben sich, auch im Gespräch mit den projektbeteiligten Netzbetreibern, zusätzliche Fragestellungen bzgl. der Mindesthaftzugfestigkeiten von Mörtelbeschichtungen, des Einflusses der Reinigungsmethode und des Einflusses des Außenklimas auf den Aushärteprozess von Mörtelbeschichtungen in Abwasserschächten. Darüber hinaus zeigte sich, dass einige Netzbetreiber Mörtelbeschichtungen in Kombination mit Auskleidungssystemen einsetzen, um Kosten gegenüber einer Vollauskleidung der Schächte einzusparen. Um auch diese Fragestellungen berücksichtigen zu können, wurden **ergänzende Untersuchungen** (vgl. Kapitel 6) durchgeführt.

Im Rahmen der **numerischen Untersuchungen zur Haftzugspannung** (vgl. Abschnitt 6.1) wurden verschiedene Lastfälle simuliert, die auf eine Mörtelbeschichtung in einem Abwasserschacht aus Betonfertigteilen wirken können. Ziel war es, die in der Fuge zwischen Mörtelbeschichtung und Schachtwandung aus Beton resultierenden Haftzugspannungen abzuschätzen. Dies vor allem vor dem Hintergrund, dass sich die derzeit geforderten Mindesthaftzugfestigkeiten an den Anforderungen des Hoch- und Brückenbaus orientieren. Hierzu wurden zweidimensionale numerische Berechnungen auf der Grundlage der Finite Elemente Methode durchgeführt. Berücksichtigung fanden die Lastfälle Erddruck, Grundwasserdruck, Verkehrslasten sowie Austrocknung des Mörtels. Der dreidimensionale Charakter von Beanspruchungen, wie sie z.B. durch konzentriert angreifende Verkehrslasten oder durch Grundwasserbelastungen hervorgerufen werden können, blieb unberücksichtigt. Weiterhin wurden die Veränderungen der mechanischen Eigenschaften des Mörtels im Zuge der Hydratation nicht berücksichtigt.

Im Ergebnis erwiesen sich für den gewählten Anwendungsfall die Beanspruchungen infolge der ***Austrocknung des Beschichtungsmörtels*** als maßgeblich für die Beanspruchung der Haftfuge zwischen Mörtelschicht und Schachtbeton. Die Belastungen durch Erd- und Grundwasserdruck sowie durch seitlichen Erddruck in Folge von Straßenverkehrslasten sind im vorliegenden Fall nur von untergeordneter Bedeutung. Insbesondere der ***Feuchtegehalt des Untergrundes*** hat großen Einfluss auf die Höhe der auftretenden Spannungen. Wird die Beschichtung auf einen vollständig durchfeuchteten Altbeton aufgebracht, so treten (in den untersuchten Fällen) in der Verbundfuge maximale Haftzugspannungen in der Größenordnung von $\approx 0,18 - 0,25 \text{ N/mm}^2$ auf, wobei die maximalen Spannungen mit steigender Dicke der Mörtelschicht zunehmen. Wird die Beschichtung auf einen vollständig trockenen Altbeton aufgebracht, so treten (in den untersuchten Fällen) in der Verbundfuge maximale Haftzug-

spannungen in der Größenordnung von $\approx 0,36 - 0,41 \text{ N/mm}^2$ auf, wobei der kleinste Wert bei $d = 30 \text{ mm}$ und der größte Wert bei $d = 40 \text{ mm}$ auftritt. Diese Zugspannungen stellen sich in beiden Austrocknungsszenarien bereits in den ersten Tagen bzw. Wochen ein, d.h. noch vor Erreichen der üblicherweise diskutierten 28-Tage-Festigkeit des Mörtels.

Im Zuge der Austrocknung treten in frühem Stadium der Austrocknung auch **innerhalb der Mörtelschicht große Zugspannungen** in Radialrichtung und in Umfangsrichtung auf, die für die Dauerhaftigkeit von beschichteten Abwasserschächten maßgeblich sein können. Diese Zugspannungen können - auch verstärkt durch Zwangsbeanspruchungen infolge hydratationsbedingtem chemischen Schwinden des Mörtels - zu Mikrorissen in radialer Richtung und damit zu Spannungsumlagerungen führen. Weiterhin wird der Feuchtetransport durch solche Mikrorisse sehr stark beeinflusst, so dass der gesamte Austrocknungsprozess und in weiterer Folge die entstehenden Beanspruchungen der Grenzschicht zwischen Schachtring und Mörtelschicht erheblich beeinflusst werden können. Inwieweit die Veränderung der Materialeigenschaften des Mörtels und der Haftzugfestigkeitswerte sowie chemisches Schwinden im Zuge der Hydratation eine besondere Rolle für die Beurteilung von Schadensrisiken beschichteter Abwasserschächte spielen, ist ggf. auf Basis weiterführender Untersuchungen zu klären. In jedem Fall empfiehlt sich für die als kritisch erkannten Beanspruchungsbilder und typischen räumlichen Belastungen (Verkehrslasten) der Übergang von 2D- zu **3D-Analysen**, um die tatsächliche Geometrie, insbesondere die Verjüngung von Abwasserschächten im oberen Bereich, besser abbilden zu können. Lokale Beanspruchungen in der Umgebung der Lasteinleitung und das Ausmaß möglicher Schädigungen des Schichtmörtels und der Grenzschicht können so zuverlässiger ermittelt werden.

Bei den **Untersuchungen zur Reinigung unter Beimischung von festem Strahlgut** (vgl. Abschnitt 6.2) wurden Haftzugprüfungen an vier mit einer zementgebundenen Dichtungsschlämme beschichteten Mauerwerksschächten durchgeführt, die im Vorfeld mit verschiedenen Verfahren gereinigt worden waren. Ziel war es, vor dem Hintergrund der im Rahmen der In-situ-Untersuchungen und Laborversuche gemessenen geringen Haftzugfestigkeiten von Mörtelbeschichtungen, weitere Anhaltspunkte zu dem Einfluss der Untergrundvorbehandlung und speziell einer Reinigung mit Wasserhochdruck unter Beimischung von festem Strahlgut zu erhalten. Es zeigte sich, dass die Mauerwerksziegel durch eine Beimischung von festem Strahlgut bei der Wasserhochdruckreinigung gut von schwarzen Belägen und Glasuren gereinigt und die Fugen des Mauerwerks effektiver als mit der alleinigen Wasserhochdruckreinigung ausgeräumt werden konnten. Die Ergebnisse der **Haftzugprüfungen** lassen ebenfalls vermuten, dass eine Schachtwandung aus Mauerwerk mit einer (zusätzlichen) Reinigung unter Beimischung von festem Strahlgut besser als mit einer reinen Wasserhochdruckreinigung für die Beschichtung mit zementgebundenen Werkstoffen vorbereitet werden kann. Allerdings zeigte sich deutlich, dass eine Wasserhochdruckreinigung unter Beimischung von festem Strahlgut mit vorhandenem Gerät aufgrund der beengten Platzverhältnisse in einem Abwasserschacht schwierig ist. Hier bietet sich eine **Geräteentwicklung** an. Ein Ansatzpunkt

könnte die Modifizierung der rotierenden Reinigungsdüse sein, um das Strahlgut maschinell auf die Schachtwandung aufbringen zu können.

