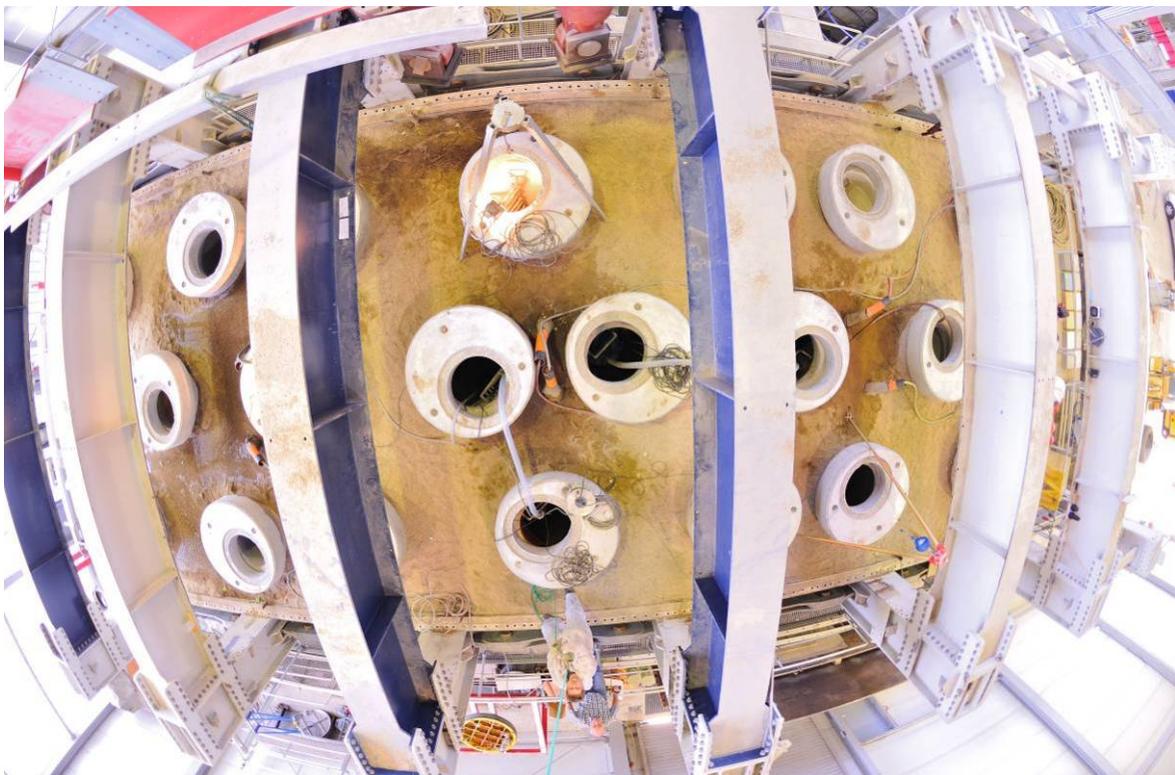
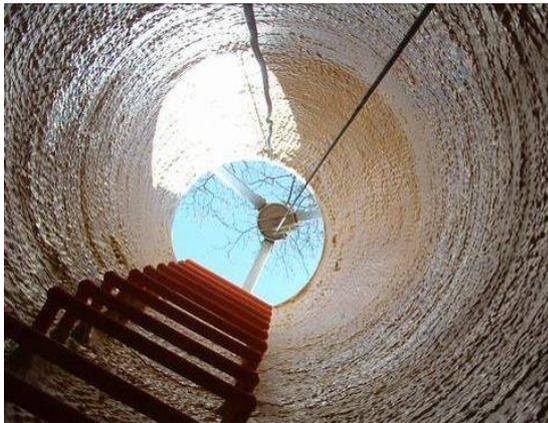


Sanierung von Abwasserschächten

- Untersuchung von Materialien und Systemen zur
Abdichtung und Beschichtung -



Endbericht zum Forschungsprojekt:

Sanierung von Abwasserschächten

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

Auftraggeber:



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

Auftragnehmer:



IKT - Institut für Unterirdische Infrastruktur gGmbH
Exterbruch 1
45886 Gelsenkirchen

Bearbeitung:

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

Danksagung:

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

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

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

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

<u>Inhaltsverzeichnis</u>	Seite
1 VERANLASSUNG	4
2 PROBLEMSTELLUNG	7
3 AUFGABENSTELLUNG UND UNTERSUCHUNGSPROGRAMM	9
4 STAND DER TECHNIK	15
4.1 ÜBERBLICK.....	15
4.2 ABWASSERSCHÄCHTE.....	16
4.2.1 Funktionen und Anforderungen.....	16
4.2.2 Schachtwerkstoffe und Schachtaufbauten.....	16
4.2.3 Schadensbilder.....	17
4.3 BESCHICHTUNGSSYSTEME FÜR DEN EINSATZ IN ABWASSERANLAGEN	18
4.3.1 Grundlagen.....	18
4.3.2 Mörtelbeschichtungen.....	20
4.3.2.1 Beanspruchungen	20
4.3.2.2 Beschichtungsmaterialien.....	21
4.3.2.3 Verfahrenstechnik für Mörtelbeschichtungen	22
4.3.2.4 Sanierungsqualität	26
4.3.3 Polymere Beschichtungen.....	26
4.3.3.1 Beanspruchungen	26
4.3.3.2 Beschichtungsmaterialien.....	28
4.3.3.3 Verfahrenstechnik für polymere Beschichtungen.....	29
4.3.3.4 Sanierungsqualität	31
4.3.4 Verbundfestigkeit	31
4.4 ABDICHTUNGSSYSTEME FÜR SCHACHTKÖRPER UND ROHRANBINDUNG	33
4.4.1 Grundlagen.....	33
4.4.2 Materialien und Verfahren	34
4.4.2.1 Mörtel und Schlämmen	34
4.4.2.2 Mineralische Injektionsmaterialien	35
4.4.2.3 Polymere Injektionsmittel	35
4.4.2.4 Verfahrenstechnik für Injektionssysteme	37
4.4.3 Sanierungsqualität.....	39
5 IN-SITU-MAßNAHMEN	40
5.1 UNTERSUCHUNGSUMFANG	40
5.2 UNTERSUCHUNG VON ALTBESCHICHTUNGEN	40
5.2.1 Überblick	40
5.2.2 Mörtelbeschichtungen.....	41
5.2.2.1 Beschichtungsalter: 3 bis 5 Jahre, Schachthistorie bekannt.....	41
5.2.2.2 Beschichtungsalter: 10 bis 14 Jahre, Feststellung des Ist-Zustands.....	48
5.2.3 Polymere Beschichtungen.....	53
5.2.4 Untersuchungsergebnisse	59
5.3 BEGLEITUNG VON SANIERUNGSMABNAHMEN AN ABWASSERSCHÄCHTEN	62
5.3.1 Überblick	62
5.3.2 Sanierung undichter Rohreinbindungen.....	62
5.3.3 Abdichtung undichter Schachtkörper	64
5.3.4 Untersuchungsergebnisse	65

6	GROBVERSUCHE IM MAßSTAB 1:1	67
6.1	VERSUCHSAUFBAU UND VERSUCHSDURCHFÜHRUNG	67
6.2	BESCHICHTUNGSMABNAHMEN	77
6.2.1	<i>Versuchsprogramm</i>	77
6.2.2	<i>Mörtelbeschichtungen</i>	78
6.2.2.1	Übersicht	78
6.2.2.2	Ergelit KS 1 (händischer Auftrag)	79
6.2.2.3	Ergelit KS 1 (KS-ASS-Verfahren)	85
6.2.2.4	KA 20	91
6.2.2.5	Kanament	98
6.2.2.6	ombran MHP	104
6.2.2.7	SD 1 -W	109
6.2.3	<i>Polymere Beschichtungen</i>	114
6.2.3.1	Übersicht	114
6.2.3.2	Autoschicht auf einem Handlaminat	115
6.2.3.3	Eprocoat	121
6.2.3.4	Oldodur WS 56	126
6.2.3.5	Polyfill	131
6.2.3.6	Ultracoat	137
6.3	ABDICHTUNGSMABNAHMEN	143
6.3.1	<i>Versuchsprogramm</i>	143
6.3.2	<i>Abdichtungssysteme für den Schachtkörper</i>	144
6.3.2.1	IPA Unimörtel Rapid, IPANEX Stopfmörtel, IPANEX Flächendicht WF	144
6.3.2.2	AUTO SIL RAPID und AUTO SIL WATER	147
6.3.2.3	Xypex Patch ´n Plug und Xypex Concentrate	150
6.3.2.4	Carbo Stop U und Carbo Crack Seal H	152
6.3.2.5	Spesan WS	156
6.3.2.6	Cft-Harz	158
6.3.2.7	Carbo Cryl Wv	162
6.3.2.8	E 2 F	165
6.3.3	<i>Abdichtungssysteme für Rohranbindungen</i>	168
6.3.3.1	Carbo Stop U und Carbo Crack Seal H	168
6.3.3.2	Carbo Cryl Wv	171
6.3.3.3	E 1 F	175
6.3.4	<i>Umweltverträglichkeit</i>	177
6.4	ERGEBNISSE DER GROBVERSUCHE	180
6.4.1	<i>Bautechnische Umsetzung</i>	180
6.4.2	<i>Kurzzeit-Wirkung</i>	182
6.4.2.1	Abdichtung der Rohreinbindungen	182
6.4.2.2	Abdichtung der Schachtkörper	183
6.4.2.3	Mörtelbeschichtungen	186
6.4.2.4	Polymere Beschichtungen	188
6.4.3	<i>Langzeit-Wirkung</i>	190
6.4.3.1	Rohranbindungen	190
6.4.3.2	Schachtkörper	191
6.4.3.3	Mörtelbeschichtungen	194
6.4.3.4	Polymere Beschichtungen	195
6.4.4	<i>Gesamtergebnis</i>	198

7	SPEZIELLE FRAGESTELLUNGEN.....	207
7.1	UNTERSUCHUNGSPROGRAMM.....	207
7.2	WASSERZUGABE BEI MINERALISCHEN BESCHICHTUNGEN	207
7.2.1	Veranlassung	207
7.2.2	Versuchsprogramm.....	208
7.2.3	Prüfergebnisse	211
7.2.4	Zusammenfassung.....	214
7.3	HOHLSTELLEN BEI MINERALISCHEN BESCHICHTUNGEN	215
7.3.1	Veranlassung	215
7.3.2	Versuchsprogramm.....	215
7.3.3	Versuchsdurchführung.....	217
7.3.4	Versuchsergebnisse.....	218
7.3.5	Ergänzende In-situ-Untersuchungen	223
7.3.6	Zusammenfassung.....	226
7.4	NACHBEHANDLUNGSMITTEL BEI MINERALISCHEN BESCHICHTUNGEN	227
7.4.1	Vorgehensweise	227
7.4.2	In-situ Maßnahmen.....	228
7.4.3	Laborversuche	228
7.4.4	Versuchsergebnisse.....	229
7.4.5	Zusammenfassung.....	230
7.5	HOHLSTELLENORTUNG AN MÖRTELBESCHICHTUNGEN.....	231
7.5.1	Veranlassung	231
7.5.2	Verfahren und Untersuchungsprogramm	231
7.5.3	Prüfergebnisse	233
7.5.4	Zusammenfassung.....	239
7.6	BETRIEBSBELASTUNGEN AN SANIERTEN ROHREINBINDUNGEN	239
7.6.1	Veranlassung	239
7.6.2	Versuchsaufbau und -durchführung	240
7.6.3	Versuchsergebnisse.....	243
7.6.4	Zusammenfassung.....	247
7.7	WIRTSCHAFTLICHKEITSBETRACHTUNGEN	248
8	PLANUNGSHINWEISE UND EMPFEHLUNGEN.....	253
8.1	QUALITÄTSSICHERUNG SCHACHTBESCHICHTUNG	253
8.1.1	Anwendungsbereich.....	253
8.1.2	Sanierungsplanung	253
8.1.3	Untergrundvorbereitung	255
8.1.4	Beschichtung.....	256
8.1.5	Abnahmen	256
8.1.6	Prüfungen zur Qualitätssicherung.....	256
8.1.7	Muster Sanierungsprotokolle.....	258
8.2	SCHULUNGSPROGRAMM	261
9	FAZIT.....	263
10	ZUSAMMENFASSUNG.....	269
11	LITERATUR	270

1 Veranlassung

Die Gesamtzahl der Abwasserschächte in öffentlichen Verkehrsflächen lässt sich für die Bundesrepublik Deutschland mit ca. 10 Mio. bzw. für Nordrhein-Westfalen auf mindestens 2 Mio. abschätzen (vgl. [1], [2]). Diese Abwasserschächte besitzen eine besondere Bedeutung für den Umweltschutz. Durch undichte Schächte exfiltriert nicht nur Abwasser; bei anstehendem Grundwasser können auch erhebliche Fremdwassermengen infiltrieren und so die Reinigungsleistung von Kläranlagen und Regenbecken beeinträchtigen. Darüber hinaus haben Abwasserschächte eine hohe betriebliche Bedeutung für die Kommunen, da sie die Zugänglichkeit zu den Kanälen, zum Beispiel für Reinigungs- und Instandsetzungsmaßnahmen, sicherstellen und durch Belüftung des Kanalnetzes zur Verminderung von Korrosionsvorgängen und explosiven Gasen beitragen. Da sie zudem eine Schnittstelle zum Straßenraum sind, können Mängel an Abwasserschächten auch zu erheblichen Verkehrsgefährdungen führen.

Ein konkreter Handlungsdruck ergibt sich für die Netzbetreiber in Nordrhein-Westfalen 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. Werden Undichtigkeiten am Schachtkörper oder ein schadhafter Allgemeinzustand des Schachtes festgestellt, sind gemäß dem Runderlass [4] des Ministeriums für Umwelt und Naturschutz, Landwirtschaft und Verbraucherschutz des Landes Nordrhein-Westfalen Abdichtungs- und Instandsetzungsmaßnahmen vorzunehmen.

Vor diesem Hintergrund beauftragte das Ministerium für Klimaschutz, Umwelt, Landwirtschaft, Natur- und Verbraucherschutz des Landes Nordrhein-Westfalen (MKULNV NRW) im Juni 2005 das IKT - Institut für Unterirdische Infrastruktur mit dem ersten Teil des Forschungsprojektes „Abwasserschächte - Überwachung, Prüfung und Sanierung“ [5]. In dieser Vorstudie wurden Übersichten über die am Markt verfügbaren Schachtsysteme, Dichtungssysteme, Inspektionssysteme, Klassifizierungs- und Bewertungsverfahren sowie Sanierungsverfahren erstellt und die praxisrelevanten Problem- und Fragestellungen bei der baulichen und betrieblichen Überwachung sowie bei der Sanierung von Abwasserschächten ermittelt.

Auf der Basis der Ergebnisse dieser Vorstudie wurde gemeinsam mit 23 kommunalen Kanalnetzbetreibern - dem Lenkungskreis Abwasserschächte - ein umfassendes Untersuchungsprogramm entwickelt und in forschungsrelevante Einzelthemen unterteilt. Dieses Untersuchungsprogramm zum IKT-Forschungsschwerpunkt Abwasserschächte umfasst 19 thematisch unterschiedliche und unabhängige Teilprojekte zu den Forschungsmodulen Voruntersuchungen, Neubau, Betriebsoptimierung, Sanierung, Systemvergleiche und Abschlussanalyse. Das Forschungsmodul Sanierung setzt sich aus den Teilmodulen Reparatur, Auskleidung, Beschichtung und Sonderfragestellungen zusammen. Bild 1 zeigt eine Übersicht der unterschiedlichen Forschungsmodule des IKT-Forschungsschwerpunktes „Abwasserschächte“ einschließlich der zugehörigen Arbeitspakete der jeweiligen Teilprojekte.