Im Rahmen der Untersuchungen zum **Einfluss des Außenklimas** (vgl. Abschnitt 6.3) wurde die Temperatur und Luftfeuchte in vier Schächten während des normalen Betriebs über einen Zeitraum von mehreren Tagen aufgezeichnet und den außerhalb des Schachtes ermittelten Werten gegenübergestellt. Ziel der Untersuchungen war es, den Einfluss des Außenklimas auf das Klima und letztendlich auf den Aushärtvorgang einer Mörtelbeschichtung in einem geschlossenen Abwasserschacht abschätzen zu können. Dies vor dem Hintergrund, dass während der Sanierungsarbeiten im Rahmen der In-situ-Untersuchungen nur geringe Abweichungen zwischen den Temperaturen und Luftfeuchten innerhalb und außerhalb des Schachtkörpers gemessen und in fast allen Fällen nahezu keine bzw. nur unzureichende Nachbehandlungsmaßnahmen ergriffen worden waren, um die Mörtelbeschichtungen vor einem zu schnellen Austrocknen zu schützen. Für die Messungen wurden Datenlogger im mittleren Bereich der Schächte an die Wandung angebracht. Mit einem externen Sensor wurde zusätzlich die Temperatur im oberen Drittel des Schachtkörpers dokumentiert. Um die aufgezeichneten Werte mit dem lokalen Außenklima vergleichen zu können, wurden Wetterdaten von Messstationen des deutschen Wetterdienstes, die sich in räumlicher Nähe der untersuchten Schächte befanden, herangezogen. Als Fazit der Untersuchungen kann festgehalten werden, dass das Außenklima einen deutlichen Einfluss auf das Klima im geschlossenen Schacht haben kann. Die im Rahmen der Untersuchungen in der Mitte der Schächte gemessenen Temperaturen von 9,8°C bis 21,4°C sowie die teilweise geringen gemessenen Luftfeuchtigkeiten von ca. 47 % rel. Feuchte wichen deutlich von den nach [38] angenommenen Bedingungen in Abwasserkanälen ab. Grundsätzlich sollten daher **umfangreiche Nachbehandlungsmaßnahmen** bei Mörtelbeschichtungen in Abwasserschächten zum Schutz der Austrocknung des Mörtels vorgesehen werden.

In vier Schächten, bei denen Mörtelbeschichtungen in **Kombination mit Auskleidungssystemen aus PE-HD** eingesetzt worden waren, um Kosten gegenüber einer Vollauskleidung der Schächte einzusparen, wurden ca. 6 Monate nach Ausführung der Sanierung optische Inspektionen und Wasserdichtheitsprüfungen gemäß ATV-M 143, Teil 6 und DIN EN 1610 durchgeführt (vgl. Abschnitt 6.4). Zwei Schächte bestanden die Dichtheitsprüfung nach ATV-M 143, Teil 6, allerdings zeigten sämtliche Schächte offensichtliche Mängel wie Risse, Hohlstellen oder Undichtigkeiten. Die optische Inspektion (einschließlich Abklopfen der Wandung) bestätigte – auch für die als dicht geprüften Schächte –, dass insbesondere im Bereich des Überganges zwischen PE-HD-Auskleidung und Mörtelbeschichtung Mängel zu erwarten sind. Offen bleibt allerdings, ob es sich hierbei um Ausführungsmängel oder grundsätzliche Schwächen dieser Verfahrens- bzw. Materialkombination handelt. Hier könnten ggf. detaillierte Materialuntersuchungen an Probekörpern des Übergangsbereiches für die jeweiligen Sanierungssysteme und Mörtel zu weiteren Erkenntnissen führen.

Im **Gesamtblick** bleibt festzustellen, dass die Sanierung von Abwasserschächten mit Beschichtungsverfahren stets in besonderem Maße auf die örtlichen Randbedingungen abzustimmen ist. Die große Bandbreite der praxisrelevanten Einflussfaktoren unterstreicht, dass die Qualitätssicherung bereits bei der Zustandserfassung der Schächte beginnen und sowohl die Untergrundvorbereitung, Materialauswahl als auch die Personalschulung und sorgfältige Abnahme der erbrachten Leistungen berücksichtigen muss. Die Eingrenzung der wirtschaftlich sinnvollen Anwendungsbereiche für Beschichtungsverfahren hängt dabei – wie bei allen Sanierungsverfahren – davon ab, inwieweit auch alternative Lösungsmöglichkeiten zur Reparatur oder Renovierung bzw. Erneuerung eingesetzt werden können.

8 Fazit und Ausblick

Vor dem Hintergrund der Ergebnisse des Forschungsvorhabens bleibt festzustellen, dass die untersuchten Beschichtungsverfahren **grundsätzlich geeignet** sein können, die Dichtheit und Funktionsfähigkeit sowohl von Mauerwerksschächten als auch von Schächten aus Betonfertigteilen wiederherzustellen. Allerdings unterstreicht die in der Mehrzahl der untersuchten Fälle geringe Sanierungsqualität auch, dass die bisherigen **Maßnahmen zur Qualitätssicherung** gerade mit Blick auf die gegenwärtige Ausführungspraxis **stark verbesserungswürdig** sind. Entsprechend werden im Folgenden wesentliche Hinweise zur Qualitätssicherung von Beschichtungsmaßnahmen in Abwasserschächten zusammengefasst. Diese bieten sich insbesondere als Basis an, um im Einzelfall geeignete **Prüfkriterien und Qualitätssicherungsmaßnahmen** auszuwählen und angepasste **Ausschreibungstexte und Vertragsbedingungen** zu formulieren.

In der Phase der **Sanierungsvorbereitung** sollte der zu sanierende Schacht **detailliert optisch inspiziert** werden. Die Inspektion sollte idealerweise bei hohen Grundwasserständen erfolgen, um Undichtigkeiten im Schachtkörper besser erkennen zu können. Dabei ist auch der Zustand der angrenzenden Haltungen sowie der weiteren Zuläufe in der Schachtwandung zu dokumentieren. Wenn Schäden oder Undichtigkeiten in den angrenzenden Haltungen zu erkennen sind, sollte die Schachtsanierung idealerweise in die Sanierung des Gesamtsystems integriert werden. Schadhafte Zuläufe in der Schachtwandung sind vor Ausführung der Beschichtung zu sanieren. **Steigeisen bzw. -bügel** sollten vor der Beschichtung demontiert werden. Nach dem Beschichtungsauftrag ist der Einsatz einer Steigleiter besonders zu empfehlen, da der Beschichtungskörper hier bei der Befestigung nur an wenigen Stellen durchbrochen werden muss.