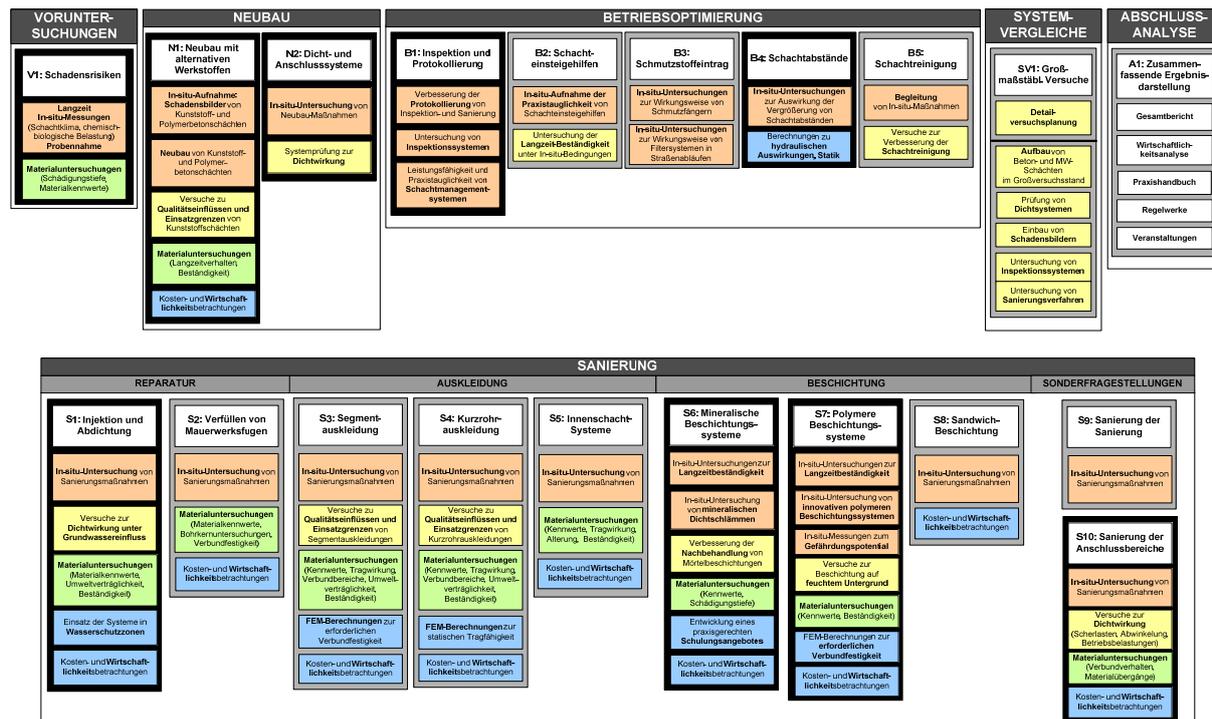


Bild 1 IKT-Forschungsschwerpunkt „Abwasserschächte“: Forschungsmodul und Teilprojekte

Besonders dringlichen Untersuchungsbedarf sahen die Kanalnetzbetreiber bei der Sanierung von undichten Abwasserschächten. Hierbei sind sowohl die Abdichtung des Schachtkörpers, der Zu- und Abläufe sowie die Beschichtung des Schachtes mit mineralischen oder polymeren Systemen von Interesse. Besondere Schwerpunkte liegen für die Betreiber von Kanalisationsnetzen in diesem Zusammenhang in der Überprüfung der Anwendbarkeit und Dichtwirkung sowie der wesentlichen Qualitätseinflüsse, Einsatzgrenzen, Umweltverträglichkeit und Beständigkeit der eingesetzten Produkte. Hierbei sollten die besonderen Randbedingungen bei der Abdichtung von Abwasserschächten, wie z.B. beengte Arbeitsverhältnisse, flächige Ausprägung von Undichtigkeiten, drückender Grundwasserzufluss sowie Anforderungen hinsichtlich der Kosten der Maßnahmen berücksichtigt werden.

Gerade das wirtschaftliche Risiko ist als bedeutend einzuschätzen, da in Nordrhein-Westfalen mindestens 10 % des Gesamtbestandes, also mindestens 200.000 Schächte, erhebliche Undichtigkeiten und/oder weitere Schäden aufweisen, die eine Sanierung erforderlich machen (nach [6] und [7]). Unter Ansatz durchschnittlicher Kosten von ca. 3.500,- Euro pro Schachtsanierung [8] ergibt sich somit für NRW ein kurzfristiger Gesamtanierungsbedarf von ca. 700 Millionen Euro. Darüber hinaus zeigte eine Umfrage zur Sanierung von Abwasserschächten aus dem Jahr 2001 [9], dass sich bundesweit insgesamt ca. 12 % aller Schächte grundsätzlich auch für den Einsatz von Beschichtungsverfahren eignen. Mit Blick auf ein damit mögliches Marktvolumen von ca. 2,7 Mrd. Euro (vgl. [9]) ist also für die Zukunft noch mit erheblichen Aufwendungen in diesem Bereich zu rechnen.

In der Folge beauftragte das Ministerium für Klimaschutz, Umwelt, Landwirtschaft, Natur- und Verbraucherschutz des Landes Nordrhein-Westfalen (MKULNV NRW) im Juli 2008 das IKT - Institut für Unterirdische Infrastruktur mit dem hier dargestellten Forschungsprojekt „Sanierung von Abwasserschächten (Aktenzeichen: I-2-ZV-2.1-08/068)“. Dieses Projekt umfasst wesentliche Teilprojekte des Moduls „Sanierung“ im IKT-Forschungsschwerpunkt „Abwasserschächte“: die (Vor-)Abdichtung des Schachtkörpers und der Zu- und Abläufe sowie die Beschichtung mit mineralischen und polymeren Systemen. Auswählte Produkte und Verfahren wurden im Rahmen von Vor-Ort-Maßnahmen, Großversuchen im Maßstab 1:1 und ergänzenden Detailanalysen untersucht. Da sich im Zuge des Projektverlaufes zeigte, dass die Sanierungsqualität und die relevanten Versagensmechanismen eine nicht zu vernachlässigende Zeitabhängigkeit aufweisen können, wurde der Beobachtungszeitraum für die Großversuche schließlich um 3 Monate verlängert (vgl. Aktenzeichen: I-2-ZV-2.1-08/068.1).

2 Problemstellung

Die Problemstellungen bei der Sanierung von Schachtbauwerken müssen im vorliegenden Fall aufgrund der unterschiedlichen Verfahren und Systeme aus verschiedenen Blickwinkeln betrachtet werden. Neben der (Vor-)Abdichtung des Schachtkörpers und der Zu- und Abläufe stellt auch die Beschichtung mit mineralischen oder polymeren Systemen eine spezielle Aufgabe dar.

Abdichtung des Schachtkörpers und der Zu- und Abläufe

Injektions- und Abdichtungsmaßnahmen kommen in zahlreichen Bauanwendungen zum Einsatz. So liegen umfangreiche Erfahrungen aus dem Tunnel- und Stollenbau vor. Insbesondere für die Instandsetzung von Betonbauwerken im Hochbau existieren zahlreiche technische Normen, Merk- und Arbeitsblätter (vgl. z.B. [10], [11] und [12]). Die in diesen Anwendungsfällen vorliegenden Randbedingungen und Einsatzgrenzen der unterschiedlichen Verfahren sind jedoch nicht ohne weiteres auf eine Anwendung bei der Abdichtung von undichten Abwasserschächten übertragbar. Im Gegensatz zu den o. a. Anwendungsfällen steht in der Regel für Abdichtungsmaßnahmen an Abwasserschächten, die häufig im Vorfeld von weitergehenden Renovierungsmaßnahmen eingesetzt werden, nur ein sehr begrenztes finanzielles Budget zur Verfügung. Zusätzlich müssen die Arbeiten häufig unter hohem Zeitdruck ausgeführt werden, z.B. wenn der Abwasserschacht in einer stark frequentierten Verkehrsfläche liegt. Hinzu kommen beengte Arbeitsverhältnisse, flächige Ausprägungen von Undichtigkeiten in alten Mauerwerksschächten sowie wechselnde Grundwasserstände mit zum Teil stark drückendem Grundwasserzufluss, der die Anforderungen an Abdichtungsarbeiten erheblich erhöht.

Undichtigkeiten im Bereich der Zu- und Abläufe stellen eines der häufigsten Schadensbilder an Abwasserschächten dar (vgl. [5]). Bei der Sanierung dieser Bereiche bestehen besondere Anforderungen, da in der Regel ein gelenkiger, dichter Verbund zwischen zwei gleichen oder auch unterschiedlichen Materialien hergestellt werden muss, der darüber hinaus auch langfristig beständig gegenüber betrieblichen Belastungen, wie z.B. der Kanalreinigung, sein muss. In der Praxis werden zur Sanierung dieser Zu- und Abläufe häufig Kurzliner, Injektionen auf PU-, Epoxid- oder Acrylatharzbasis und/oder mineralische „Stopfmörtel“ eingesetzt. Der Nachweis, inwieweit die eingesetzten Verfahren die gewünschte (gelenkige und langfristige) Dichtwirkung erzielen und auch bei drückendem Grundwasser anwendbar sind, steht noch aus. Insbesondere bei Werkstoffwechseln ist auch die Verbund- und somit die Dichtwirkung der o. a. Verfahren zu hinterfragen.

Zusammenfassend kann festgehalten werden, dass die Einsatzgrenzen und Qualitätseinflüsse bei der Abdichtung des Schachtkörpers und der Zu- und Abläufe von Abwasserschächten unklar sind und den Kanalnetzbetreibern Anhaltspunkte zur Entscheidung für oder gegen entsprechende Produkte bzw. Vorgehensweisen unter Berücksichtigung der Wirtschaftlichkeit fehlen.

Beschichtung mit mineralischen Systemen

Zum Einsatz von mineralischen Beschichtungssystemen bei der Sanierung von Bauteilen und Bauwerken im Bereich des Hoch- sowie des Tunnelbaus existieren umfangreiche technische Normen, Merk- und Arbeitsblätter (vgl. z.B. [10], [13] und [14]). Diese sind jedoch nur bedingt auf 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 übertragbar. Im Bereich der Abwassertechnik sind bislang vor allem einzelne Untersuchungen zur Anwendung von mineralischen Beschichtungssystemen in Abwasserkanälen durchgeführt worden (vgl. z.B. [15].) Darüber hinaus werden in [16] und [17] Anforderungen an Mörtel für Abwasserkanäle und Bauwerke der Ortsentwässerung vorgeschlagen. In [18] wurden erstmalig am Markt verbreitete bzw. innovative Produkte, Verfahren und Werkzeuge ausgewählt, deren Einsatz bei 26 Beschichtungsmaßnahmen in situ begleitet und umfangreiche Qualitätsprüfungen durchgeführt. Es konnte gezeigt werden, dass mineralische Dickbeschichtungen 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.

Beschichtung mit polymeren Systemen

Zum Einsatz von polymeren Beschichtungssystemen bei der Sanierung von Bauteilen und Bauwerken im Bereich des Hochbaus existieren mehrere Merk- und Arbeitsblätter (vgl. z.B. [10] und [13]). Auch diese sind jedoch nur bedingt auf 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 übertragbar. In [18] wurden erstmalig die Einsatzgrenzen und Qualitätseinflüsse von am Markt verbreiteten polymeren Beschichtungssystemen in umfangreichen Praxisuntersuchungen an 16 Beschichtungsmaßnahmen in situ systematisch untersucht. Es konnte gezeigt werden, dass die untersuchten polymeren Beschichtungssysteme grundsätzlich geeignet sein können, die Dichtheit und Funktionsfähigkeit von Abwasserschächten wiederherzustellen. Allerdings unterstreicht die in einer Vielzahl der untersuchten Fälle geringe Sanierungsqualität auch, dass die bisherigen Maßnahmen zur Qualitätssicherung gerade mit Blick auf die gegenwärtige Ausführungspraxis stark verbesserungswürdig sind. Insbesondere konnte festgestellt werden, dass die Untergrundfeuchte einen maßgeblichen Einfluss auf die Qualität der untersuchten polymeren Beschichtungssysteme hat, so dass hier an die Beschichtung sehr feuchter Mauerwerksschächte besondere Anforderungen an die Oberflächenvorbereitung bzw. Vorabdichtung zu stellen sind.

3 Aufgabenstellung und Untersuchungsprogramm

Zur grundsätzlichen Bewertung der Qualitätseinflüsse, Einsatzmöglichkeiten und -grenzen der Abdichtungs- und Beschichtungsverfahren sind Untersuchungen unter definierten, vergleichbaren und praxisnahen Laborbedingungen erforderlich, die auf bereits vorhandenen Erkenntnissen aufbauen. Im vorliegenden Fall wird das besondere Augenmerk auf die verfahrenstechnischen Besonderheiten und einsatzspezifischen Randbedingungen bei der Sanierung von Abwasserschächten gelegt. Durch In-situ- und Laboruntersuchungen sollen Hinweise zu den grundsätzlichen Qualitätseinflüssen sowie zu den Leistungsgrenzen der betrachteten Systeme und Verfahren gewonnen werden.

Abwasserschächte: Bautechnische Eigenschaften

Sanierte Abwasserschächte sind komplexe bautechnische Systeme. Entsprechend ist eine Zuordnung von Schäden und Mängeln der Sanierungsqualität zu Schadens- bzw. Mängelursachen allein aufgrund von In-situ-Beobachtungen kaum möglich. Bereits in [18] konnte gezeigt werden, dass vielfältige Faktoren die Dauerhaftigkeit und Qualität des Sanierungsergebnisses beeinflussen können, so z.B. Fehler bei der Sanierungsausführung und -vorbereitung sowie unberücksichtigte Bauwerksbelastungen bzw. bauliche Randbedingungen. Dem Verständnis für die bautechnischen (System-)eigenschaften eines sanierten Abwasserschachtes kommt damit eine besondere Bedeutung zu. Im Einzelnen betrifft dies:

1. Belastungen

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

2. Materialeigenschaften

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

3. Bauteil- bzw. Bauwerksgeometrie

Bei Abwasserschächten handelt es sich meist um einwandige, zylindrische Bauteile mit seitlichen Zu- und Abläufen. Im Rahmen von Abdichtungs- oder Beschichtungsmaßnahmen kann diese Geometrie wesentlich verändert werden. Abdichtungen durch Injektionen erzeugen beispielsweise großvolumige Körper im umgebenden Boden und verändern so maßgeblich die Geometrie außerhalb des Schachtbauwerkes. Beschichtungen sollen einen festen Verbund mit dem Aus-

gangsmaterial eingehen und verändern hierdurch Wanddicke und -aufbau. Zeitabhängig kann es hier zu wesentlichen Veränderungen kommen, z. B. durch das Ablösen der Beschichtung auch in Verbindung mit Blasenbildungen infolge von Außenwasserdruck oder Abreißen von Injektionskörpern bedingt durch wechselnde Grundwasserstände.

4. Äußere Wechselwirkungen / Randbedingungen

Belastungen, Materialeigenschaften und Bauwerksgeometrie können auch in enger Wechselwirkung mit anderen Einflüssen und Randbedingungen stehen. Beispiele sind die Verdichtung des umgebenden Bodens sowie Veränderungen des Straßenoberbaus und des Untergrundes.

Schacht-/Sanierungszustände

Über den Bau- bzw. Sanierungsprozess sowie die spätere Betriebsphase unterliegen die Belastungen, Materialeigenschaften und Geometrie eines Abwasserschachtes zeitabhängigen Veränderungen. In der Regel werden die verwendeten Materialien bereits in ihrer Entwicklung umfangreichen Laborprüfungen zur Ermittlung der (zeitabhängigen) Materialeigenschaften bei mechanischer und chemischer Belastung unterzogen (vgl. [32]). Der Schwerpunkt der folgenden Betrachtungen liegt daher auf den verfahrenstechnischen Einflussfaktoren, anwendungsspezifischen Belastungen (insbesondere Grundwasser) und geometrischen Eigenschaften der sanierten Systeme.

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

1. Im Rahmen einer *Zustandserfassung* werden Schächte im **Bestand** eines Netzbetreibers inspiziert und der **Sanierungsbedarf** wird ermittelt. In der Regel betrifft dies undichte Mauerwerks- oder Betonschächte mit zumeist kreisförmigem Querschnitt und unterschiedlichen Schadstellen, beispielsweise punktuelle oder flächige Oberflächenschäden sowie Undichtigkeiten in der Rohrwand und undichte Zuläufe. Der Wassereindrang kann stark in Abhängigkeit des ständig wechselnden Grundwasserstandes variieren. Hinzu kommt, dass die angeschlossenen Rohrleitungen aus unterschiedlichen Materialien bestehen können. Außerdem ist in einem Abwasserschacht mit erheblicher Feuchtigkeit und Verschmutzung der Wandung zu rechnen.
2. Ausgehend von diesem Szenario werden nun *Abdichtungsmaßnahmen* ausgeführt, um den Schacht in einen **temporär dichten Zustand** zu überführen. Dabei werden gezielt die sichtbaren Undichtigkeiten im Schacht mit unterschiedlichsten Materialien und Verfahren bis auf Höhe des aktuellen Grundwasserstandes abgedichtet. Zum Einsatz kommen hier Materialien auf mineralischer und polymerer Basis, welche durch händisches Applizieren auf der Schachtinnenwand oder mithilfe von Packern und Pumpen in die Schachtumgebung injiziert werden. Hierbei wird zumeist die Geometrie des Bauwerks maßgeblich verändert. Durchgeführt

werden diese Maßnahmen in der Regel in den Sommermonaten bei niedrigen Grundwasserständen.

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

Untersuchungsprogramm

Mit Blick auf die o. a. Aufgabenstellung, d.h. die bautechnischen Eigenschaften sanierter Abwasserschächte und die relevanten zeitabhängigen Sanierungszustände, wurde ein umfangreiches Untersuchungsprogramm konzipiert, welches In-situ-Maßnahmen, Großversuche im Maßstab 1:1 sowie die Untersuchung spezieller Fragestellungen umfasste.

In-situ-Maßnahmen

Im Rahmen der **In-situ-Maßnahmen** (vgl. Abschnitt 5) wurden zunächst Altbeschichtungen mit einem Alter von etwa 3 bis 14 Jahren untersucht und zahlreichen Qualitätsprüfungen unterzogen, um die Auswirkungen mehrjähriger Betriebsbelastungen zu erfassen. Materialuntersuchungen an in situ entnommenen Proben von polymeren und mineralischen Beschichtungen sollten Aufschluss über Art und Umfang von Schädigungen infolge des mehrjährigen Einsatzes im Abwasserschacht liefern. Weitere Baustellenbegleitungen von Abdichtungsmaßnahmen an Schachtkörpern und Rohreinbindebereichen dienten in erster Linie dazu, Materialien und Verfahren für die anschließenden Groß- und Laborversuche auszuwählen und Eckdaten für die Randbedingungen der Großversuche zu erhalten. Der Sanierungserfolg der In-situ-Maßnahmen wurde im Rahmen der Projektlaufzeit mehrfach dokumentiert. Die Begleitung von Schachtneubaumaßnahmen ermöglichte eine vertiefende Aufnahme von baubegleitenden Kosten sowie von Folgekosten, mit Blick auf eine Wirtschaftlichkeitsbetrachtung (vgl. spezielle Fragestellungen sowie Abschnitt 7.7) von Beschichtungssystemen im Vergleich zu Neubauten.

Großversuche im Maßstab 1:1

Im Großversuchsstand des IKT wurden vergleichende Untersuchungen unter definierten, für alle Sanierungsmaßnahmen gleichen Randbedingungen im Maßstab 1:1 durchgeführt (vgl. Kapitel 6). Diese Randbedingungen wurden aufgrund von Erfahrungen aus früheren Forschungsvorhaben und Qualitätssicherungsmaßnahmen sowie den o. a. In-situ-Maßnahmen abgeleitet und im Rahmen von Lenkungskreissitzungen mit den beteiligten Netzbetreibern abgestimmt. Hier sollte insbesondere die Leistungsfähigkeit und Robustheit der Verfahren unter identischen Randbedingungen untersucht werden. Im Vordergrund stand die Variation geometrischer und verfahrenstechnischer Kennwerte und äußerer Belastungen, wie beispielsweise die Ausbildung von Fehlstellen, die flächige Verunreinigung von Schachtwänden oder die Höhe von Grundwasserständen in Abhängigkeit der zu untersuchenden Sanierungszustände. Bei den Versuchen wurde der in situ übliche Sanierungsablauf mit Abdichtung und daran anschließender Beschichtung entkoppelt, d.h. es wurden zunächst mit Fehlstellen (Undichtigkeiten) präparierte Schächte ohne Vorabdichtung und ohne anstehendes Grundwasser beschichtet und der Wasserstand erst anschließend angehoben. Dieser Wasserdruck wirkte dann direkt auf die aufgetragene Beschichtung. Eine solche Belastung tritt in situ erst auf, wenn die Vorabdichtung des Schachtbau-

werkes versagt oder das Grundwasser über die abgedichteten Bereiche hinaus ansteigt.

Nach der Materialaushärtung der Beschichtungen wurden unter Grundwasserzufluss unterschiedliche Verfahren und Materialien zur Abdichtung der Zu- und Abläufe sowie der noch nicht beschichteten Schachtkörper untersucht. Parallel zu diesen Abdichtungen wurden die beschichteten Schächte optisch inspiziert und deren Zustand dokumentiert. Der maximale Grundwasserstand von 4,7 m über der unteren Rohrsohle wurde über einen Zeitraum von 20 Wochen gehalten. In diesem Zeitraum wurden die Abdichtungen und Beschichtungen in regelmäßigen Abständen kontrolliert, Zustandsveränderungen dokumentiert und ggf. eindringendes Wasser stichprobenhaft gemessen.

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

- *Frühe Maximalbelastung des Bauteils:* Der maximale Grundwasserstand wird innerhalb weniger Tage aufgebracht. In situ ist mit einem Grundwasseranstieg über mehrere Wochen oder Monate zu rechnen.
- *Frühe Beanspruchung des Sanierungsprodukts:* Da im trockenen Zustand ohne Vorabdichtung beschichtet werden konnte, waren die Beschichtungen nach Füllen des Versuchsstandes direkt dem anstehenden Grundwasser ausgesetzt. Der Zeitraum bis zum Ausfall einer Vorabdichtung (vgl. Abschnitt 6.3) bzw. bis zum Anstieg des Grundwassers über die Abdichtungshöhe entfiel somit.
- *Zeitliche Verdichtung der Maximalbeanspruchung:* Der maximale Grundwasserstand wird im Versuchszeitraum über 20 Wochen aufgebracht. In situ ist in der Regel mit wechselnden Grundwasserständen zu rechnen, so dass eine vergleichbare Belastungsdauer und Beanspruchung des Sanierungsprodukts erst über längere Beobachtungszeiträume zu verzeichnen ist.
- *Dauerhafte Belastung / Kriecheffekte:* Insbesondere Kunststoffe zeigen unter dauerhafter Belastung ein bedeutsames Kriechverhalten. Während wechselnde Grundwasserstände in situ zu einer wiederholten Entlastung und Rückführung von Kriecheffekten führen, konnten im Versuch vergleichsweise kontinuierliche Belastungsszenarien mit entsprechenden Kriechbeanspruchungen verwirklicht werden.

Nach Ablauf der Beobachtungszeit wurden das Wasser aus dem Versuchsstand abgelassen und Haftzugprüfungen an den Beschichtungen durchgeführt. Nach dem Freilegen der Schachtbauteile konnten die bei den Abdichtungsmaßnahmen erzeugten Injektionskörper auch von außen inspiziert werden. Ergänzende Untersuchungen zur Umweltverträglichkeit der eingesetzten Injektionsmaterialien rundeten das Bild ab.

Spezielle Fragestellungen

Ergänzend zu den In-situ-Maßnahmen und Großversuchen wurden auch die folgenden speziellen Fragestellungen untersucht (vgl. Kapitel 6.4.1):

- *Wasserzugabe bei mineralischen Beschichtungen:* Auf Baustellen kann man häufig beobachten, dass das Mischungsverhältnis von Mörtel und Wasser nicht immer den Herstellervorgaben entspricht. Daher wurde an Mörtelbeschichtungen die „Robustheit“ der Materialien gegenüber unterschiedlich eingestellten Wasser-Feststoffwerten mittels Haftzugfestigkeitsprüfungen untersucht.
- *Hohlstellen bei mineralischen Beschichtungen:* Weitgehend unerforscht sind die Auswirkungen von Hohlstellen bei mineralischen Beschichtungen in Abwasser-schächten bezüglich Rissbildung und Dichtheit. Daher wurden Untersuchungen an planmäßig eingebauten Hohlstellen unter Wasseraußendruck durchgeführt.
- *Nachbehandlungsmittel bei mineralischen Beschichtungen:* Mit Blick auf die Mörtelhydratation wurden verschiedene Nachbehandlungsmittel und -methoden in einer Klimakammer auf ihre Wirksamkeit hin untersucht.
- *Hohlstellenortung:* Die Ortung von Hohlstellen an Beschichtungen in Abwasser-schächten erfordert derzeit viel Erfahrung und buchstäglich Fingerspitzengefühl. Alternativ wurde im Rahmen des Projektes untersucht, ob Größe und Ausdehnung von Hohlstellen auch mit zerstörungsfreien Prüfungen wie der lokalen Resonanzspektroskopie ermittelt werden können.
- *Betriebsbelastung an sanierten Rohranbindungen:* Sanierte Rohreinbindungen können nachträglichen Verformungen und besonderen Betriebsbelastungen ausgesetzt sein. Geprüft wurden hier die Auswirkungen von Abwinkelungen und Kanalreinigungmaßnahmen auf die Dichtheit der sanierten Rohranbindung.
- *Wirtschaftlichkeitsbetrachtungen:* Im Rahmen von Wirtschaftlichkeitsbetrachtungen wurden die Kosten für Sanierung und Neubau von Abwasserschächten miteinander verglichen.

Verwertung der Projektergebnisse

Um eine praxisnahe Verwertung der Projektergebnisse zu erleichtern, wurden **Planungshinweise und Empfehlungen** zur Schachtsanierung (vgl. Abschnitt 8.1) entwickelt, die auch Musterprotokolle zur Dokumentation des Sanierungsablaufs enthalten. Darüber hinaus wurde ein **Schulungsprogramm** für die an einer Sanierungsmaßnahme beteiligten Anwender und Auftraggeber konzipiert (vgl. Abschnitt 8.2).

4 Stand der Technik

4.1 Überblick

Die Kanalnetzbetreiber in Nordrhein-Westfalen sind insbesondere durch die „Verordnung zur Selbstüberwachung von Kanalisationen im Mischsystem und im Trennsystem“ (Selbstüberwachungsverordnung Kanal – SÜVVKan [3]) verpflichtet, den baulichen und betrieblichen Zustand ihres Kanalnetzes sowie der mit diesem verbundenen Bauwerke der Ortsentwässerung vollständig festzustellen. Werden betriebliche oder bauliche Beeinträchtigungen festgestellt, sind nach dem Runderlass [4] des Ministeriums für Klimaschutz, Umwelt, Landwirtschaft, Natur- und Verbraucherschutz des Landes Nordrhein-Westfalen (MKULNV NRW), entsprechende Betriebs- und Unterhaltungsmaßnahmen zu treffen. Eine Sanierung wird bei Undichtigkeiten am Schachtkörper und bei schadhaftem Allgemeinzustand des Schachtes gefordert.

Nach den Anforderungen der DIN EN 752 [19] muss der Schacht durch Reparatur-, Renovierungs- bzw. Erneuerungsverfahren in einen Zustand versetzt werden, in dem alle Leistungsanforderungen, die an einen neu erstellten Schacht gestellt werden, erfüllt sind.

Die DIN EN 752 [19] definiert den Begriff Reparatur als Maßnahme zur Behebung örtlich begrenzter Schäden. Der Begriff Renovierung beinhaltet alle Maßnahmen zur Verbesserung der aktuellen Funktionsfähigkeit von Schächten unter vollständiger Einbeziehung ihrer ursprünglichen Substanz. Die Erneuerung, das heißt die Herstellung eines neuen Schachtes an der gleichen Position, erfolgt ausschließlich in offener Bauweise [20].

Im Bild 2 ist eine Übersicht über die Verfahrenshauptgruppen zur baulichen Sanierung von Abwasserschächten gegeben.



Bild 2 Übersicht über die Verfahrenshauptgruppen zur baulichen Sanierung von Schächten [18, 19]

Einen wesentlichen Anteil bei Reparaturmaßnahmen an Abwasserschächten nimmt die Ausbesserung von örtlich begrenzten Fehlstellen ein. Zu den dabei einsetzbaren

Reparaturmaßnahmen zählen das Einbringen von Injektionsmitteln unter Druck in Risse und Hohlräume und die Abdichtung von Undichtigkeiten mit schnell erhärtenden Mörteln.

Die aufgezählten Maßnahmen werden häufig im Vorfeld von Renovierungsmaßnahmen durchgeführt. Bei der Renovierung von Abwasserschächten kommen Beschichtungsverfahren zur Wiederherstellung oder Erhöhung des Widerstandsvermögens gegen chemische, biologische, biochemische und physikalische Angriffe zum Einsatz. Dabei wird ein spezielles Beschichtungsmaterial auf die Schachtinnenwand aufgebracht und erhärtet dort zu einer in sich zusammenhängenden Schicht.

Des Weiteren kommen auch Auskleidungen als Renovierungsmaßnahme für Schachtbauwerke infrage. Dabei werden z. B. vorgefertigte, örtlich hergestellte Rohre aus Kunststoff und Polymerbeton oder aber auch Handlamine, bestehend aus Glasfasermatten in Verbindung mit Harz, in den Schacht eingebracht. Diese Auskleidungen sind in der Regel selbsttragend und gehen mit dem Untergrund keinen Verbund ein.

Da im vorliegenden Forschungsprojekt schwerpunktmäßig die Renovierungsmaßnahme „Beschichtung von Abwasserschächten“ mit den vorhergehenden Abdichtungsmaßnahmen untersucht wird, soll im Folgenden auf das Bauwerk Abwasserschacht und diese Verfahren näher eingegangen werden.

4.2 Abwasserschächte

4.2.1 Funktionen und Anforderungen

Nach DIN EN 752 [19] werden Schächte als „Einstieg mit abnehmbarem Deckel auf einer Abwasserleitung oder einem Abwasserkanal“ definiert. Sie dienen zur Be- und Entlüftung, Kontrolle, Wartung und Reinigung, der Zusammenführung sowie Richtungs-, Neigungs- und Querschnittsveränderungen von Kanälen und Leitungen. Die Schachtwandungen müssen eine Infiltration durch eintretendes Grundwasser in den Schacht sowie eine Exfiltration durch austretendes Abwasser in den Boden verhindern. Ein undichter Abwasserschacht kann eine Gefahr für die Umwelt darstellen. Abwasser, welches in den umliegenden Boden gelangt, führt dort und im Grundwasser zu Verschmutzungen. Zudem kann der Abwasservolumenstrom durch eintretendes Grundwasser erhöht werden. Dies hat eine erhöhte hydraulische Belastung von Kanalsystem und Kläranlage mit Überlastungen und höheren Abwasserreinigungskosten zur Folge.

Zudem werden an Schachtbauwerke auch Anforderungen an die Tragfähigkeit und Verkehrssicherheit gestellt. Mögliche Setzungsvorgänge dürfen das Überfahren durch Kraftfahrzeuge nicht beeinträchtigen.

4.2.2 Schachtwerkstoffe und Schachtaufbauten

Zu etwa 98 % bestehen Abwasserschächte aus Beton oder Mauerwerk ([9], vgl. Bild 3). In der Praxis kommt es auch zu Mischformen aus diesen Materialien. Dabei bestehen z. B. das Schachtunterteil aus Mauerwerk und die Schachtringe aus Betonfer-

tigteilen. Mittlerweile werden Schächte auch aus Kunststoff und Steinzeug hergestellt [9].



Bild 3 Ausgeführte Abwasserschächte: Abwasserschacht aus Beton (links), Abwasserschacht aus Mauerwerk (rechts)

Abwasserschächte besitzen in der Regel am Schachtkörper einen Mindestdurchmesser von 1,0 m [21]. Der Schachthals (Konus) verringert diesen Mindestdurchmesser auf einen Einstiegsdurchmesser von 0,625 m. In Bild 4 ist der Querschnitt eines Schachtes aus Beton- und Stahlbetonfertigteilen dargestellt.

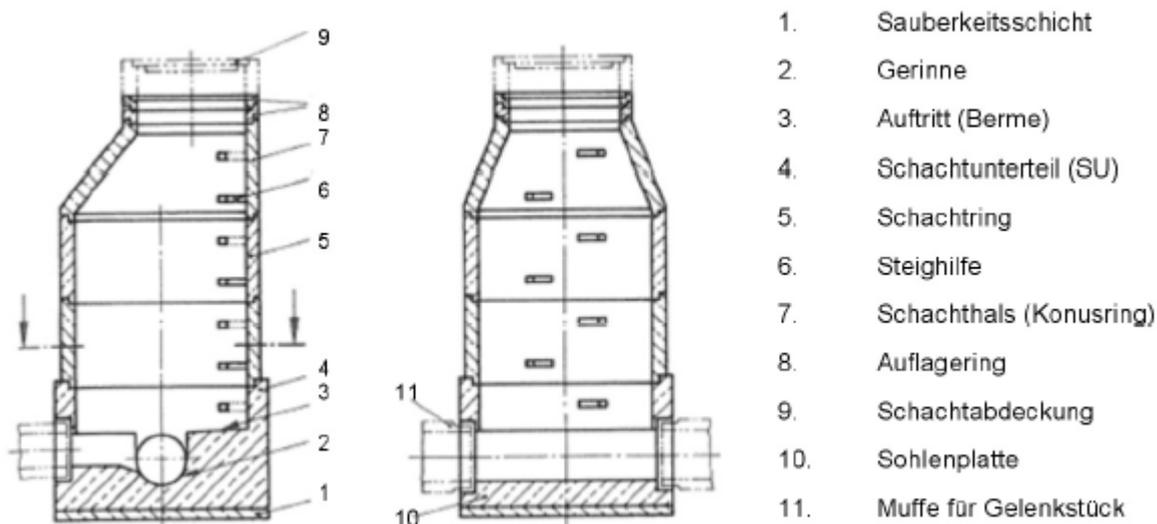


Bild 4 Prinzipskizze eines Schachtes aus Beton- und Stahlbetonfertigteilen [2]

4.2.3 Schadensbilder

Schäden an Abwasserschächten können durch Belastungen bei Neuerstellung sowie während des Betriebs entstehen. Allgemein sind mechanische sowie chemisch-biologische Belastungen wie z.B. die biogene Schwefelsäurekorrosion als Ursachen zu nennen [18]. Weiterhin können Verschmutzungen an Schachtwandungen die Entstehung von Schäden fördern. Mit fortschreitendem Alter der Schächte verschlechtert sich ihr Zustand. In Tabelle 1 sind beispielhaft einige der in der Praxis typischerweise

vorzufindenden Schäden an Schachtbauwerken aufgeführt. Eine umfassende Übersicht enthält [22].