Bei der **Prüfung der Abreißfestigkeit** zur Beurteilung der Untergrundfestigkeit ist zu beachten, dass der Aushärteprozess des Klebers durch die i.d.R. hohe Luftfeuchtigkeit der Schachtwandung negativ beeinträchtigt werden kann. Daher empfiehlt es sich auch grundsätzlich, den Schacht mindestens einen Tag vor Ausführung der Prüfungen zu reinigen und die Prüffläche vor Beginn der Prüfung zu trocknen. Grundsätzlich ist der Schacht vor zulaufendem Regenwasser zu schützen. Die i.d.R. notwendige Aushärtezeit von ca. 3 h sollte bei der Sanierungsplanung berücksichtigt werden.

Speziell die **derzeitige Ausführungspraxis** unter den besonderen Randbedingungen in Abwasserschächten scheint einen starken Einfluss auf das Sanierungsergebnis zu haben. Hier sind vor allem verfahrenstechnische Schwächen in der Untergrundvorbereitung, die Nichteinhaltung von Herstellervorgaben bzw. den Anforderungen der maßgeblichen Richtlinien während des gesamten Sanierungsprozesses und die fehlende Kontrolle des Sanierungserfolges zu nennen. Dies verschärft sich beim Einsatz von Mörteln insbesondere durch die händische Verarbeitung vor Ort, die langsame Aushärtung des Materials und die hohen Anforderungen an die Nachbehandlung. Eine gegenüber der derzeitigen Praxis intensivere **Bauüberwachung** ist unbedingt zu empfehlen. Durch die Beachtung einiger wesentlicher Punkte wäh-

rend der Sanierungsausführung kann die Wahrscheinlichkeit einer erfolgreichen Sanierung bereits deutlich gesteigert werden:

- Vor dem Beschichtungsauftrag sollte eine **detaillierte Inspektion der gereinigten Schachtwandung** durchgeführt werden, um Schmutzrückstände, Beläge bzw. einen zu geringen Materialabtrag erkennen zu können und ggf. weitere Maßnahmen einzuleiten.
- Der Feuchtegehalt des Untergrundes vor Auftrag der Beschichtung sowie die Austrocknung des Mörtels haben einen wesentlichen Einfluss auf die Höhe der in der Verbundfuge sowie in der **Mörtelbeschichtung** auftretenden Spannungen, die zu einem Ablösen der Beschichtung bzw. zu Rissen in der Beschichtung führen können. Daher sollte in stärkerem Maße als bisher auf einen feuchten Untergrund, das Feuchthalten des Mörtels bereits während des Auftrags und vor allem auf die Verhinderung einer frühzeitigen Austrocknung während des Aushärtungsprozesses durch entsprechende **Nachbehandlungsmaßnahmen**, wie z.B. das Auftragen eines Nachbehandlungsmittels auf die Beschichtung, geachtet werden.
- Die Untergrundfeuchte kann einen maßgeblichen Einfluss auf die Qualität von **Polyurethanbeschichtungen** haben. Umfangreiche Nachbehandlungsmaßnahmen scheinen allerdings nicht erforderlich zu sein. Hier empfiehlt es sich insbesondere, nach Auftrag der Beschichtung den gesamten **Beschichtungskörper detailliert optisch zu inspizieren**, um Fehlstellen in der Beschichtung erkennen und direkt beseitigen zu können.

Bzgl. des **Materialverhaltens** sowie der **Einsatzgrenzen der Verfahren** lassen sich die folgenden Aussagen treffen:

- Bei den **Polyurethanbeschichtungen** sind **große Unterschiede zwischen den einzelnen Produkten** erkennbar. Während ein Produkt mit Blasenbildung auf einen hohen Feuchtegehalt des Untergrundes reagierte, kam es bei einem weiteren Produkt zu keinen optisch erkennbaren Reaktionen.
- Bei den untersuchten Polyurethanen war die Verbundfestigkeit auf sehr feuchten Untergründen stark herabgesetzt. Grundsätzlich wurden wesentlich geringere Haftzugfestigkeiten auf Mauerwerk gemessen und in Ausnahmefällen Ablösungen beobachtet. Selbst durch den Einsatz von Heißluftgebläsen konnte in einigen Fällen der zulässige Wert für die maximale Untergrundfeuchte nicht erreicht werden. Daher scheint ein Einsatz von **Polyurethan zur Beschichtung feuchter Mauerwerksschächte nicht empfehlenswert**.
- Vor dem Auftrag einer Polyurethanbeschichtung bzw. einer Mörtelbeschichtung im Anschleuderverfahren in **Mauerwerksschächten mit Fugenkorrosion und in Schächten aus Betonfertigteilen mit Korrosion** ist häufig der händische Auftrag einer flächigen **Vorbeschichtung** aus mineralischem Mörtel zum Oberflächenausgleich bzw. zum Verfüllen der Fugen erforderlich. Da diese Arbeiten einen Großteil des insgesamt anfallen-

den Arbeitsaufwandes umfassen können und die Haftzugfestigkeit dieser ersten Schicht durch einen nachfolgenden maschinellen Auftrag einer Beschichtung nicht gesteigert werden kann, ist **in diesen Fällen die Notwendigkeit einer Beschichtung mit Polyurethan bzw. einer Mörtelbeschichtung im Anschleuderverfahren zu hinterfragen.**

- Darüber hinaus besteht ein Widerspruch zwischen den o.a. Erfordernissen des (Vorbeschichtungs)mörtels während des Aushärtungsprozesses und der erforderlichen Untergrundtrockenheit für die Beschichtung mit Polyurethan. Durch einen Einsatz von Heißluftgebläsen kann die Aushärtung und damit die Festigkeit der mineralischen Vorbeschichtung, die den Untergrund für die nachfolgende Polyurethanbeschichtung bildet, beeinträchtigt werden. Daher sollte der **Auftrag der Polyurethanbeschichtung** im Idealfall **erst nach der vollständigen Aushärtung der mineralischen Vorbeschichtung** erfolgen.
- Grundsätzlich scheint die derzeit übliche **Vorreinigung der Schachtwandung** mit Wasserhochdruck unter den Bedingungen in einem Abwasserschacht nur selten geeignet zu sein, eine ausreichende Rautiefe für eine Mörtelbeschichtung zu erzielen bzw. die Fugen in Mauerwerksschächten in ausreichender Tiefe auszuräumen und schwarze Beläge und Glasuren von den Mauerwerksziegeln zu entfernen. Bei einer Wasserhochdruckreinigung unter Beimischung von festem Strahlgut können zwar bessere Ergebnisse erzielt werden, die Ausführung mit vorhandenem Gerät ist allerdings schwierig, auch hinsichtlich der Arbeitsbedingungen des ausführenden Technikers. Hier bietet sich eine **Geräteentwicklung** an. Ein Ansatzpunkt könnte die Modifizierung der rotierenden Reinigungsdüse sein, um das Strahlgut maschinell auf die Schachtwandung aufbringen zu können.