Tabelle 1 Typische Schadensbilder von Abwasserschächten [22]

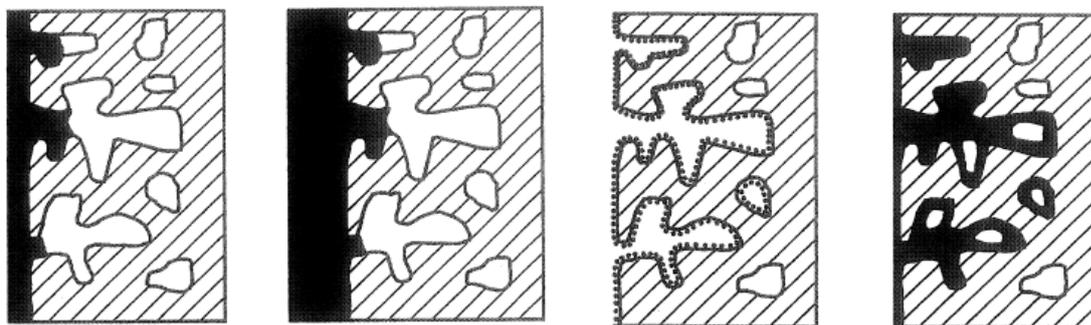


4.3 Beschichtungssysteme für den Einsatz in Abwasseranlagen

4.3.1 Grundlagen

Im Wesentlichen dienen Beschichtungen zur Wiederherstellung der Dichtheit und dem Substanzerhalt von Abwasserschächten. Definiert werden Beschichtungen als eine oder mehrere in sich zusammenhängende, aus mineralischen oder polymeren Beschichtungsstoffen hergestellte Schichten auf einem Untergrund [2]. Je nach Schichtdicke unterscheidet man (vgl. Bild 5):

- A: Dünnbeschichtungen (filmbildende Beschichtung mit Grundierung)
- B: Dickbeschichtungen (Mörtelbeschichtung mit Haftbrücke als Grundierung)
- C: Hydrophobierung (Imprägnierung; meist nur ergänzend zu Beschichtungen)
- D: Versiegelung (Tränkung; meist nur ergänzend zu Beschichtungen)



A: Dünnbeschichtung B: Dickbeschichtung C: Hydrophobierung D: Versiegelung

Bild 5 Definition der Beschichtungsarten (nach [23])

Dünnbeschichtungen können je nach geforderten Schutzmaßnahmen aus mehreren einzelnen Schutzschichten mit einer maximalen Gesamtdicke von bis zu 5 mm bestehen. Sie werden mit Merkmalen wie Verschleißwiderstand, Rissüberbrückungsfähigkeit, chemische Widerstandsfähigkeit, Diffusionsfähigkeit und Diffusionsdichtigkeit grob definiert.

Dickbeschichtungen bestehen aus Mörtel mit mindestens einer Schicht bei einer kleinsten Schichtdicke von 5 mm. Für reaktionsharzgebundene Mörtel wird eine Mindestdicke von 5 mm, für kunststoffmodifizierte Mörtel eine Mindestdicke von 10 mm und für zementgebundene Mörtel eine Mindestdicke von 20 mm gefordert [2]. Die erforderliche Schichtdicke ergibt sich aus der verfolgten Zielstellung und den Schadensarten.

Die derzeit auf dem Markt verfügbaren Beschichtungssysteme und Materialien zeigen in Laborversuchen und bei der Feststellung ihrer Materialeigenschaften ihre grundsätzliche Eignung, um o. g. Sanierungsziele zu erreichen. In [18] konnte allerdings gezeigt werden, dass die Qualität der Beschichtungen, sowohl auf mineralischer wie polymerer Basis, stark von der Vorbereitung des zu beschichtenden Untergrundes und der Ausführung seitens der Verarbeiter vor Ort abhängt.

Als selbstständige Maßnahmen sind **Hydrophobierung** und die typische **Versiegelung** im Bereich der Abwasserschachtsanierung umstritten und werden meist nur als ergänzende Maßnahmen zu den anderen Beschichtungsarten eingesetzt [2].

Mit einer **Versiegelung** vergleichbare Verfahren bilden zum einen die Verkieselung (vgl. Bild 6, links) und zum anderen das Aufbringen eines Kristallbildners (vgl. Bild 6, rechts). Bei einer Verkieselung [24] wird durch das Einbringen von Wasserglas in die Untergrundporen eine künstliche Versteinerung durch die Reaktion mit dem Porenwasser erzeugt. Beim Aufbringen eines Kristallbildners [2] wird in Verbindung mit dem vorhandenen Porenwasser im Untergrund ein Verschluss der Kapillarporen infolge von Kristallbildung erzielt. Bei diesen Verfahren wird durch die beschriebene Erhöhung des Kapillarwiderstandes eine Verdichtung und Verfestigung des Untergrundes bewirkt.

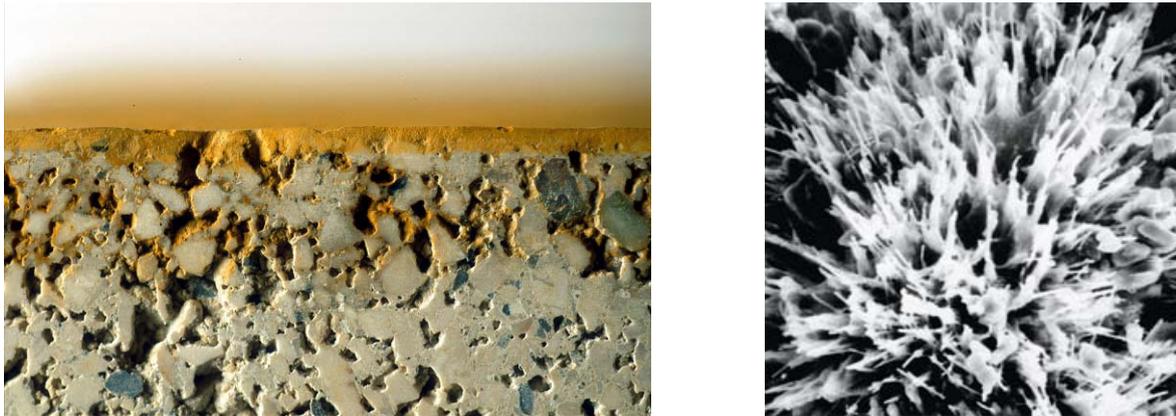


Bild 6 Verrieselte Betonoberfläche, sichtbar durch eingefärbte Silikate [25] (links); Kristalle in Betonporen nach dem Aufbringen eines Kristallbildners [26] (rechts); Beispiele

4.3.2 Mörtelbeschichtungen

4.3.2.1 Beanspruchungen

An unterschiedliche Mörtel werden je nach Einzelfall besondere Anforderungen gestellt. Dabei werden grundsätzlich zwei Beanspruchungsarten unterschieden [18]:

Beanspruchung der Mörtelbeschichtung selbst durch physikalischen, chemischen, biologischen oder biochemischen Angriff und

Beanspruchung des Verbundsystems aus Mörtelbeschichtung und Untergrund in der Regel durch Eigenspannungen, z. B. infolge von Schwinden.

Diese Beanspruchungen treten in der Praxis in zeitlich veränderten Überlagerungen auf. Die Haftzone zum Untergrund wird durch Scherspannungen und Abreißzugspannungen (Schälspannungen) beansprucht, wobei die folgenden Einwirkungen dominieren (Bild 7):

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

Dabei kann ein Adhäsionsversagen durch

- chemischen Angriff (biogene Schwefelsäure) und
- Feuchtigkeitszutritt aus dem Untergrund (Außenwasserdruck)

herbeigeführt werden [18].

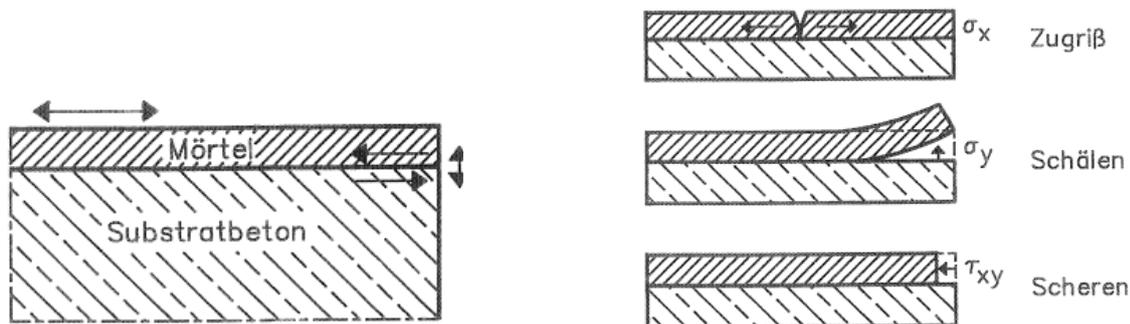


Bild 7 Versagensarten von Mörtelbeschichtungen auf einem Betonuntergrund infolge von Eigenspannungen aus Temperaturänderung und Schwinden [27]

Zusätzlich zu den bei ebenen Flächen üblichen Schubspannungen in der Verbundfuge treten bei gekrümmten Flächen Radialspannungen auf (Bild 8). Diese bewirken eine weitere Beanspruchung für den Verbund zwischen Beschichtung und Untergrund und führen im Falle eines nicht ausreichenden Verbundes zu einem Abheben der Beschichtung vom Untergrund mit der Bildung eines Ringspaltes. Um diese Spannungen rissfrei aufnehmen zu können, ist es erforderlich, dass die Beschichtung selbsttragend ist und eine ausreichende Festigkeit besitzt.

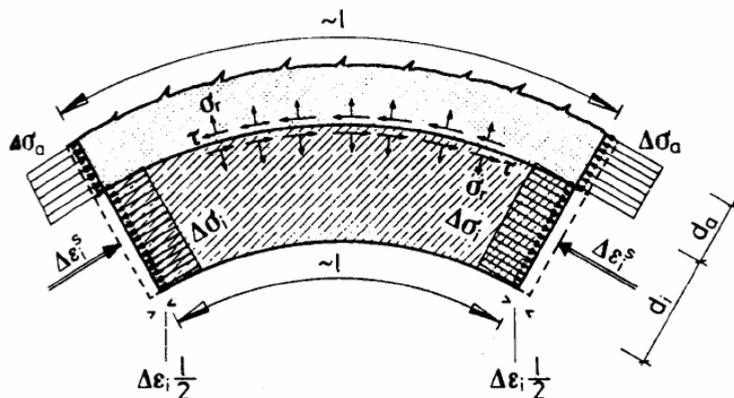


Bild 8 Spannungen in der Verbundfuge infolge des Schwindens der Beschichtung ([28])

Aufgrund der genannten Beanspruchungen besteht, sofern kein Versagen der Verbundfuge auftritt, insbesondere bei Mörtelbeschichtungen die Gefahr der Rissbildung.

4.3.2.2 Beschichtungsmaterialien

Mörtel setzen sich aus einem oder mehreren Bindemitteln, mineralischen oder organischen Zuschlagsstoffen, Zusätzen und gegebenenfalls Wasser zusammen.

Zementmörtel bestehen in der Regel aus dem hydraulischen Bindemittel Zement, mineralischen Zuschlägen und Wasser. Durch das Erstarren des Zementes härtet der Frisch- zum Festmörtel aus. Diese Reaktion zwischen Zementkorn und Anmach-

wasser wird als Hydratation bezeichnet. Während der Hydratation wird Zementleim zu Zementstein umgewandelt. Dabei entstehen verschiedene wasserhaltige Verbindungen des Zementes. Diese wechselnden Zustände werden als Hydratphasen bezeichnet. Die Dauer der Hydratation wird durch verschiedene Faktoren, wie z. B. der Umgebungstemperatur oder der Luftfeuchtigkeit, beeinflusst und kann einige Tage, bis mehrere Wochen betragen [13]. Derartige Mörtel weisen in der Regel eine geringe Zugfestigkeit, eine geringe Beständigkeit gegen chemischen und biochemischen Angriff sowie eine starke Rissneigung auf. Daher kommen sie ohne Aufwertung durch Kunststoffe oder Silikate im Bereich der Schachtsanierung bis auf wenige Ausnahmen [2] kaum zum Einsatz.

Kunststoffmodifizierte Zementmörtel bestehen aus Kunststoffzusätzen und reinem Zementmörtel. Durch die Zugabe von Kunststoffzusätzen wird eine gezielte Verbesserung der Haftzugfestigkeit, Biegezugfestigkeit, Beständigkeit gegenüber chemischen Angriffen und des Diffusionswiderstandes erreicht. Diese Mörtel bestehen zu maximal 30 Massen-% des Zementes aus Polymeren. Technisch anzustrebende Harzgehalte liegen nach [2] bei etwa 10 Massen-%, allenfalls bei 15 Massen-%. Als Kunststoffzusätze kommen hauptsächlich Epoxidharze, aber auch andere wasserverträgliche Reaktionsharze zum Einsatz, die gleichzeitig mit dem Zement erhärten. Durch die Zugabe dieser Harzzusätze entstehen Zwei-Bindemittel-Systeme (Kunststoff und Mörtel) wobei das Kunststoffsystem zwischen der Zementsteinmatrix des Mörtels gelagert ist [2].

Eine Besonderheit in der polymermodifizierten Mörtelgruppe stellt der epoxidharzmodifizierte Mörtel dar. Parallel zur Zementerhärtung findet hier die Polyaddition zum filmbildenden Festharz statt [2].

Silikatmörtel sind zweikomponentige, rein mineralische Baustoffe. Dabei bildet die Flüssigkomponente eine modifizierte, hoch alkalische Silikatlösung und die Pulverkomponente besteht aus künstlichen und natürlichen latenthydraulischen Stoffen, kristallinen Zuschlägen und anderen Begleit- und Hilfsstoffen. Entgegen zementgebundenen Beschichtungen bildet sich bei Silikatmörteln ein amorphes Silikatgel in der erhärteten Matrix des Bindemittels. Diese auch als Hydrogele bezeichneten Alkali-Silikate (Wasserglas) besitzen eine erhöhte chemische Beständigkeit gegenüber Säuren, Laugen, organischen Lösemitteln und betonschädigenden Salzen. Silikatmörtelbeschichtungen sind flüssigkeitsdicht aber dampfdiffusionsoffen [2].

4.3.2.3 Verfahrenstechnik für Mörtelbeschichtungen

Eine Renovierung von Abwasserschächten mit Mörtelbeschichtungen umfasst im Wesentlichen mehrere verfahrenstechnische Schritte [18]:

- Untergrundvorbehandlung,
- Beschichtung und
- Nachbehandlung.

Untergrundvorbehandlung

Um einen festen und dauerhaften Verbund zwischen Beschichtung und Betonoberfläche herstellen zu können, muss der Betonrandbereich ausreichend fest und tragfähig sein. Er muss frei von trennend wirkenden Stoffen sein [13].

Eine möglichst große, wirksame Untergrundoberfläche lässt sich durch ein Anrauen der Schachtwand herstellen (Bild 9).



Bild 9 Untergrund mit einer großen spezifischen Oberfläche

Poren und Vertiefungen führen zu einer großen spezifischen Oberfläche, welche durch die Beschichtung ausreichend benetzt werden kann. Trennend wirkende Verunreinigungen wie z. B. Öle, Fette und Schmutzanhaftungen müssen daher entfernt werden [29]. Für die Oberflächenvorbereitung bietet sich der Einsatz des Wasserstrahlens an, das gemäß [13] in drei Verfahren bzw. Druckbereiche eingeteilt werden kann. Bei dem Druckwasserstrahlen werden Drücke von bis zu 200 bar erzeugt, bei dem Hochdruckwasserstrahlen liegt der Druck in einem Bereich von 200 bis 1000 bar. Das Hochdruckwasserstrahlen wird bei Drücken über 1000 bar ausgeführt.

Im Rahmen der Sanierungsbegleitungen in [18] wurde beobachtet, dass die dort zu sanierenden Abwasserschächte mittels Hochdruckwasserstrahlen bei Drücken von überwiegend etwa 300 bar gereinigt worden sind. Je nach Beschaffenheit und Festigkeit des Untergrundes konnten dabei die geforderten Untergrundrauhigkeiten mit gleichzeitiger Reinigungswirkung erzielt werden. Durch die Zugabe abrasiver Stoffe, z.B. Quarzsande oder Schlacken, lässt sich die Wirkung wesentlich erhöhen [13].