Für die **Bauabnahme** ist in erster Linie eine intensive **optische Inspektion** des Schachtkörpers **nach mehreren Monaten** zu empfehlen. Der Zustand einer Beschichtung sollte dann durch Inaugenscheinnahme des gesamten Schachtbauwerkes einschließlich Einbindungsbereichen, Gerinne und Steigeisen erfasst und fotografisch dokumentiert werden. Folgende Punkte sollten dabei beachtet werden:

- **Kritische Bereiche** liegen i.d.R. insbesondere im unteren Bereich des Schachtkörpers, bei der Einbindung der Zu- und Abläufe sowie im Bereich der Steigeisen.
- Es zeigte sich, dass eine **Wasserdichtheitsprüfung** im Schacht nicht immer zuverlässige Aussagen zum Erfolg einer Beschichtungsmaßnahme liefert. Es ist insbesondere zu vermuten, dass die Prüfergebnisse z.B. aufgrund von Umläufigkeiten im Bereich der Absperrblasen häufig nicht verwertbar sind. Oft stehen die Kosten nicht im Verhältnis zum Nutzen. Nur wenn auch der Sohlenbereich einschließlich Gerinne sowie die einbindenden Kanalhaltungen saniert wurden, kann eine Prüfung mit Luft- bzw. Wasserdruck in Einzelfällen zielführend sein. Grundsätzlich scheint dann eine Wasserdichtheitsprüfung gemäß ATV-M 143, Teil 6 kombiniert mit einer umfassenden optischen Inspektion des oberen Schachtkörpers sinnvoll. Idealerweise sollte diese Untersuchung bei hohen Grundwasser-

ständen durchgeführt werden, damit Fehlstellen in der Beschichtung auch durch Wassereintritt erkannt werden.

- Grundsätzlich zeigten sich zahlreiche Mängel an Mörtelbeschichtungen erst bei der **zweiten optischen Inspektion, 6 (3) Monate nach der Beschichtungsmaßnahme**. Dies wurde auch dadurch bestätigt, dass sich die für eine Rissbildung bzw. ein Ablösen der Beschichtung maßgeblichen Spannungen bei den Mörtelbeschichtungen rechnerisch erst nach einigen Tagen bzw. Wochen einstellen. Mängel an Polyurethanbeschichtungen zeigten sich demgegenüber i.d.R. unmittelbar nach dem Auftragen der Beschichtung bzw. spätestens nach einem Anstieg des Grundwasserstandes. Einflüsse aus Alterung der Materialien wurden im Rahmen der Laufzeit des Vorhabens nicht untersucht.

Grundsätzlich sind die derzeitigen **Mindestanforderungen an die Haftzugfestigkeiten** der Beschichtungen, die sich an den Anforderungen des Hoch- und Brückenbaus orientieren, sowie die **Bedeutung von Haftzugprüfungen als Abnahmekriterium** zu hinterfragen. Obwohl in vielen Fällen die Anforderungen an die Haftzugfestigkeit nicht erfüllt wurden, konnte ein Ablösen der Beschichtung nur in Einzelfällen festgestellt werden. Auch zeigten die numerischen Untersuchungen, dass sich die unter den Bedingungen in einem Abwasserschacht ergebenden Haftzugspannungen bei Mörtelbeschichtungen unterhalb der Anforderungen der maßgeblichen Richtlinien liegen. Grundsätzlich ist aber nicht auszuschließen, dass die Beschichtung während der Haftzugprüfung in einem sanierten Abwasserschacht gerade unter diesen aus den maßgeblichen Belastungen resultierenden Spannungen steht, so dass durch die Prüfung möglicherweise nur die noch zusätzlich aufnehmbaren Reserven gemessen werden. Vor diesem Hintergrund sollte das Ergebnis einer Haftzugprüfung nur als zusätzlicher Hinweis auf die Sanierungsqualität angesehen und das **Hauptaugenmerk auf die optische Inspektion inklusive eines Abklopfens der Beschichtung**, bei dem i.d.R. auch Hohlstellen hinter der Beschichtung festgestellt werden können, gelegt werden.

Vor dem Hintergrund der im Rahmen des Forschungsvorhabens erzielten Erkenntnisse lassen sich auch zahlreiche noch offene Fragestellungen identifizieren. Als **Ausblick** auf zukünftige Forschungs- und Prüfaktivitäten sind in diesem Zusammenhang die folgenden Punkte zu nennen:

- Durch eine **Langzeit-Beobachtung der In-situ-Beschichtungen**, bei denen keine erkennbaren optischen Mängel festgestellt wurden, könnten weitere Aussagen zur Dauerhaftigkeit von Beschichtungen und speziell zur Bedeutung der Haftzugfestigkeiten getroffen werden. So bietet sich eine detaillierte optische Inspektion der betreffenden Schächte in Abständen von 6 Monaten über einen Zeitraum von mehreren Jahren an.
- Die im Rahmen des vorliegenden Vorhabens beobachteten Erkenntnisse und Tendenzen sollten in weiteren Untersuchungen unter **vergleichbaren Laborbedingungen** überprüft und abgesichert werden. So würde sich auch die Möglichkeit bieten, die Auswirkungen einzelner Maßnahmen auf den Sanierungserfolg unter bestimmten Randbedingungen ge-

zielt zu überprüfen. Unter anderem könnte der Einfluss der Bauausführung und der Nachbehandlung bei der Beschichtung mit Mörteln überprüft und Belastungen aus Grundwasser gezielt simuliert werden.

- Aufgrund der o.a. Schwächen bei der derzeit üblichen **Vorreinigung der Schachtwandung** mittels Wasserhochdruck sollten in weiteren Untersuchungen die Anwendbarkeit und die Auswirkung verschiedener Reinigungsmethoden unter vergleichbaren Randbedingungen überprüft und ggf. neue Gerätetechniken entwickelt werden.
- Da in der Regel bei Sanierungsmaßnahmen - vor allem bei einer Fremdwasserbelastung des Netzes - die Dichtheit des Gesamtsystems aus Schacht und Kanalhaltung im Vordergrund steht, sollte im Rahmen weiterer Untersuchungen überprüft werden, inwieweit es mit den einzelnen Beschichtungsmaterialien unter verschiedenen Randbedingungen möglich ist, eine **dichte und dauerhafte Anbindung der Schachtbeschichtung an angrenzende, ggf. sanierte Kanalhaltungen** herzustellen.
- Die Qualität der optischen Inspektion des Schachtkörpers durch Inaugenscheinnahme bzw. Fotoaufnahmen kann in hohem Maße von der Einsatzbereitschaft des ausführenden Personals abhängen. Besonders der Gerinne- und Sohlenbereich und hier speziell die Zu- und Abläufe sind nur unter besonderem Einsatz in der für eine Beurteilung erforderlichen Qualität zu dokumentieren. Auch vor dem Hintergrund der besonderen Bedeutung einer detaillierten optischen Inspektion des gesamten Schachtkörpers, sowohl bei der Zustandserfassung vor Ausführung der Sanierung als auch zur Beurteilung des Reinigungs- und Sanierungserfolges, bietet sich die Erprobung und ggf. eine gezielte Weiterentwicklung von **alternativen Möglichkeiten der Schachtinspektion** für den vorliegenden Anwendungsfall an.
- Um die Zustandsklassifizierung von Abwasserschächten - auch mit Blick auf das zu wählende Sanierungsverfahren - zu erleichtern, bietet sich eine **Spezifizierung von existierenden Klassifizierungs- und Bewertungsverfahren** wie z.B. ATV-M 149, ISYBAU, KAIN und Stichting Rioned (vgl. [2], [113]), die zum Teil Unklarheiten bei der Anwendung an Schachtbauwerken aufweisen, an.
- Um die **Vergleichbarkeit der Ergebnisse von Haftzugprüfungen an ebenen Probekörpern** (Laborprüfung) mit denen an gekrümmten Schachtinnenflächen überprüfen zu können, bieten sich vergleichende Labortests, ggf. ergänzt um numerische Untersuchungen, an. Auch empfiehlt sich für die als kritisch erkannten Beanspruchungsbilder und typischen räumlichen Belastungen (Verkehrslasten) der Übergang von 2D- zu 3D-Analysen, um die tatsächliche Geometrie, insbesondere die Verjüngung von Abwasserschächten im oberen Bereich, besser abbilden zu können. Lokale Beanspruchungen in der Umgebung der Lasteinleitung und das Ausmaß möglicher Schädigungen des Schichtmörtels und der Grenzschicht können so zuverlässiger ermittelt werden.