Undichtigkeiten im Abwasserschacht sind vor dem Beschichten mit geeigneten Materialien abzudichten. Im Allgemeinen sollte der Untergrund vor dem Aufbringen einer Beschichtung mit hydraulischem Bindemittel mattfeucht vorgehästet werden. Auf diese Weise kann verhindert werden, dass der Untergrund der Beschichtung während des Erhärtens die zur Hydratation, also dem Erstarren, notwendige Feuchtigkeit entzieht. Sofern in einem Schacht aus Stahlbeton die Stahlbewehrung frei liegt, ist diese durch geeignete Maßnahmen und Materialauftrag vor Korrosion zu schützen.

Beschichtung

Grundsätzlich sind vor dem Beginn der Beschichtung die örtlich gegebenen Witterungsbedingungen zu erfassen und mit den Vorgaben der Instandsetzungs-Richtlinie des DAfStb [10] zu vergleichen (vgl. Tabelle 2). Diese Vorgaben sind zu berücksichtigen, sofern keine anderen Herstellerangaben vorliegen.

Tabelle 2 Witterungsbedingungen, Anforderungen nach [10] für zementgebundene Stoffe

Exposition	zementgebundene Stoffe, auch mit Kunststoffzusätzen
relative Luftfeuchte	keine Forderungen
Niederschlag	kein Regen
Wind	Windstärke ≤ 3 Beaufort*, entsprechend \leq ca. 5 m/s
Sonne	Austrocknung durch Sonneneinstrahlung muss vermieden werden

* Blätter und dünne Zweige bewegen sich

Für das Aufbringen einer Mörtelbeschichtung auf die Wandung eines Abwasser-schachtes können verschiedene Verfahrenstechniken zum Einsatz kommen.

Der **Materialauftrag von Hand** kann nach Angaben von Verfahrensanbietern bis zu einer Schachttiefe von etwa 3,5 m wirtschaftlich ausgeführt werden [18]. Dabei wird das Beschichtungsmaterial mit einer Kelle aufgetragen und geglättet. Somit entsteht immer eine relativ glatte Oberfläche (Bild 10).

Bei nahezu allen Mörtelbeschichtungssystemen ist eine Haftbrücke, die vor der Beschichtung aufgetragen wird, erforderlich. Diese dient als Haftvermittler zum Untergrund und besteht in der Regel aus einer mineralischen, zementgebundenen Schlämme. Um einen guten Verbund zwischen Beschichtung und Untergrund zu gewährleisten, darf die Haftbrücke beim Auftrag der Mörtelbeschichtung noch nicht ausgereagert sein. Das Beschichtungsmaterial muss „frisch in frisch“ mit der Haftbrücke verarbeitet werden. Dieser Arbeitsschritt entfällt bei einem maschinellen Auftrag der Beschichtung.



Bild 10 Mörtelbeschichtung: Auftrag von Hand (links), beschichteter Schacht (rechts)

Der **maschinelle Auftrag** kann durch das Anschleuderverfahren erfolgen. Dabei wird das Beschichtungsmaterial durch einen rotierenden Schleuderkopf gegen die Schachtinnenwand geworfen (Bild 11). Da im Abwasserbereich bei diesem Verfahren auf eine Glättung der Oberfläche verzichtet wird, weist die aufgebrachte Beschichtung eine einer Apfelsinhaut ähnliche Oberfläche auf [2]. Dieses Verfahren eignet sich nur für die Schachtwände. Im Bereich der Schachtsohle (Berme) muss die Beschichtung von Hand ausgeführt werden. Um mögliche größere Unebenheiten in der Oberfläche auszugleichen, wird gegebenenfalls vor der Beschichtung noch eine Reprofilierungsschicht auf die Oberfläche aufgetragen.



Bild 11 Mörtelbeschichtung: Anschleuderverfahren (links), beschichteter Schacht (rechts)

Eine weitere Möglichkeit zur Applikation einer Mörtelbeschichtung auf Schachtinnenwandungen bietet das Anspritzverfahren. Hier kommt i.d.R. das sogenannte Nassspritzverfahren zum Einsatz.

Nachbehandlung

Bei der Aushärtung von hydraulisch abbindendem Beschichtungsmörtel sollte einem Wasserverlust der instandgesetzten Oberfläche durch eine geeignete Nachbehandlung begegnet werden. Wird gänzlich auf eine Nachbehandlung der Beschichtung verzichtet, besteht die Gefahr des Werkstoffschwindens in Form von Rissbildung und

des Verlustes der Werkstofffestigkeit. Man unterscheidet zwischen wasserrückhaltenden Maßnahmen, wobei die Beschichtung mit einer Folie zum Schutz vor Verdunstung des Anmachwassers abgedeckt wird und wasserzuführenden Nachbehandlungsmaßnahmen, wobei die Beschichtung mit Wasser befeuchtet wird. Darüber hinaus besteht auch die Möglichkeit, Nachbehandlungsfilme, z.B. auf Wachsbasis, zeitnah auf die noch frische Beschichtung aufzutragen und somit einer möglichen Wasserverdunstung entgegenzuwirken [29].

4.3.2.4 Sanierungsqualität

Grundsätzlich sind Mörtelbeschichtungen zur Abwasserschachtsanierung geeignet [18]. Jedoch traten in der Vergangenheit immer wieder Schäden an Beschichtungen auf. Bei Untersuchungen im Rahmen des Forschungsvorhabens [18] wurden an 16 von 26 mit Mörtelbeschichtungen sanierten Schachtbauwerken Mängel wie Risse, Hohlstellen, Fehlstellen oder Undichtigkeiten in der Beschichtung dokumentiert. Weitere Untersuchungen im Rahmen verschiedener Prüfaufträge [48] bestätigen das Ergebnis aus [18]. Mehr als 50 % dieser Sanierungen mit Mörtelbeschichtungsmaterialien waren mäßig bis stark mit derartigen Mängeln - Hohlstellen und Rissen - behaftet (vgl. Bild 12).



Bild 12 Beispiele für Rissbilder an Hohlstellen einer Mörtelbeschichtung aus [48]

4.3.3 Polymere Beschichtungen

4.3.3.1 Beanspruchungen

Je nach Konstruktion können folgende Beanspruchungsarten an organischen Beschichtungen wirken (aus [30], zitiert in [18]):

- **Diffusionsvorgänge von Wasser** mit verhältnismäßig geringen Drücken auf gering durchlässige oder dichte Beschichtungen.
- **Diffusionsvorgänge von Schwefelwasserstoff** mit Zerstörung der Beschichtung oder des Beschichtungsträgers durch Korrosion.
- **Kapillardruck durch kapillaren Wassertransport** in den Porenräumen des beschichteten Betons und Mauerwerkssubstrat.

Diese Beanspruchungen können zu einem Adhäsionsversagen und somit zur Blasenbildung zwischen Untergrund und Beschichtung führen.

Flüssigkeitsgefüllte Blasen bilden sich einige Wochen bis Monate nach dem Aufbringen der Beschichtung. Bisher wurden bei einem solchen Schadensbild auch osmotische Vorgänge als Begründung aufgeführt. In [31] wurde anhand von Laborversuchen jedoch gezeigt, dass osmotische Transportprozesse als Ursache für eine Blasenbildung bei Reaktionsharzbeschichtungen auf Beton vernachlässigt werden können. Es zeigte sich, dass die im Betongefüge allein durch Temperatur- und Feuchteänderung entstehenden Drücke zu einem lokalen Adhäsionsversagen führen können. Als wesentliche Ursache dieser Drücke werden in [31] u. a. die Kapillardrücke angenommen. In Abhängigkeit vom Porendurchmesser in den Poren des Betons (Zementsteins) können die Kapillardrücke variieren. So kann ein Kapillardruck in der bekannten Größenordnung¹ von $0,3 \text{ N/mm}^2$ im Bereich einer 10 mm großen Fehlstelle bereits zu einer Spannung zwischen Beton und Beschichtung von etwa 3 N/mm^2 führen. Die üblicherweise mindestens vorhandene Haftzugfestigkeit zwischen Beton und einer befahrbaren Beschichtung von $1,5 \text{ N/mm}^2$ wäre mit diesem Wert bereits um 100% überschritten [31]. Die auftretende Spannung bei einem blasenartigen Versagen des Verbundes ist nicht wie bei Haftzugprüfungen eine einaxiale Zugspannung, sondern wird als Schälspannung bezeichnet (vgl. Bild 13).

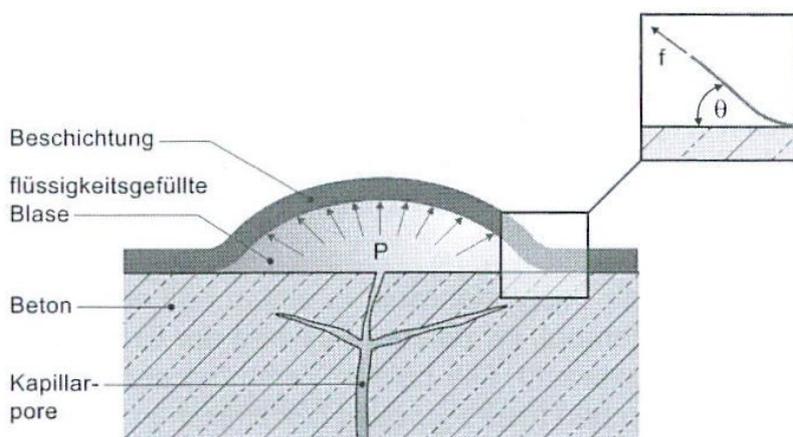


Bild 13 Schematische Darstellung der Schälspannung am Rand einer Blase in einer Beschichtung auf Beton [31]

Ein weiteres Schadensbild kann direkt bei der Applikation auftreten. Durch verarbeitungsbedingte Luft einschüsse im Beschichtungsmaterial oder aus dem Untergrund entweichende Luft können sich kleine Blasen auf der Beschichtungs Oberfläche bilden, sogenannte „Pinholes“ (vgl. Bild 14).

¹ in [31] als „bekannt“ beschrieben und belegt

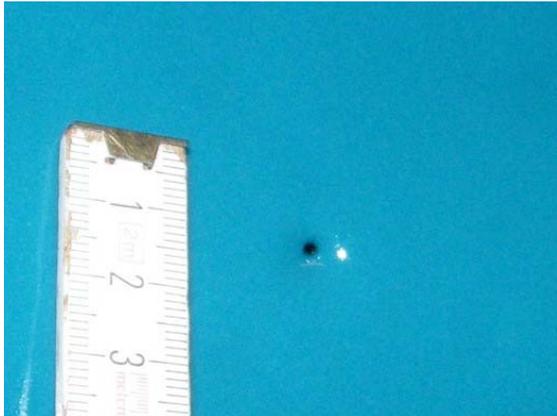


Bild 14 Beispiel für ein „Pinhole“ in einer Beschichtung

4.3.3.2 Beschichtungsmaterialien

Als **ungesättigte Polyesterharze (UP)** bezeichnet man eine Lösung ungesättigter Polyester in flüssigen Monomeren. Die Härtingsreaktion nennt man Polymerisation, welche zum Auslösen einen Katalysator benötigt. Der Reaktionsvorgang ist temperaturabhängig und findet entweder durch Wärmezufuhr von mehr als 80°C oder bei der Kaltherhärtung unter Zugabe eines Beschleunigers im Bereich von 15 – 30 °C statt. Aufgrund der geringen Alkalibeständigkeit wird eine Epoxidharzgrundierung vor dem Beschichten eines Betonuntergrundes aufgebracht. Beim Beschichten ist darauf zu achten, dass der Untergrund vollständig trocken ist [2].

Epoxidharze (EP) werden durch Polyaddition hergestellt und sind Flüssigkunststoffe. Sie bestehen aus dem Harz (z.B. Bisphenol A, Bisphenol F oder einem Gemisch daraus) und einem Härter (Amine). Um eine vollständige Reaktion sicher zu stellen, sind eine genaue Dosierung und eine ausreichende Vermischung zwingend erforderlich. Wie bei den Polyesterharzen ist die Reaktion temperaturabhängig und kommt bei den Epoxidharzen ab 5°C bis 0°C fast vollständig zum Stillstand. Findet eine Wiedererwärmung statt, wird die Reaktion fortgeführt. Die minimale Aushärtetemperatur beträgt etwa 10°C. Je nach Typ und Einsatz des Härters lässt sich Einfluss auf Viskosität, Reaktivität (langsam und schnell), Wasserverträglichkeit und chemische Beständigkeit nehmen. Epoxidharzbeschichtungen zeichnen sich durch eine hohe Festigkeit und gutes Haftungsvermögen aus. Sie besitzen eine hohe Alkalibeständigkeit und sind widerstandsfähig gegen mechanische Einwirkungen. Beim Auftragen der Beschichtung sollte der Untergrund trocken sein [2, 32].

Polyurethanharze (PUR) definieren das Spektrum von elastischen bis harten Kunststoffen und werden wie Epoxidharze durch Polyaddition hergestellt. Hierbei reagieren Isocyanate mit jeglicher Art von Wasserstoff (meist Polyole). Je nach PUR-System kann ein Vernetzungsmittel notwendig sein. Bei dem Einsatz von Polyurethan als Reaktionsharz werden die Ausgangsstoffe in z.B. Polyole und Isocyanate eingeteilt. Es besteht ebenfalls die Möglichkeit, die Isocyanate mit Wasser reagieren zu lassen. Dabei wird bei der Reaktion entstehendes Kohlendioxid als Treibgas verwendet und bewirkt ein Aufschäumen des Polyurethans. Das System wird dann als einkomponentig bezeichnet [2, 32].

Ein weiteres Reaktionsharzprodukt stellen die **Polyharnstoffe** dar. Bei diesem Vorgang werden Isocyanate durch die Zugabe von Aminen gehärtet. Dabei entstehen nicht schäumende, einkomponentige Beschichtungsmaterialien [2, 32].

Polymer-Silikat-Harze werden auch als Organomineralharze bezeichnet. Dabei reagiert Natriumwasserglas zu einem Silikat und das vorhandene Polyisocyanat zu einem festen Polyisocyanurat-Polyharnstoff. Zusammen bilden die Komponenten ein zäh-elastisches Silikatharz. Sind die beiden Komponenten einmal hinreichend vermischt, nimmt die entstandene viskose Emulsion kein weiteres Wasser mehr auf und mischt sich auch nicht mit Wasser. Dadurch wird ein Aufschäumen bei Kontakt mit Wasser verhindert [33, 34].

4.3.3.3 Verfahrenstechnik für polymere Beschichtungen

Auch eine Renovierung von Abwasserschächten mit polymeren Beschichtungen umfasst im Wesentlichen zwei verfahrenstechnische Schritte [2]:

- Untergrundvorbehandlung
- Beschichtung, einschließlich Grundierung

Untergrundvorbehandlung

Bei polymeren Beschichtungen ist eine Untergrundvorbereitung wie bei mineralischen Beschichtungen notwendig. Jedoch sind polymere Beschichtungsmaterialien empfindlicher gegenüber trennend wirkenden Rückständen auf der Untergrundoberfläche und es ist besonderes Augenmerk auf die Gründlichkeit der Vorbehandlung zu legen. Der Untergrund sollte vor dem Aufbringen der polymeren Beschichtung vollständig trocken sein. Das verhindert, dass die Feuchtigkeit des Untergrundes mit dem polymeren Beschichtungsmaterial während des Aufbringens reagiert und dieses den Verbund zum Untergrund verliert. Bei einigen polymeren Beschichtungen kann es systembedingt erforderlich sein, einen so genannten „Primer“ (Grundierungen aus dem Beschichtungssystem ähnlichen Harzen) vor der Beschichtung aufzutragen. Dieser dient als Haftvermittler zwischen dem Untergrund und dem Beschichtungssystem.

Beschichtung

Grundsätzlich sind vor dem Beginn der Beschichtung die örtlich gegebenen Witterungsbedingungen zu erfassen und mit den Vorgaben der Instandsetzungs-Richtlinie des DAfStb [10] zu vergleichen (vgl. Tabelle 3). Diese Vorgaben sind zu berücksichtigen, sofern keine anderen Herstellerangaben vorliegen.

Tabelle 3 Witterungsbedingungen, Anforderungen nach [10] für kunststoffgebundene Stoffe

Exposition	kunststoffgebundene Stoffe
relative Luftfeuchte	Bauteiltemperatur muss mindestens 3 K über dem Taupunkt* liegen
Niederschlag	kein Regen oder Nebelnässe
Wind	Staub muss ferngehalten werden
Sonne	keine Anforderungen

* Taupunkt: Als Taupunkt bezeichnet man die Temperatur, bei der die Luft eine 100 %ige Wasserdampfsättigung erreicht hat und sich Kondenswasser auf der kälteren Schachtwand bildet.

Reaktionsharz mortel können ähnlich wie mineralische Beschichtungsmortel verarbeitet werden. Filmbildende polymere Beschichtungen werden mit Sprüh- bzw. Sprüh-Schleuder- oder Anspritzverfahren auf die Schachtwand aufgetragen.

Das so genannte **Sprüh-Schleuderverfahren** gleicht dem Anschleuderverfahren bei mineralischen Beschichtungen. Das flüssige Material wird auf einen rotierenden Teller gesprüht und von diesem an die Schachtwand geschleudert (Bild 15). Auch bei diesem Verfahren muss die Beschichtung im Bereich der Schachtsohle (Berme) von Hand ausgeführt werden.



Bild 15 Anschleudern einer polymeren Beschichtung (links), Nacharbeiten einzelner Stellen mit einem Pinsel (rechts)

Beim **Anspritzverfahren** wird das Beschichtungsmaterial unter Druck auf die Schachtwand gespritzt oder beim **Sprühverfahren** mit einer feineren Düse verteilt. In Bild 16 sind unterschiedliche Mischköpfe und Spritzdüsen für diese Verfahren zu erkennen. Es können Schichtdicken von etwa 0,5 mm in einem Arbeitsgang erreicht werden, ohne ein Verlaufen des Materials zu bewirken [18].



Bild 16 Applikation von polymeren Beschichtungen mittels Sprühverfahren (links) und Anspritzverfahren (rechts)

Eine Nachbehandlung ist bei polymeren Beschichtungen meist nicht vorgesehen. Nach dem Aufbringen des Materials sind vor dem Kontakt mit Wasser die Aushärtzeiten zu beachten. So wird eine unerwünschte Reaktion des Materials verhindert.

4.3.3.4 Sanierungsqualität

Polymere Beschichtungen sind grundsätzlich zur Sanierung von Abwasserschächten geeignet. Jedoch konnten in der Vergangenheit auch Schäden in der Beschichtung festgestellt werden. Bei mehreren Untersuchungen im Forschungsvorhaben [18] wurden an 8 von 26 mit polymeren Beschichtungsmaterialien sanierten Schachtbauwerken Mängel wie Hohlstellen, Fehlstellen oder Undichtigkeiten (vgl. Bild 17, links) in der Beschichtung dokumentiert. Ein weiteres Schadensbild ist die Blasenbildung (vgl. Bild 17, rechts) in der Beschichtung.



Bild 17 Mängel an polymeren Beschichtungen: Undichtigkeit (links) in einem Schacht aus [18] und Blasenbildung durch Ablösung der Beschichtung vom Untergrund (rechts)

4.3.4 Verbundfestigkeit

Grundlage für die Prüfung der Qualität einer Beschichtung ist die Ermittlung der **Haftzugfestigkeit**. Diese gibt Auskunft über die Verbundfestigkeit von einer Beschichtung auf ihrem Untergrund. Sie ist in Anlehnung an die Instandsetzungs-

Richtlinie des DAfStb [10] als die auf eine Prüffläche rechtwinklig wirkende Zugkraft, die benötigt wird, um eine Beschichtung vom Untergrund zu trennen, definiert. Bei der Haftzugfestigkeitsprüfung wird die aufzubringende Kraft je Prüffläche in Newton pro Quadratmillimeter [N/mm²] gemessen. Wesentliche Arbeitsschritte sind exemplarisch in Tabelle 4 dargestellt.

Tabelle 4 Arbeitsschritte einer Haftzugprüfung

<p>1.</p>	<p>Begrenzen der Prüffläche durch Herstellen eines Zylinderstumpfes mit Hilfe eines Kernbohrgerätes. Die Bohrung durchtrennt die Beschichtung und dringt 10 mm in die Randzone des Untergrundes ein. Der Durchmesser der Prüfstelle beträgt 50 mm.</p>		
<p>2.</p>	<p>Aufkleben eines kreisförmigen Prüfstempels (d = 50 mm) auf die Prüffläche. Zuvor ist die Prüffläche zu reinigen. Die Klebefuge sollte möglichst dünn sein und der an den Seiten ausgetretene Klebstoff aus der Ringnut entfernt werden.</p>		
<p>3.</p>	<p>Nach Aushärten des Klebers wird der Prüfstempel abgezogen. Der Elektromotor des Messgerätes steigert die Zugkraft konstant bis zum Bruch. Beim Versagen des Verbundes zeigt das Messgerät die aufgebrachte Spannung in N/mm² an. Dieser Wert und die Bruchform sind zu dokumentieren.</p>		

Mit Hilfe der Haftzugfestigkeitsmessung kann die Stärke des Verbundes zwischen Beschichtungsmaterial und Schachtwand ermittelt werden.

Die jeweiligen Bruchbilder nach erfolgter Prüfung sind nach Augenschein zu beurteilen. Der Prüfstempel kann sich bei der Prüfung eines beschichteten Schachtes in der Beschichtung, zwischen der Beschichtung und dem Untergrund oder im Untergrund lösen. Falls der Prüfstempel in der Klebefuge abreißt, kann die Verbundfestigkeit lediglich abgeschätzt werden. Ein Abreißen zwischen Beschichtung und Untergrund oder in der Klebefuge ist ein Adhäsionsbruch. Es liegt ein Kohäsionsbruch vor, wenn die Haftung in der Beschichtung oder im Untergrund versagt.

Damit bei Beschichtungsarbeiten ein ausreichender Verbund des Beschichtungsmaterials zum Untergrund garantiert werden kann, sind in der Instandsetzungs-Richtlinie des DAfStb [10], den GSTT-Informationen Nr. 18 [35] und dem Merkblatt der DWA M 143-17 [29] Anforderungen u. a. an die Haftzugfestigkeit festgelegt. Tabelle 5 zeigt die Anforderungen für Beschichtungen auf einem Beton- und Mauerwerkuntergrund.

Tabelle 5 Anforderungen an Haftzugfestigkeiten von Beschichtungen

Untergrund	Mittelwert	Kleinster Einzelwert
[-]	[N/mm ²]	[N/mm ²]
Beton [10]	≥ 1,5	≥ 1,0
Mörtelbeschichtung (15 bis 40 mm Dicke) bei Schächten bis 1,5 m Durchmesser und Vollauskleidung [29, 35]	> 0,5 ¹	keine Angabe
Mörtelbeschichtung (< 15 mm Dicke) auf <u>Mauerwerk</u> bei Schächten bis 1,5 m Durchmesser und Vollauskleidung [29, 35]	> 0,5 ¹	≥ 0,3
Mörtelbeschichtung (< 15 mm Dicke) auf <u>Beton</u> bei Schächten bis 1,5 m Durchmesser und Vollauskleidung [29, 35]	> 1,0 ¹	keine Angabe

¹ Mittelwert aus mindestens 3 Einzelwerten gemäß [29]

4.4 Abdichtungssysteme für Schachtkörper und Rohranbindung

4.4.1 Grundlagen

Abdichtungsverfahren werden im Bereich der Abwasserschachtsanierung als Reparaturverfahren bezeichnet. Sie dienen als Maßnahme zur Behebung örtlich begrenzter Schäden. Dabei werden lokale Undichtigkeiten und Fehlstellen mit so genannten Flächen- oder Stopfmörteln verschlossen. Außerdem kommen Injektionsmittel zum Schließen von Rissen und Hohlstellen sowie zur flächigen Abdichtung des Bauwerks gegen Feuchtigkeit zum Einsatz. Die Verfahren werden in den meisten Fällen für eine Vorabdichtung eingesetzt und dienen zur Schaffung eines beschichtungs- und auskleidungsfähigen Untergrundes.

Abdichtungsmaterialien, wie z. B. Blitz- oder Stopfmörtel, werden für das Abdichten von punktuellen oder flächigen Wassereintrüben eingesetzt. Um eine schnelle Wirkung zu erzielen, ist es notwendig, dass diese Materialien in Sekundenschnelle reagieren. In der Regel müssen sie widerstandsfähig gegen dynamische Beanspruchung und chemischen Angriff (biogene Schwefelsäure) sein. Sie sollten schrumpffrei sein und einen hohen Verbund zum Untergrund eingehen können.

Nach [36] werden an Injektionen folgende Anforderungen gestellt:

- Rückstände des eingebrachten Injektionsmaterials dürfen die hydraulische Leistungsfähigkeit des sanierten Bauteils bzw. Bauwerks nicht beeinträchtigen;
- es muss resistent gegen physikalische, chemische, biochemische und biologische Angriffe sein;
- es muss widerstandsfähig gegen einen mechanischen Angriff bei der Kanalreinigung sein;
- das eingebrachte Material (erhärtet oder nicht ausreagiert) darf keine Umweltschäden verursachen.

Abdichtungssysteme werden in der Regel auf die Schachtinnenwand in Form von mineralischen Materialien zur Behebung von lokalen oder flächigen Schäden aufgebracht. Injektionsgüter auf polymerer oder mineralischer Basis werden häufig zur Rissinjektion, zum Verfüllen von Hohlräumen oder zum Abdichten von Bauwerken eingesetzt. Beide Verfahren variieren in Bezug auf ihre Anwendungstechnik.

4.4.2 Materialien und Verfahren

4.4.2.1 Mörtel und Schlämmen

Stopfmörtel setzt sich aus einem Zementmörtel und aus Zusatzmitteln wie Quellmittel und Abbindebeschleuniger zusammen. Der Abbindebeschleuniger bewirkt eine sehr schnelle Reaktion mit Wasser bis zur Erstarrung des Mörtels. Das vorhandene Quellmittel setzt eine Mikroporenbildung im noch plastischen Zementleim in Gang. Dadurch ergibt sich eine Anpassung des Mörtels an alle Kontaktflächen, sodass Schäden in den Schachtwänden dicht geschlossen werden können [2].

Blitzmörtel bestehen aus organisch vergüteten Mörteln, die aus hoch hydraulischen und schnell abbindenden Zementen und einer Silikatkomponente bestehen. Sie werden in allen Bereichen der kurzfristigen Schnellabdichtung eingesetzt. Bei Injektionsarbeiten an Abwasserschächten dienen sie dazu, das Verpressmaterial zurückzuhalten, damit es nicht in den Schacht eindringen kann [2].

Dichtschlämmen werden grundsätzlich in starre und flexible Schlämmen eingeteilt. So besitzen starre Dichtschlämmen aufgrund ihrer Zusammensetzung aus Zement, Zuschlägen und Zusatzmittel keinerlei rissüberbrückende Eigenschaften. Flexible Dichtschlämmen werden als Ein- oder Zweikomponentensysteme hergestellt. Sie bestehen aus Zement, Zuschlägen und einem relativ hohen Kunststoffanteil und besitzen daraus folgend eine gewisse Flexibilität. Anwendungsgebiete sind klassische Bauwerksabdichtungen im Erdreich. Sie können sowohl als Abdichtung auf der Außenseite als auch als sogenannte Negativbeschichtung auf der Innenseite erdberührter Bauteile eingesetzt werden. Da das Material im Regelfall mit einem Quast auf die Bauteiloberfläche aufgestrichen wird, können nur Schichtdicken von wenigen Millimetern erreicht werden [37].

Kristallbildner bestehen in der Regel aus Zement, feinem Silikatsand und verschiedenen Chemikalien. Auf eine Betonoberfläche aufgebracht diffundieren diese Chemikalien in die Betonporen und bilden unlösliche Kristalle mit dem vorhandenen freien Kalk. Dadurch wird eine Verringerung der wasserführenden Porenräume und somit eine höhere Dichte des Bauwerks erlangt [2].

Bei der **Verkieselung** werden Porenräume des Bauwerkes mit stark verdünntem Wasserglas (Silikat) aufgefüllt, welches dort mit der vorhandenen Luftkohlenäure zu einer Art Gel erstarrt. Ähnlich dem Kristallbildner werden Poren verringert und das Bauwerk bzw. der Baustoff erzielt eine höhere Dichte [2].

Bei **Reaktionsharzmörteln** wird auf Zement als Bindemittel vollständig verzichtet. Das gesamte Bindemittel besteht aus reaktionsfähigen Kunstharzgemischen auf der Basis von ungesättigten Polyestern, Epoxidharzen und Methacrylatharzen, welche

bei Raumtemperatur vollständig er härten können. Die Beständigkeit dieser Mörtel ist aufgrund der fehlenden kapillaren Porenhohlräume gegenüber Witterungsverhältnissen und anderen Einflüssen sehr hoch. Im Gegensatz zu mineralischen Mörteln muss der Untergrund bei Reaktionsharzmörteln vollständig trocken sein um einen guten Verbund zwischen Mörtel und Untergrund zu gewährleisten [2].

4.4.2.2 Mineralische Injektionsmaterialien

Injektionsmörtel bestehen aus Zementen mit feinen Zuschlägen. Sie werden als 1-komponentige Trockenmörtel, welche mit Wasser angemischt und injiziert werden, bezeichnet [38].

Injektionsleime unterscheiden sich von Injektionsmörteln lediglich durch ihre feinere und dünnere Konsistenz [38].

Zementsuspensionen sind ebenfalls 1-komponentige Pulverprodukte. Sie werden aus Feinst- bzw. Mikrozementen zusammen mit einer Anmachflüssigkeit (in der Regel Wasser) maschinell angerührt. Durch die hohe Mahlfeinheit der eingesetzten Zemente können selbst kleinste Risse gefüllt und abgedichtet werden [38].

Die oben genannten mineralischen Injektionsmaterialien erhärten mittels Hydratation. Zur Veränderung der Reaktionszeiten werden den einzelnen Materialien oftmals Abbindebeschleuniger zugegeben. Die häufigsten Einsatzbereiche sind klüftiges Mauerwerk, Hohlräume und Risse in der Bausubstanz [38].

4.4.2.3 Polymere Injektionsmittel

Als Injektionsmaterialien werden oftmals Kunstharze verwendet. Je nach Art und Dosierung der verwendeten Komponenten lassen sich unterschiedliche Endprodukte herstellen.

Mittel auf der Basis von **Acrylharz** werden mit Beschleuniger bzw. Verzögerer (Aminen) und Wasser verdünnt. Das Gemisch wird mit einem Härter (Salz) gemischt und polymerisiert zu einem elastischen Gel (vgl. Bild 18). Dieses Gel reagiert in Verbindung mit Wasser und quillt auf, bei Trocknung schrumpft es. Bei vollständiger Austrocknung besteht also die Gefahr des Ablösens des Injektionskörpers von der Schachtwand mit dem Verlust der Dichtwirkung. Topfzeiten lassen sich durch unterschiedliche Dosierung der Inhaltsstoffe von wenigen Sekunden bis auf über 60 Minuten einstellen [2, 37].



Bild 18 Injektionen auf Acrylharzbasis: Ausgehärtetes Gel (links) und Bodeninjektion (rechts)

Epoxidharze werden vor dem Injizieren mit Härtern versetzt. Um das gewünschte Reaktionsverhalten zu erreichen, sind ein genaues Mischverhältnis und eine ausreichende Vermischung notwendig. Die Reaktion beider Komponenten miteinander ist abhängig von der Umgebungstemperatur und die Einhaltung bestimmter Feuchtigkeitsgrenzen [2].

Injektionsmittel auf der Basis von **Polyurethanharz** können je nach Zusammensetzung verschiedene Endprodukte hervorbringen. Durch die Vermischung von Polymeren mit Wasser entstehen zunächst Lösungen, die durch Wasser und eventuell zugesetzte Amine zu Schaum-Hydrogelen reagieren. Je nach Dosierungsverhältnis kann ein Schaum oder ein Gel entstehen (vgl. Bild 19).

Bei 1-komponentigen Polyurethanharzsystemen wird ein Polymer mit der zweckerfüllenden Menge Katalysator gemischt und injiziert. Dabei reagieren die Isocyanatengruppen mit dem anstehenden Wasser zu einem Polyharnstoff-Harz.

Bei einem 2-komponentigen Polyurethanharzsystem laufen zeitgleich zwei Reaktionen ab. Zum einen die eines Isocyanates mit Polyalkohol zu Polyurethan und zum Anderen die Reaktion zwischen Isocyanat und Wasser zu einem Polyharnstoff und Kohlendioxid, was zum Aufschäumen des Polyurethans führt [2].



Bild 19 Injektionen auf Polyurethanharzbasis: Ausgehärteter Schaum (links) und Bodeninjektion (rechts)

4.4.2.4 Verfahrenstechnik für Injektionssysteme

Im Bereich der Abwasserschachtsanierung kommt überwiegend die abdichtende Druckinjektion zum Einsatz. Dabei werden Schäden, Undichtigkeiten und Hohlräume verpresst und das Eindringen von flüssigen Medien oder Schadgasen aus dem Erdreich verhindert [38].

Das Verfahren der Druckinjektion lässt sich in Nieder- und Hochdruckverfahren unterteilen. Werden Injektionsmittel mit einem Druck von 2 bis 10 bar injiziert, spricht man vom Niederdruckverfahren. Ist der Druck größer als 10 bar, spricht man vom Hochdruckverfahren.

Über sogenannte Packer wird das Material dann im Bereich der Schadstellen verpresst. Klebepacker kommen hierbei insbesondere zur Verpressung von zur Oberfläche hin offenen Rissen zum Einsatz. Ansonsten finden Bohrpacker Verwendung, welche in Schlag- und Schraubpacker unterschieden werden (vgl. Bild 20).