- Inwieweit die Veränderungen der Materialeigenschaften des Mörtels und der Haftzugfestigkeitswerte sowie chemisches Schwinden im Zuge der Hydratation eine Rolle für die Beurteilung von Schadensrisiken beschichteter Abwasserschächte spielen, sollte in weiterführenden werkstofftechnischen und ggf. numerischen Untersuchungen geklärt werden. In ähnlicher Weise ist zu untersuchen, welche Lastfälle für eine **Beschichtung aus Polyurethan** in einem Abwasserschacht maßgebend sein können und wie groß die daraus resultierenden **Belastungen in der Verbundfuge zwischen Beschichtung und Schachtwandung** sind.

Grundsätzlich bietet sich die **Erweiterung der Untersuchung auf andere Schachtsanierungsverfahren** an, um Anwendungsmöglichkeiten und –grenzen auch unter wirtschaftlichen Gesichtspunkten zu vergleichen.

9 Literatur

- [1] Bosseler, B., Birkner, T.: Umsetzung der Selbstüberwachungsverordnung Kanal (SüwVKan) bei den kommunalen Netzbetreibern und Wasserverbänden in NRW; Endbericht des IKT – Institut für Unterirdische Infrastruktur im Auftrag des Ministeriums für Umwelt und Naturschutz, Landwirtschaft und Verbraucherschutz des Landes NRW, Dezember 2003.
- [2] Stein, D.: Instandhaltung von Kanalisationen, 3. Auflage; Verlag Ernst & Sohn, Berlin 1998.
- [3] Verordnung zur Selbstüberwachung von Kanalisationen und Einleitung von Abwasser aus Kanalisationen im Mischsystem und im Trennsystem (Selbstüberwachungsverordnung Kanal - SüwV Kan), - Gesetz- und Verordnungsblatt für das Land Nordrhein-Westfalen, 49 (Nr. 10): S. 64- 67; Düsseldorf 1995.
- [4] Anforderungen an den Betrieb und die Unterhaltung von Kanalisationsnetzen - RdErl. D. Ministeriums für Umwelt, Raumordnung und Landwirtschaft v. 03.01.1995 - Bekanntmachung im Ministerialblatt für das Land NRW – Nr. 14 vom 10. Februar 1995.
- [5] Bosseler, B.; Homann, D.; Kaltenhäuser, G.: Bundesweite Umfrage zur Sanierung von Schachtbauwerken im Bereich der Abwassertechnik mittels Beschichtungsverfahren; Gelsenkirchen, Juli 2001.
- [6] DIN V 4034-1: Schächte aus Beton-, Stahlfaserbeton- und Stahlbetonfertigteilen für Abwasserleitungen und –kanäle – Typ 1 und Typ 2; Teil 1: Anforderungen, Prüfungen und Bewertung der Konformität; Beuth Verlag, Berlin, August 2004.
- [7] Bosseler, B.; Bennerscheid, C.; Bartel, M.: Eignungsprüfung von Verfahren zur Sanierung von Schachtabdeckungen; Gelsenkirchen, November 2002.
- [8] ATV-DVWK A 157: Bauwerke der Kanalisation; ATV-DVWK-Regelwerk, November 2000.
- [9] ATV A 241: Bauwerke in der Kanalisation; ATV-Regelwerk, Mai 1998.
- [10] DIN EN 1917: Einsteig- und Kontrollschächte aus Beton, Stahlfaserbeton und Stahlbeton; Beuth Verlag, Berlin, April 2003.
- [11] DIN 4034: Schächte aus Beton- und Stahlbetonfertigteilen, Schächte für erdverlegte Abwasserkanäle und –leitungen; Beuth Verlag, Berlin, September 1993.

-
- [12] DIN 4051: Kanalklinker: Anforderungen, Prüfung, Überwachung; Beuth Verlag, Berlin, April 2002.
- [13] DIN 105: Mauerziegel, Teil 1 bis 4 (Teile 1 und 2 als Vornorm); Beuth Verlag, Berlin, Juni 2002.
- [14] DIN 4034-10: Schächte aus Beton- und Stahlbetonfertigteilen – Teil 10: Schachtunterteile aus Mauerwerk für erdverlegte Abwasserkanäle und –leitungen, Anforderungen und Prüfungen; Beuth Verlag, Berlin, Oktober 1995.
- [15] Auswertung im Rahmen von: Bosseler, B.; Homann, D.; Kaltenhäuser, G.: Bundesweite Umfrage zur Sanierung von Schachtbauwerken im Bereich der Abwassertechnik mittels Beschichtungsverfahren; Gelsenkirchen, unveröffentlicht.
- [16] DIN 1211: Steigeisen für zweiläufige Steigeisengänge, Teil 1 bis 3; Beuth Verlag, Berlin, Mai 2003.
- [17] DIN 1212: Steigeisen mit Aufkantung für zweiläufige Steigeisengänge, Teil 1 bis 3; Beuth Verlag, Berlin, Mai 2003.
- [18] DIN V 1264: Steigeisen für Steigeisengänge in Schächten - Verwendung in Bauwerken für die Abwasserentsorgung; Beuth Verlag, Berlin, April 2004.
- [19] DIN 19555: Steigeisen für einläufige Steigeisengänge - Steigeisen zum Einbau in Beton; Beuth Verlag, Berlin, April 2003.
- [20] DIN 18799: Steigleitern an baulichen Anlagen, Teil 1 und 2; Beuth Verlag, Berlin, August 1999.
- [21] ATV-A 241: Bauwerke der Ortsentwässerung: Empfehlungen und Hinweise; ATV-Regelwerk, Ausgabe 1978.
- [22] DIN 1045: Beton und Stahlbeton: Bemessung und Ausführung; Beuth Verlag, Berlin, Juli 1988.
- [23] DIN 4062: Dichtstoffe für Bauteile aus Beton; Beuth Verlag, Berlin, September 1978.
- [24] DIN EN 681: Elastomer-Dichtungen, Werkstoffanforderungen für Rohrleitungsdichtungen, Anwendungen in der Wasserversorgung und Entwässerung, Teil 1: Vulkanisierter Gummi; Beuth Verlag, Berlin, Mai 2003 (mit Berichtigungen vom August 2003).
- [25] Firmeninformation der Forsheda GmbH; Maintal, 2001.

-
- [26] Bosseler, B.; Kötters, S.; Koutsenok, V.: Dichtheitsprüfung an Schächten aus Beton; Gelsenkirchen, Mai 2004.
- [27] Firmeninformation der Firma DS Dichtungstechnik GmbH; Nottuln, 2003.
- [28] DIN EN 1610: Technische Regeln für die Bauausführung von Abwasserleitungen und –kanälen, Beuth Verlag, Oktober 1997.
- [29] ATV-M 143: Inspektion, Instandsetzung, Sanierung und Erneuerung von Abwasserkanälen und –leitungen, Teil 6: Dichtheitsprüfungen bestehender, erd-überschütteter Abwasserleitungen und –kanäle und Schächte mit Wasser, Luftüber- und Unterdruck; ATV-Merkblatt, Juni 1998.
- [30] Wesche, K.: Baustoffe für tragende Bauteile, Band 2: Beton, Mauerwerk (nichtmetallische-anorganische Stoffe), Herstellung, Eigenschaften, Verwendung, Dauerhaftigkeit; Bauverlag GmbH, Wiesbaden und Berlin, 1993.
- [31] Benedix, R.: Chemie für Bauingenieure; Teubner-Studienbücher: Bauwesen, Stuttgart und Leipzig, 1999.
- [32] ATV M 143: Inspektion, Instandsetzung, Sanierung und Erneuerung von Abwasserkanälen und –leitungen; Teil 2: Optische Inspektion; ATV-Merkblatt, April 1999.
- [33] Kanalschachtsanierung mit zementgebundenen, durch organische und anorganische Zusätze vergütete Werk trockenmörteln, Information der Rainer Hermes GmbH & Co KG; unter: www.santec-gmbh.de, September 2004.
- [34] Länderarbeitsgemeinschaft Wasser (LAWA): Leitlinien zur Durchführung von Kostenvergleichsrechnungen. Ausgearbeitet vom LAWA-Arbeitskreis Nutzen-Kosten-Untersuchungen in der Wasserwirtschaft, 1993.
- [35] Bosseler, B.; Schlüter, M.; Koutsenok, V.: Entwicklung und Prüfung neuartiger Schachtverbindungen für Abwasserschächte aus Stahlbeton; Gelsenkirchen, Dezember 2001.
- [36] ATV-A 147, Teil 1: Betriebsaufwand für die Kanalisation, Betriebsaufgaben und Intervalle; ATV-Regelwerk, Mai 1993.
- [37] DIN 4030: Beurteilung betonangreifender Wässer, Böden und Gase, Grundlagen und Grenzwerte; Beuth Verlag, Berlin, Juni 1991.
- [38] German Society for Trenchless Technology e.V. (GSTT): Anforderungen an Mörtel für Abwasserkanäle und Bauwerke der Ortsentwässerung, Teil1: Zementgebundene Mörtel,

- Informationen Nr. 18 des Arbeitskreises Nr. 3: Grabenloses Bauen und Leitungsinstandhaltung; Dezember 2003.
- [39] ATV-A 115: Einleiten von nicht häuslichem Abwasser in eine öffentliche Abwasseranlage; ATV-Regelwerk, Oktober 1994.
- [40] Wesche, K.: Baustoffe für tragende Bauteile, Band 2: Beton; Bauverlag, Wiesbaden 1981.
- [41] Klose, N.: Sulfide in Abwasseranlagen, Ursachen und Auswirkungen, Gegenmaßnahmen; In: Beton 30, H. 1 S. 13-17; H.2, S.61-64, 1980.
- [42] Bock, E.: Biologische Korrosion; in: Tiefbau Ingenieurbau Straßenbau (TIS) 26, H. 5, S. 240-250, 1984.
- [43] DIN EN 752: Entwässerungssysteme außerhalb von Gebäuden, Teil 5: Sanierung; Beuth Verlag, Berlin, November 1997.
- [44] Stein, D.: Sanierung von Schächten; in: bi UmweltBau 3/03.
- [45] ATV-M 143: Inspektion, Instandsetzung, Sanierung und Erneuerung von Abwasserkanälen und -leitungen, Teil 1: Grundlagen; ATV-Merkblatt, Dezember 1989.
- [46] Bielecki, R., Schremmer, H.: Biogene Schwefelsäure-Korrosion in teilgefüllten Abwasserkanälen. Sonderdruck aus H. 94 (1987) der Mitteilungen des Leichtweiß-Instituts für Wasserbau der TU Braunschweig.
- [47] Bundesverband der Deutschen Zementindustrie e.V.: Zement-Merkblatt Betontechnik: Instandsetzungsmörtel; Köln, 1996.
- [48] „DBV-Merkblatt, Kunststoffmodifizierter Spritzbeton/Spritzmörtel; Fassung 1991, überarbeitet 1996“.
- [49] Technisches Merkblatt Ergelit-Trockenmörtel Kombina KS 2, Firmeninformation der Fa. Ergelit; Alsfeld-Schwabenrod, 2004.
- [50] 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.

-
- [51] Schmidt, A.: Berechnung von zweischaligen Tunnelauskleidungen unter Berücksichtigung des Verbundes zwischen Spritz- und Pumpbeton. Bauingenieur 61, S. 63-72, 1986.
- [52] Firmeninformation der Fa. Rainer Hermes GmbH & Co KG, Schwerte.
- [53] DIN 18551: Spritzbeton; Herstellung und Güteüberwachung; Beuth Verlag, März 1992.
- [54] Sasse, H.: Schutz und Instandsetzung von Betonbauteilen unter Verwendung von Kunststoffen – Sachstandsbericht; Deutscher Ausschuß für Stahlbeton H. 443, 1994.
- [55] Vorläufige Verarbeitungsrichtlinie Oldodur WS 56 Beschichtung, Flüssigkunststoff-Beschichtungssystem für Kanal- Schachtsanierung; Relius Coatings GmbH & Co., Oldenburg, Juli 2001.
- [56] Baytec RT - Das Hochreaktive Polyurethan-Spritzsystem; Firmeninformation der Bayer AG, Leverkusen.
- [57] Hillemeier, B.: Ein korrosionssicheres Instandsetzungssystem für Abwassersammler aus Beton. Dokumentation II. Internationaler Kongreß Leitungsbau, Band II, S. II/249-II/257, Hamburg , 1987.
- [58] Dammann, P.: Sanierung korrodierter Abwasserrohre. Ausgeführte Beispiele aus Hamburg; Vortrag im Haus der Technik, Essen, Oktober 1985.
- [59] Benkendorf, J.: Erfahrungen bei der Anwendung der Bitumen-Latex-Zweikomponenten-Spritzverfahren am Sammelkanal; Bauplanung-Bautechnik 29 (1975), H. 9, S. 440-443.
- [60] Müller, W.: Grescuchna, R.: Verbesserung des Zustandes kommunaler und industrieller Abwassernetze durch aktiven und passiven Korrosionsschutz; Wasserwirtschaft Wassertechnik (WWT) (1980), H. 10, S. 345-348.
- [61] Gespräch mit Herrn Loos (Loos PUR Technik e.K., Neuenrade) am 03.Oktober 2003.
- [62] Firmeninformation der Fa. Loos PUR Technik e.K., Neuenrade.
- [63] Zusätzliche technische Vertragsbedingungen und Richtlinien für Schutz und Instandsetzung von Betonbauteilen (ZTV-SIB); Der Bundesminister für Verkehr; Verkehrsblatt-Verlag, Dortmund, 1990.
- [64] Deutsche Bauchemie e.V.: Anwendung von mineralischen Systemen in abwassertechnischen Anlagen; Sachstandsbericht, November 1997.