Bild 20 Beispiele für Bohrpacker: Schlagpacker (links) und Schraubpacker (rechts)

Je nach Injektionsverfahren werden die Packer in den Untergrund eingebracht und das Injektionsgerät wird an die Packer angeschlossen. Über eine Pumpe wird dann das Material injiziert. Anfangs wird das Material mit geringem Druck in die Hohlräume eingebracht, der Druck wird im Anschluss kontinuierlich bis zum maximal angestrebten Druck erhöht. Das Material wird solange injiziert, bis es am benachbarten Packer wieder austritt (vgl. Bild 21).



Bild 21 Injektionsverfahren bei einem Einsatz im Sohlbereich: Packer in der Schachtwand und eingetretenes Injektionsgut (links) und Beispiel für eine Injektionspumpe (rechts)

Der befüllte Packer wird vom Injektionsgerät getrennt und verschlossen. Die Injektion wird im Anschluss am benachbarten Packer fortgesetzt. Dieser Vorgang wird so lange wiederholt, bis der abzudichtende Bereich verpresst wurde. Da die eingebrachten Materialien in der Regel bei eindringendem Wasser eingebracht werden und eine sehr kurze Reaktionszeit besitzen, ist das Ergebnis der Maßnahme meist unmittelbar erkennbar und es kann, falls notwendig, nochmals Material verpresst werden.

Wenn das Injektionsmaterial ausgehärtet ist, werden die Packer durch z. B. Ziehen oder Abschlagen entfernt. Die Löcher und verbleibenden Unebenheiten werden meist mit einem Stopfmörtel verschlossen [38].

Injektionstechniken werden auch in anderen Bereichen der Bauwerksinstandhaltung eingesetzt, allerdings sind die dort üblicherweise eingesetzten Nieder- und Hochdruckinjektionen verfahrenstechnisch sehr aufwändig und scheinen daher aus wirtschaftlichen Gründen für den vorliegenden Anwendungsfall ohne weitere Untersuchungen und Entwicklungen derzeit noch ungeeignet (vgl. [38]). Bild 22 bis Bild 23 zeigen beispielhaft die schwierigen geometrischen Bedingungen beim (theoretischen) Einsatz dieser z. B. im Tunnelbau angewendeten Verfahren (vgl. [38]). Durch den Einsatz von Injektionslanzen von der Oberfläche aus und die exzentrisch liegende Einstiegsöffnung sind bei der Injektion von Innen die unterschiedlichen Bereiche nur schwer zugänglich. Der Anbohrwinkel muss zumeist sehr flach gewählt werden, wodurch die Schachtwand erheblich beschädigt wird (vgl. Bild 22). Auf der geneigten Seite des Schachtkonus ist insbesondere der obere Bereich nur schwer erreichbar. Diese Injektionsmethode stellt mit hoher Wahrscheinlichkeit einen Ausnahmefall dar. Bei der Sanierung von Außen ist zu beachten, dass hierbei der gesamte Umfang des Schachtbauwerkes mit Injektionslanzen bestückt werden muss. Infolgedessen wird dann die Straßendecke in diesem Bereich komplett zerstört (vgl. Bild 23).

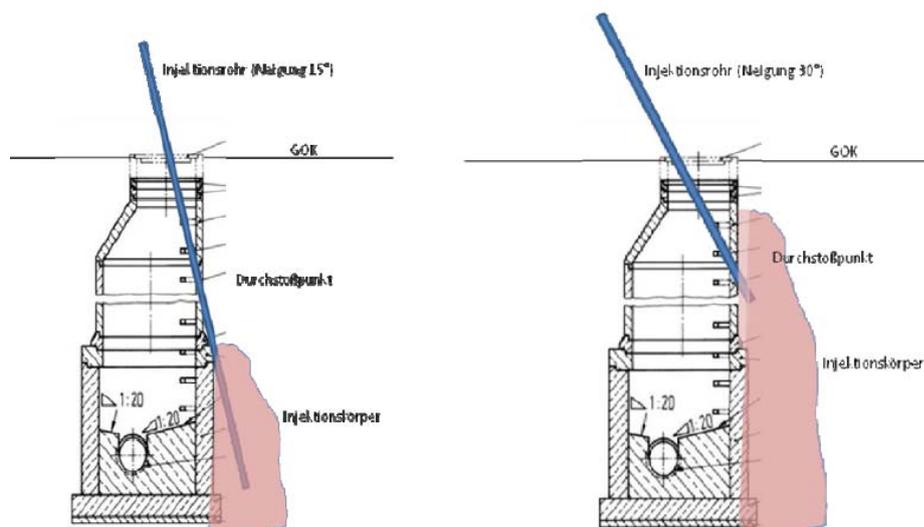


Bild 22 Theoretische Betrachtung: Injektionskörper und Durchstoßpunkte bei Sanierung von Innen mit klassischen Bodeninjektions-Verfahren, Bild aus [38]

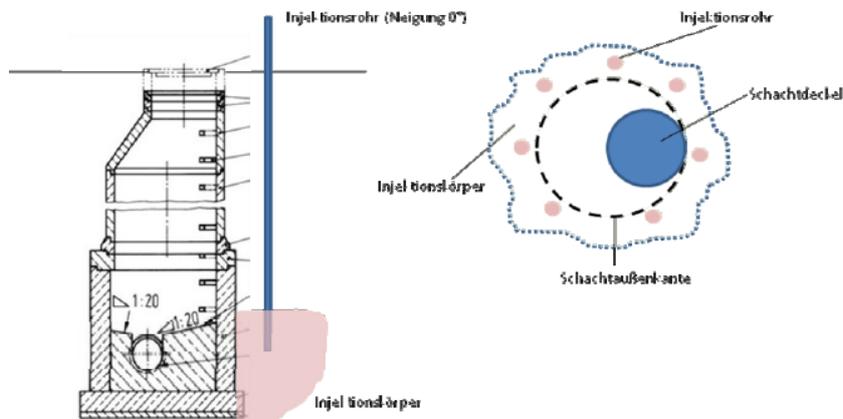


Bild 23 Theoretische Betrachtung: Anordnung der Injektionskörper bei Sanierung von Außen, Bild aus [38]

4.4.3 Sanierungsqualität

Die Sanierungsmaßnahmen werden oftmals bei anstehendem Grundwasser ausgeführt. Wenn das Schachtbauwerk unter vollem Grundwasserstand saniert wird, ist das Ergebnis unmittelbar sichtbar. Variiert jedoch der Grundwasserstand und es wird bei niedrigem Stand injiziert, können weiterhin vorhandene Undichtigkeiten nicht sofort lokalisiert werden und werden erst später bei höherem Grundwasserstand sichtbar. In diesem Fall kann es vorkommen, dass eine Sanierung fehlgeschlagen ist und wiederholt werden müsste. Dies stellt sich allerdings oftmals problematisch dar, da Abdichtungsmaßnahmen meist unmittelbar vor Beschichtungsmaßnahmen ausgeführt werden und somit weiter vorhandene bzw. unerkannte Undichtigkeiten dann auch Einfluss auf Beschichtungen nehmen können. Entsprechend können Abdichtungen nur als vorübergehende Maßnahme angesehen werden.

Zusätzliche Einflüsse auf die Sanierungsqualität können aus dem vor Ort eingesetzten Material herrühren. Je nach Bodenbeschaffenheit im Umfeld des Schachtbauwerks kann das Material zum einen in zu großen Mengen verpresst werden und/oder zum anderen nicht die geforderte abdichtende Wirkung aufweisen. Üblicherweise werden im Zuge von Schachtabdichtungen keine Bodenproben zur Überprüfung der Umgebungsbedingungen gewonnen. Eine seriöse Abschätzung der zu verpressenden Materialmengen und damit verbundenen Kosten kann i.d.R. im Vorfeld einer Injektionsmaßnahme nicht getroffen werden.

5 In-situ-Maßnahmen

5.1 Untersuchungsumfang

Ausgehend von den Erkenntnissen aus dem bereits abgeschlossenen Forschungsprojekt „Beschichtungsverfahren zur Sanierung von Abwasserschächten“ [18] wurden im Rahmen dieses Projektes 20 Altbeschichtungen untersucht, um Eindrücke zur Dauerhaftigkeit von mineralischen und polymeren Beschichtungen unter Betriebsbelastungen zu gewinnen. Dabei bildeten die Beschichtungen aus [18] mit bekannter Sanierungshistorie den Schwerpunkt der Untersuchungen (vgl. Abschnitt 5.2). Hier lagen bereits umfangreiche Informationen zum Zustand der Beschichtungen etwa einen bzw. sechs Monate nach Abschluss der Sanierungsarbeiten vor. Im Rahmen dieses Forschungsprojektes konnten diese Beschichtungen nunmehr etwa 60 Monate nach der Sanierung erneut untersucht und Zustandsveränderungen an den Beschichtungen erfasst werden. Ergänzend wurden weitere Beschichtungen mit einem möglichst hohen Alter und somit langer Betriebsdauer inspiziert und bewertet.

Die In-situ-Begleitung von Abdichtungsmaßnahmen an Schachtkörpern (vgl. Abschnitt 5.3.3) und Rohreinbindungen (vgl. Abschnitt 5.3.2) diente als Grundlage und zur Ergänzung der anschließend im Projekt vorgesehenen Labor- und Großversuche. Insbesondere sollten aus den Erkenntnissen dieser Untersuchungen die Anforderungen an den Versuchsaufbau sowie die Randbedingungen der Großversuche abgeleitet werden. Da bei den Großversuchen ausschließlich Betonfertigteilschächte verwendet wurden, kam es bei den In-situ-Begleitungen auf ein ausgewogenes Verhältnis von Schächten aus Mauerwerk und Beton an. Die eingesetzten Sanierungs- bzw. Injektionsmaterialien standen stellvertretend für Materialgruppen, wie z.B. Polyurethanharz, Acrylatgel, Zementleim sowie Stopf- und Flächenmörtel.

Ergänzend wurde der Einsatz eines Nachbehandlungsmittels für Mörtelbeschichtungen vor Ort dokumentiert und der Schachtneubau zur Erstellung eines Kostenvergleiches zur Schachtsanierung analysiert.

5.2 Untersuchung von Altbeschichtungen

5.2.1 Überblick

Erkenntnisse aus bereits abgeschlossenen Forschungsprojekten (vgl. [18] und [39]) zeigten, dass hier von insgesamt 42 untersuchten Beschichtungen nur etwa 40 % mängelfrei, jedoch annähernd jeweils 30 % geringfügig bzw. stark mängelbehaftet waren. Auch etwa 100 Baustellenuntersuchungen der IKT-Prüfstelle aus den Jahren 2006 bis 2008 bestätigten dieses Ergebnis [48]. Meist beschränkte sich bei diesen Untersuchungen der Beobachtungszeitraum auf die ersten sechs Monate nach Applikation der Beschichtungen. Bisher blieb die Frage nach der Dauerhaftigkeit und Dichtheit der Beschichtungen über den Beobachtungszeitraum von sechs Monaten hinaus jedoch unbeantwortet. Auch das Verhalten erkannter Fehlstellen (Hohlstellen, Risse, Blasen usw.) kann derzeit mit Blick auf die Langzeitbeständigkeit und Funkti-

onsfähigkeit des sanierten Bauwerks nur unzureichend bewertet werden. Daher wurden im Rahmen dieses Forschungsprojektes unter anderem Abwasserschächte optisch inspiziert, deren Sanierungshistorie nahezu vollständig aus [18] bekannt war. Nach Aufnahme des Ausgangszustandes vor der Sanierung wurde die Durchführung der Sanierungsarbeiten wissenschaftlich begleitet. Zudem wurden die Beschichtungen ca. 28 Tage und 6 Monate nach Fertigstellung optisch inspiziert. An ausgewählten Schächten wurde eine Nachkontrolle nach ca. 60 Monaten durchgeführt.

In Abstimmung mit den beteiligten Netzbetreibern wurden für eine erneute Nachkontrolle Schächte ausgewählt, die eine möglichst große Bandbreite der vorgefundenen Belastungen, Werkstoffe und Randbedingungen widerspiegeln. Im Ergebnis wurden 7 Kunststoff- und 13 Mörtelbeschichtungen in diese Untersuchungen einbezogen. Von diesen waren 14 Beschichtungen bereits im Rahmen von [18] über sechs Monate hinweg Zustandsveränderungen dokumentiert worden. Bei zwei Beschichtungen lagen ebenfalls Ergebnisse von Schachtinspektionen aus vergangenen Jahren vor. Bei weiteren vier Beschichtungen des Untersuchungsprogramms konnte lediglich der aktuelle Ist-Zustand erfasst werden. Die Altersverteilung der Beschichtungen im Untersuchungsjahr 2009:

- ≥ 10 Jahre: 4,
- ≈ 5 Jahre: 14,
- ≈ 3 Jahre: 2.

Analog zu den in [18] durchgeführten Untersuchungen wurden die Beschichtungen nach folgendem Kriterienkatalog optisch inspiziert:

- Fehlstellen in der Beschichtung (fehlendes Material),
- Risse in der Beschichtung,
- Hohlstellen hinter der Beschichtung bzw. Blasen in der Beschichtung,
- Undichtigkeiten bzw. Durchfeuchtung der Beschichtung.

Wenn möglich wurden Haftzugprüfungen durchgeführt, so dass nun zum Teil Ergebnisse von Haftzugprüfungen über einen Zeitraum von etwa 60 Monaten vorliegen. Schließlich wurden im Rahmen der Schachtinspektionen Proben des Beschichtungsmaterials gewonnen, welche auf ggf. vorhandene Schädigungen untersucht wurden, um weitergehende Informationen zur Langzeit-Beständigkeit zu erhalten.

5.2.2 Mörtelbeschichtungen

5.2.2.1 Beschichtungsalter: 3 bis 5 Jahre, Schachthistorie bekannt

Im Folgenden sind die Untersuchungsergebnisse für neun Mörtelbeschichtungen aufgeführt. Eine Beschichtung ist zum Zeitpunkt der Inspektion etwa drei Jahre alt, acht hingegen waren seit ca. fünf Jahren in Betrieb und wurden bereits in [18] untersucht. Die Gründe für die Sanierungen lagen bei sieben Schächten in Undichtigkeiten. Zwei Schächte zeigten einen deutlichen Substanzverlust infolge Korrosion. We-

sentliche Schacht-Randbedingungen sowie Untersuchungsergebnisse sind in Tabelle 6 zusammengefasst. Dabei ist das jeweilige Untersuchungsergebnis farbig hinterlegt. Bei den hier verwendeten „Ampelfarben“ bedeutet:

grün = mängelfrei

gelb = geringfügig mangelbehaftet mit lokal begrenzten Schadstellen an der Beschichtung

rot = stark mangelbehaftet mit einer Häufung von Schäden bzw. großflächig vorhandenen Einzelschäden an der Beschichtung.

Im Anschluss an die tabellarische Übersicht werden einzelne Beispiele exemplarisch erläutert, um die Bandbreite der Zustandsveränderungen aufzuzeigen.