-
- [65] Materialdatenblatt Ergelit Kombina KS1; Information der Fa. Rainer Hermes GmbH & Co. KG, Schwerte.
- [66] Materialdatenblatt Mapei Sewament 100; Information der Mapei GmbH, Erlenbach.
- [67] Kubitza, W.: Poyurethan-Beschichtungen, in: Schuhmann, H. u.a.: Handbuch Betonschutz durch Beschichtungen. Praxis und Anwendungen, Normen und Empfehlungen; Expert Verlag. Ehningen bei Böblingen, 1992.
- [68] DIN EN 196: Prüfverfahren für Zement, Teil 1: Bestimmung der Festigkeit (05.1995), Teil 2: Chemische Analyse von Zement (05.1995), Teil 3: Bestimmung der Erstarrungszeiten und der Raumbeständigkeit (05.1995), Teil 4: Quantitative Bestimmung der Bestandteile (Vornorm, 11.1993), Teil 5: Prüfung der Puzzolanität von Puzzolanzementen (05.1995), Teil 6: Bestimmung der Mahlfeinheit (03.1990), Teil 7: Verfahren für die Probenahme und Probenauswahl von Zement (03.1990), Teil 8: Hydratationswärme – Lösungsverfahren (01.2004), Teil 9: Hydratationswärme - Teiladiabatisches Verfahren (01.2004), Teil 21: Bestimmung des Chlorid-, Kohlenstoffdioxid- und Alkalianteils von Zement (03.1990); Beuth Verlag, Berlin.
- [69] DIN 18555: Prüfung von Mörteln mit mineralischen Bindemitteln, Teil 1: Allgemeines, Probenahme, Prüfmörtel (09.1982), Teil 2: Frischmörtel mit dichten Zuschlägen; Bestimmung der Konsistenz, der Rohdichte und des Luftgehalts (09.1982), Teil 3: Festmörtel; Bestimmung der Biegezugfestigkeit, Druckfestigkeit und Rohdichte (03.1986), Teil 4: Festmörtel; Bestimmung der Längs- und Querdehnung sowie von Verformungskenngrößen von Mauermörteln im statischen Druckversuch (03.1986), Teil 6: Festmörtel; Bestimmung der Haftzugfestigkeit (11.1987), Teil 7: Frischmörtel; Bestimmung des Wasserrückhaltevermögens nach dem Filterplattenverfahren (11.1987), Teil 8: Frischmörtel; Bestimmung der Verarbeitbarkeitszeit und der Korrigierbarkeitszeit von Dünnbettmörteln für Mauerwerk (11.1987), Teil 9: Festmörtel; Bestimmung der Fugendruckfestigkeit (09.1999); Beuth Verlag, Berlin.
- [70] DIN EN 480: Zusatzmittel für Beton, Mörtel und Einpreßmörtel - Prüfverfahren - Teil 2: Bestimmung der Erstarrungszeit; Beuth Verlag, Berlin, Februar 1997.
- [71] DIN EN ISO 868: Kunststoffe und Hartgummi - Bestimmung der Eindruckhärte mit einem Durometer (Shore-Härte); Beuth Verlag, Berlin, Oktober 2003.
- [72] DIN EN ISO 9514 (Entwurf): Beschichtungsstoffe - Bestimmung der Topfzeit von flüssigen Systemen - Vorbereitung und Konditionierung von Proben und Richtlinien für die Prüfung; Beuth Verlag, Berlin, Februar 2004.

-
- [73] DIN EN ISO 3251: Beschichtungsstoffe und Kunststoffe - Bestimmung des Gehaltes an nichtflüchtigen Anteilen; Beuth Verlag, Berlin, Juli 2003.
- [74] DIN 1048: Prüfverfahren für Beton; Teil 5: Festbeton, gesondert hergestellte Probekörper; Beuth Verlag, Berlin, Juni 1991.
- [75] DIN EN ISO 7783: Beschichtungsstoffe - Bestimmung der Wasserdampf-Diffusionsstromdichte - Teil 1: Schalenverfahren für freie Filme (06.1999), Lacke und Anstrichstoffe - Beschichtungsstoffe und Beschichtungssysteme für mineralische Untergründe und Beton im Außenbereich - Teil 2: Bestimmung und Einteilung der Wasserdampf-Diffusionsstromdichte (Permeabilität) (04.1999); Beuth Verlag, Berlin.
- [76] DIN EN ISO 527: Kunststoffe - Bestimmung der Zugeigenschaften - Teil 1: Allgemeine Grundsätze (04.1996), Teil 2: Prüfbedingungen für Form- und Extrusionsmassen (07.1996), Teil 3: Prüfbedingungen für Folien und Tafeln (07.2003), Teil 4: Prüfbedingungen für isotrop und anisotrop faserverstärkte Kunststoffverbundwerkstoffe (07.1997), Teil 5: Prüfbedingungen für unidirektional faserverstärkte Kunststoffverbundwerkstoffe (07.1997); Beuth Verlag, Berlin.
- [77] Neukert, M.; Loos, H.-G.: Schachtbeschichtung mit Oldodur WS 56; Vortrag im Rahmen des IKT-Forum Schacht, September 2002.
- [78] Gesprächsprotokoll der Besprechung mit Mitarbeitern der Firma KUT Kanal- und Umwelttechnik GmbH, Leuna vom 21. Juli 2003.
- [79] Gesprächsprotokoll der Besprechung mit Mitarbeitern der Firma Rainer Kiel Kanalsanierung, Blomberg vom 02. Juni 2003.
- [80] Gesprächsprotokoll der Besprechung mit Mitarbeitern der Firma KS-Kanalsanierung, Freudenberg vom 11. Juni 2003.
- [81] Hoppe, F.: Parameter des Hochdruckspülversuches nach dem Hamburger Modell der Stadtentwässerung Hamburg, schriftliche Mitteilung, August 2002
- [82] DIN EN ISO 527: Kunststoffe - Bestimmung der Zugeigenschaften, Teil 2: Prüfbedingungen für Form- und Extrusionsmassen; Beuth Verlag, Berlin, April 1996.
- [83] DIN 19565: Rohr und Formstücke aus glasfaserverstärktem Polyesterharz (UP-GF) für erdverlegte Abwasserkanäle und -leitungen; geschleudert, gefüllt, Teil 1: Maße, Technische Lieferbedingungen; Beuth Verlag, Berlin, März 1989.

-
- [84] WTA-Sachstandsbericht: Messung der Feuchte von mineralischen Baustoffen, erarbeitet durch WTA-Referat 4 Mauerwerk, Arbeitsgruppe 4.11; Fraunhofer IRB Verlag, 2004.
- [85] Firmeninformation der Firma Elcometer Instruments GmbH, Aalen, 2004.
- [86] DIN EN 1542: Produkte und Systeme für den Schutz und die Instandsetzung von Betontragwerken - Prüfverfahren - Messung der Haftfestigkeit im Abreißversuch; Beuth Verlag, Berlin, Juli 1999.
- [87] DIN EN 1766: Produkte und Systeme für den Schutz und die Instandsetzung von Betontragwerken - Prüfverfahren - Referenzbetone für Prüfungen; Beuth Verlag, Berlin, März 2000.
- [88] Knöfel, D.: Betonkorrosion; in Handbuch Betonschutz durch Beschichtungen: Praxis und Anwendungen, Normen und Empfehlungen (Schumann et al.); Expert Verlag Böblingen, 1992.
- [89] DIN 1160: Zement mit besonderen Eigenschaften, Teil 10: Zusammensetzung, Anforderungen und Übereinstimmungsnachweis von Normalzement mit besonderen Eigenschaften; Beuth Verlag, Berlin, August 2004.
- [90] DIN EN 450: Flugasche für Beton - Definitionen, Anforderungen und Güteüberwachung; Beuth Verlag, Berlin, Januar 1995.
- [91] Merkblatt des deutschen Betonvereins: Zugabewasser; Deutscher Betonverein, 1996.
- [92] Gesprächsprotokoll des Telefonats mit Fr. Dr. Luchs, Readymix AG vom 03. Dezember 2003.
- [93] Gesellschaft für Materialprüfung und Baustoffforschung mbH: Auszug aus dem Leistungsspektrum zur Ermittlung der Schädigung sowie von Schadenstiefen mit Hilfe der Mikroskopie, Anhang B: Biogene Schwefelsäurekorrosion von Beton; Berlin 2004.
- [94] Skriptum zur Vorlesung "Werkstoffe im Bauwesen 1", IWB, Universität Stuttgart.
- [95] Materialdatenblatt Ergelit Kombina KT, Information der Fa. Rainer Hermes GmbH & Co KG, Schwerte.
- [96] Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen Köln (Hrsg.): Richtlinien für die Standardisierung des Oberbaus von Verkehrsflächen – RstO, 86/89.
- [97] DIN 1072: Straßen- und Wegbrücken, Lastannahmen; Beuth Verlag, Berlin, Dezember 1985.

-
- [98] DIN 4034: Schächte aus Beton- und Stahlbetonfertigteilen, Teil 2: Schächte für Brunnen- und Sickeranlagen; Maße, Technische Lieferbedingungen; Beuth Verlag, Berlin, Oktober 1990.
- [99] FBS-Qualitätsrichtlinie Teil 1: Betonrohre, Stahlbetonrohre, Vortriebsrohre und Schachtbauteile für erdverlegte Abwasserkanäle und –leitungen mit FBS-Qualität; Ausführungen, Anforderungen und Prüfung, August 2000.
- [100] Zwolinski, S.; Bosseler, B.: Schachtbauteile DIN 4034, Teil 1, Teil 2: Qualität mit feinen Unterschieden; IKT-eNewsletter, Gelsenkirchen, Dezember 2001.
- [101] RILEM (International Union of Laboratories and Experts in Construction Materials, Systems and Structures) Technical Committee 14-CPC (Concrete Permanent Committee): Concrete Test Methods, No 11.1: Absorption of water by immersion, in: Materials and Structure No 30, RILEM Publications S.A.R.L, Paris 2002.
- [102] Semet, W.: Die Bedeutung der Oberflächenfestigkeit von Beton und Zementmörtel für nachfolgende Beschichtungen; Bautenschutz und Bausanierung Heft 4/1984, S. 119-126.
- [103] Semet, W.: Die Oberflächenvorbereitung des Betonuntergrundes, in Schumann, H.: Handbuch Betonschutz durch Beschichtungen; Expert Verlag, Böblingen, 1992.
- [104] Meschke, G.; Rumans, E.; Gofman, M.: Gutachten und numerische Studie über die Ermittlung von Haftzugspannungen von Mörtelbeschichtungen in Abwasserkanälen aus Betonfertigteilen; im Auftrag des IKT-Institut für Unterirdische Infrastruktur, Bochum, Januar 2005.
- [105] Gesprächsprotokoll des Telefonats mit Herrn Rumanus (Lehrstuhl für Statik und Dynamik an der Ruhr-Universität Bochum) vom 31. Januar 2005.
- [106] Cerny, R.; Rovnanikova, P.: Transport Processes in Concrete; Spon Press, London, New York, 2002.
- [107] Schneider, K.-J. (Hrsg.): Bautabellen für Ingenieure mit Berechnungshinweisen und Beispielen; Werner Verlag, Neuwied, 2004.
- [108] ATV-DVWK-A 127: Statische Berechnung von Abwasserkanälen und –leitungen, ATV-DVWK-Arbeitsblatt, 2000.
- [109] Duddek, H.: Empfehlungen zur Berechnung von Tunneln im Lockergestein. Die Bau-technik, 10:349–356, 1980.

- [110] Grasberger, S.; Meschke, G.: Drying shrinkage, creep and cracking of concrete: From coupled material modelling to multifield structural analyses. In R. DeBorst, H.A. Mang, N. Bićanić, and G. Meschke, editors, *Computational Modelling of Concrete Structures*, pages 433–442. Balkema, 2003.
- [111] Grasberger, S.; Neumann, M.; Meschke, G.: Numerische Dauerhaftigkeitsanalysen von Betonstrukturen am Beispiel einer Tunnelinnenschale. *Bauingenieur*, 78(9):411–421, 2003.
- [112] Meschke, G.; Grasberger, S.: Numerical modeling of coupled hygromechanical degradation of cementitious materials. *Journal of Engineering Mechanics (ASCE)*, 129(4):383–392, 2003.
- [113] Merkblatt ATV-M 149: Zustanderfassung, -klassifizierung und -bewertung von Entwässerungssystemen außerhalb von Gebäuden; ATV-Merkblatt, April 1999.