Tabelle 6 Mörtelbeschichtungen (Zustandsübersicht)

Lfd. Nr.	Lage des Schachtes / Verkehrsbelastung	Schachtdaten (Material und Geometrie)	Zustand vor Beschichtung	Schachtansicht vor Sanierung	Beschichtungsmaterial, Applikationstechnik	Schachtansicht 1. Nachuntersuchung	Schachtansicht 2. Nachuntersuchung	Schachtansicht 3. Nachuntersuchung
				mittlere Abreißfestigkeit des Untergrundes		Beschichtungsalter/ mittlere Haftzugfestigkeit/ festgestellte Schäden	Beschichtungsalter/ mittlere Haftzugfestigkeit/ festgestellte Schäden	Beschichtungsalter/ mittlere Haftzugfestigkeit/ festgestellte Schäden
1	im Bankett einer Landstraße / niedrig	Beton , Tiefe: ca. 1,6 m Ø:1,0 m	Schachtwandung flächig feucht, starker Wassereindring durch untere Schachtringfuge		Ergelit Kombina KT, Beschichtung von Hand			
				2,8 N/mm ²		1 Monat / 0,4 N/mm ² / - Risse (ges. Beschichtung.), - Hohlstelle	6 Monate / - / - Risse (ges. Beschichtung), - Hohlstelle, - Beschichtung feucht	neue Beschichtung: untersucht nach ca. 50 Monaten / 0,2 N/mm ² / : - Riss (unter Schachtrahmen)
2	im Wendehammer einer Buslinie / niedrig	Beton , Tiefe: ca. 3,7m, Ø:1,0 m	Betonoberfläche sehr glattwandig, bei Voruntersuchung trocken		Ergelit Kombina KT, Beschichtung von Hand			
				> 1,9 N/mm ²		1 Monat / < 0,1 N/mm ² / - Risse (Konus)	6 Monate / - / - Risse (ges. Beschichtung), - Hohlstellen (Konus)	60 Monate / 0,1 N/mm ² / - Risse (ges. Beschichtung), - Hohlstellen (Konus)

Tabelle 6 (Fortsetzung)

Lfd. Nr.	Lage des Schachtes / Verkehrsbelastung	Schachtdaten (Material und Geometrie)	Zustand vor Beschichtung	Schachtansicht vor Sanierung	Beschichtungsmaterial, Applikationstechnik	Schachtansicht 1. Nachuntersuchung	Schachtansicht 2. Nachuntersuchung	Schachtansicht 3. Nachuntersuchung
				mittlere Abreißfestigkeit des Untergrundes		Beschichtungsalter/ mittlere Haftzugfestigkeit/ festgestellte Schäden	Beschichtungsalter/ mittlere Haftzugfestigkeit/ festgestellte Schäden	Beschichtungsalter/ mittlere Haftzugfestigkeit/ festgestellte Schäden
3	im Kreuzungsbereich von zwei mittelstark befahrenen Straßen (Straßen - BK IV) / hoch	Oberteil aus Beton , Tiefe: ca. 2,8 m, davon untere 1,0 m aus Mauerwerk , Ø: 1,0 m	Schachtteil aus Beton in gutem Zustand, Mauerwerksfugen sind korrodiert, Zuläufe sind undicht		Mapei Sewament 100, Beschichtung angeschleudert			
				4,3 N/mm ²		1 Monate / 0,2 N/mm ² / -	6 Monate / - / -	60 Monate / 0,3 N/mm ² / - Riss (unter Schachtrahmen)
4	auf einem Kirchenvorplatz / (sehr) niedrig	Oberteil aus Beton , Tiefe: ca. 4,8 m, davon untere ca. 1,8 m aus Mauerwerk Ø: Beton: 1,0 m Ø: MW: 0,95 m	Schacht an einigen Stellen extrem undicht, Fugen stark korrodiert, starke Ablagerungen und Mörtelrückstände um und unter den Zuläufen		Mapei Sewament 100, Beschichtung angeschleudert			
				> 1,3 N/mm ²		1 Monat / 1,7 N/mm ² / - fehlendes Beschichtungsmaterial (lokal)	6 Monate / - / - fehlendes Beschichtungsmaterial (lokal)	60 Monate / 0,8 N/mm ² / - Fehlstelle wurde nachgearbeitet

Tabelle 6 (Fortsetzung)

Lfd. Nr.	Lage des Schachtes / Verkehrsbelastung	Schachtdaten (Material und Geometrie)	Zustand vor Beschichtung	Schachtansicht vor Sanierung	Beschichtungsmaterial, Applikationstechnik	Schachtansicht 1. Nachuntersuchung	Schachtansicht 2. Nachuntersuchung	Schachtansicht 3. Nachuntersuchung
				mittlere Abreißfestigkeit des Untergrundes		Beschichtungsalter / mittlere Haftzugfestigkeit / festgestellte Schäden	Beschichtungsalter / mittlere Haftzugfestigkeit / festgestellte Schäden	Beschichtungsalter / mittlere Haftzugfestigkeit / festgestellte Schäden
5	in einer Wiese / (sehr) niedrig	Beton , Tiefe: ca. 3,8 m, Ø: 1,0 m	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	 1,2 N/mm ²	Reprofilierung: Ergelit Kombina KT, Beschichtung: Ergelit Kombina KS2b, Beschichtung von Hand	 1 Monat / 0,3 N/mm ² / - keine Schäden erkennbar, jedoch beginnende Verfärbung des Mörtels	 6 Monate / - / - keine Schäden erkennbar, jedoch deutliche Verfärbung des Mörtels	 60 Monate / 1,0 N/mm ² / - Beschichtung vollständig weich, nur noch Reprofilierung vorhanden
6	in der Zufahrt zu einem Campingplatz (Straßen - BK V) / niedrig	Mauerwerk mit Betonkonus , Tiefe: ca. 2,5 m, Ø: 1,0 m	Mauerwerkfugen leicht korrodiert, seitlicher Zulauf schlecht angebunden	 1,2 N/mm ²	Ergelit Kombina KS 1, Beschichtung von Hand	 1 Monat / 0,2 N/mm ² / -	 6 Monate / - / -	 60 Monate / 0,2 N/mm ² / - Schäden bedingt durch ausgeführte Reparaturarbeiten
7	im Bankett einer Landstraße / niedrig	Beton , Tiefe: ca. 4,2 m, Ø: 1,0 m	Leichte Betonkrustationen, Betonfugen undicht, Wandung im unteren Bereich des Schachtes feucht, Auflagering um ca. 20 cm seitlich verschoben	 1,3 N/mm ²	Ergelit Kombina KS 1, Beschichtung angeschleudert (KS-ASS)	 1 Monat / 0,2 N/mm ² / -	 6 Monate / - / -	 60 Monate / 0,2 N/mm ² / - Riss (unter Schachtrahmen)

Tabelle 6 (Fortsetzung)

Lfd. Nr.	Lage des Schachtes / Verkehrsbelastung	Schachtdaten (Material und Geometrie)	Zustand vor Beschichtung	Schachtansicht vor Sanierung	Beschichtungsmaterial, Applikationstechnik	Schachtansicht 1. Nachuntersuchung	Schachtansicht 2. Nachuntersuchung	Schachtansicht 3. Nachuntersuchung
				mittlere Abreißfestigkeit des Untergrundes		Beschichtungsalter/ mittlere Haftzugfestigkeit/ festgestellte Schäden	Beschichtungsalter/ mittlere Haftzugfestigkeit/ festgestellte Schäden	Beschichtungsalter/ mittlere Haftzugfestigkeit/ festgestellte Schäden
8	im Bankett einer Landstraße / niedrig	Beton und Mauerwerk , Tiefe: ca. 4,3 m, Ø:1,0 m	Unterster gemauerte Ring undicht, leichte Inkrustation auf der Betonoberfläche		Ergelit Kombina KS 1, Beschichtung von Hand			
				2,7 N/mm ²		1 Monat / 0,5 N/mm ² / -	6 Monate / - / -	60 Monate / 0,5 N/mm ² / - Riss (unter Schachtrahmen)
9	Rand- bzw. Parkstreifen einer Wohnstraße / niedrig	Mauerwerk , Tiefe: ca. 2,9 m, 1,1 x 1,0 m	Schachtunterteil flächig feucht, starker Wassereindrang		Pagel KA 20, Beschichtung von Hand			
				> 0,4 N/mm ²		1 Monat / 0,5 N/mm ² / - vereinzelt feuchte Stellen in der Beschichtung und nicht ausgehärteter Mörtel - kleine Hohlstelle - Undichtigkeiten an Steigbügeln	- / - / keine Untersuchung durchgeführt	36 Monate / 0,9 N/mm ² / - Risse - Wassereindrang - Hohlstellen

Im Rahmen dieser Untersuchungen an den Mörtelbeschichtungen zeigte sich ein vergleichsweise uneinheitliches Bild. In zwei Fällen konnte - bedingt durch Nacharbeiten bzw. Erneuerung - eine Verbesserung des Beschichtungszustandes beobachtet werden. Eine Beschichtung ist in diesem Fall mängelfrei (vgl. Tabelle 6, lfd. Nr. 4), die zweite zeigte lediglich einen umlaufenden Riss in der Beschichtung unmittelbar unterhalb des Schachtrahmens (vgl. Tabelle 6, lfd. Nr. 1). In diesem Fall handelt es sich jedoch um eine neue Beschichtung, die nach Abschluss von [18] durch die Sanierungsfirma auf eigene Kosten eingebaut worden ist.

Insgesamt vier Schachtbeschichtungen sind in einem geringfügig schlechteren Zustand als vor etwa fünf Jahren. Dabei weisen drei Beschichtungen (vgl. Tabelle 6, lfd. Nr. 3, 7, 8) lediglich einen umlaufenden Riss in der Beschichtung unmittelbar unterhalb des Schachtrahmens auf (vgl. Bild 24, links). Eine weitere Beschichtung (vgl. Tabelle 6, lfd. Nr. 6) zeigt mehrere umlaufende Risse im Einstiegsbereich (vgl. Bild 24, rechts). Darüber hinaus sind in diesem Schacht Reparaturarbeiten durchgeführt worden, die aufgrund ihrer unzureichenden Ausführung den Allgemeinzustand des Schachtes verschlechtern. Insbesondere die nachträglich eingebauten Steigbügel sind hier zu nennen, da sie von Hand herausgezogen werden konnten.



Bild 24 Beispiele von Rissen in der Beschichtung im Schachtkopfbereich: Gerissene Beschichtung unterhalb des Schachtrahmens (links) und Risse in der Beschichtung im Einstiegsbereich (rechts)

Eine weitere Beschichtung zeigte keine weitere Verschlechterung ihres Zustands (vgl. Tabelle 6, lfd. Nr. 2). Hier war die Beschichtung bereits bei der Inspektion im Jahr 2004 vollständig von Rissen durchzogen und insbesondere im Konusbereich hohllagig. An diesem Zustand konnten keine weiteren Veränderungen festgestellt werden.

Zwei der untersuchten Mörtelbeschichtungen waren bei der neuerlichen Inspektion im Jahr 2009, also etwa drei bzw. fünf Jahre nach der Applikation, in einem deutlich schlechteren Zustand. Eine Beschichtung zeigte hier erkennbaren Wassereindrang durch Risse und eine deutliche Vergrößerung von bereits dokumentierten Hohlstellen (vgl. Tabelle 6, lfd. Nr. 9). Darüber hinaus hat sich die Beschichtung oberhalb des Ablaufs großflächig abgelöst. Bild 25 zeigt exemplarisch die Verschlechterung des Beschichtungszustands.



Bild 25 Zustandsveränderung einer Beschichtung innerhalb von drei Jahren: Risse in der Beschichtung mit Feuchtfahnen im Ausgangszustand (links) und Risse in der Beschichtung mit Ablösung und Wassereindrang nach drei Jahren (rechts)

Die zweite Beschichtung hat sich nahezu vollständig aufgelöst (vgl. Bild 26, links). Die Überreste dieser Beschichtung bestehen lediglich aus minderfestem Material (weicher Schlamm), das jedoch die darunterliegende Reprofilierung zum Zeitpunkt der Inspektion offensichtlich noch vor einem Korrosionsangriff schützte (vgl. Bild 26, rechts).



Bild 26 Deutlicher Substanzverlust der Beschichtung: Minderfester, in Auflösung befindlicher Beschichtungsmörtel (links) und weiche Beschichtung auf fester Reprofilierung im Bereich einer Haftzugprüfung (rechts)

Mit Blick auf die Ergebnisse der Untersuchungen ist es offensichtlich nicht ausreichend, lediglich die einzelnen Beschichtungszustände zum Zeitpunkt der Inspektion festzustellen. Auch deren Veränderungen über die Zeit unter Berücksichtigung etwaiger Vorschädigungen ist zu betrachten. Die Ergebnisse werden in Abschnitt 5.2.4 weiterführend ausgewertet.

5.2.2.2 Beschichtungsalter: 10 bis 14 Jahre, Feststellung des Ist-Zustands

Sofern in [18] und bei der Auswertung von Untersuchungen der IKT - Prüfstelle [48] Schäden an Mörtelbeschichtungen festgestellt wurden, sind diese überwiegend in einem Zeitraum von etwa vier bis 24 Wochen nach ihrer Herstellung dokumentiert worden. Um auch den Zustand älterer Schachtbeschichtungen in die Betrachtung

einzu beziehen, wurden bei den Netzbetreibern entsprechende Bauwerke abgefragt, die schon einer längeren Nutzungsdauer unterlagen. Schließlich wurden zwei Spülschächte, ein kleinerer Einsteig-Schacht und ein weiterer Standard-Abwasserschacht ausgewählt, um Mängel an der jeweiligen Beschichtung mit Blick auf die Funktionsfähigkeit und Dauerhaftigkeit zu erfassen. Unterschiedliche Randbedingungen und Anforderungen wie etwa Bewehrungsschutz, Test eines neuen Beschichtungsverfahrens, aber auch die Abdichtung des Bauwerks waren die Gründe für den Einbau der hier untersuchten Mörtelbeschichtungen. In Tabelle 7 sind zunächst Informationen zu den untersuchten Schächten dargestellt, die u.a. einen Überblick zu den vor Ort herrschenden Randbedingungen geben.

Tabelle 7 Informationen zu Schächten mit Altbeschichtungen

Lfd. Nr.	Funktion des Schachtes / Lage / Verkehrsbelastung	Schachtdaten (Material und Geometrie)	Grund für eine Sanierung mittels Mörtelbeschichtung	Beschichtungsmaterial, Applikationstechnik	Alter der Beschichtung
1	Spülschacht / Fußgängerzone / niedrig	Ort beton + 1 Lage Klinker Tiefe: ca. 2,6 m; l x b: 0,6 x 0,6 m	Schutz der freiliegenden Bewehrung des in Ort betonbauweise hergestellten Schachtes	Ergelit Kombina KT, Beschichtung von Hand	10 Jahre
2	Spülschacht / Fußgängerzone / niedrig	Ort beton + 1 Lage Klinker Tiefe: ca. 2,3 m; l x b : 0,6 x 0,6 m	Schutz der freiliegenden Bewehrung des in Ort betonbauweise hergestellten Schachtes	Ergelit Kombina KT, Beschichtung von Hand	10 Jahre
3	Einsteig-Schacht / in der Fahrbahn einer Straße / hoch	Mauerwerk, Tiefe: ca. 2,4 m; l x b : 0,6 x 0,6 m	Test des neu entwickelten KS-ASS-Anschleuerverfahrens	Ergelit Kombina KS 1, Beschichtung angeschleudert	10 Jahre
4	Abwasserschacht / Gehweg, wird jedoch als Parkfläche für PKW genutzt / niedrig	Mauerwerk, Tiefe: ca. 3,7 m, max.Ø: 1,2 m	starke Undichtigkeiten im Schachtunterteil	Ergelit Kombina KS 1, Beschichtung von Hand	14 Jahre

Nachfolgend werden die Inspektionsergebnisse für diese Altbeschichtungen dargestellt. Dabei ist insbesondere zu berücksichtigen, dass drei der untersuchten Schächte (Tabelle 7, lfd. Nr. 1 bis 3) aufgrund ihrer geringen Abmessungen keinen Einstieg für Haftzugprüfungen an den Beschichtungen zuließen.

Ergebnisse für Schacht 1 (vgl. lfd. Nr. 1 in Tabelle 7):

In den Schacht wurde in der unteren Hälfte eine Mörtelbeschichtung von etwa 10 mm Dicke eingebaut, auf die obere Hälfte der Wandungen ist der Mörtel in einer schlammfähigen Konsistenz und vergleichsweise dünn (ca. 1 mm) aufgetragen worden. Bereichsweise fehlt die Schlämme auf den Wandungen oder aber lässt sich mit einem Spachtel ohne nennenswerten Kraftaufwand abschaben (vgl. Bild 27).



Bild 27 Schacht 1: Blick in den beschichteten Schacht (links oben); Übergangsbereich von Schlamm und Dickbeschichtung (rechts oben); unvollständiger Materialauftrag im oberen Bereich des Schachtes (links unten); wellige Struktur der Beschichtung (rechts unten)

Im Übergangsbereich von Dickbeschichtung und Schlamm liegt die Dickbeschichtung auf nahezu dem gesamten Schachturnfang und auf einer Breite von etwa drei bis fünf Zentimetern hohl. Infiltrationen oder eine Durchfeuchtung der Beschichtung konnten nicht festgestellt werden. Der Grundwasserstand war nicht bekannt.

Ergebnisse für Schacht 2 (vgl. lfd. Nr. 2 in Tabelle 7):

In den Schacht wurde in der unteren Hälfte eine Mörtelbeschichtung von etwa 10 mm Dicke eingebaut. Der Übergangsbereich von Beschichtung zur Betonwandung wurde nicht speziell ausgebildet. Darüber hinaus ist die Beschichtung von z. T. welliger Struktur, insbesondere im Bereich des Ablaufs. Etwa 10 % der Beschichtungsfläche ist hohllagig. Infiltrationen oder eine Durchfeuchtung der Beschichtung konnten nicht festgestellt werden (vgl. Bild 28). Der Grundwasserstand war nicht bekannt.



Bild 28 Schacht 2: Blick in den beschichteten Schacht (links oben); Übergangsbereich von Betonwandung und Beschichtung (rechts oben); Hohlstelle (links unten); Beschichtung im Bereich des Ablaufs (rechts unten)

Ergebnisse für Schacht 3 (vgl. lfd. Nr. 3 in Tabelle 7):

Der Schacht ist mit einem Beschichtungsmörtel ausgeschleudert worden. Daher und wegen einer fehlenden Reprofilierung des Mauerwerks ist die Beschichtung überwiegend von welliger Struktur. Vereinzelt fehlt Beschichtungsmaterial in den Eckbereichen des Schachtes und etwa 20 cm unterhalb des Schachtrahmens ist an allen vier Wandungen die Beschichtung hohltagig. Darüber hinaus ist ein Teil der Beschichtung unterhalb des Schachtrahmens abgefallen. Infiltrationen oder eine Durchfeuchtung der Beschichtung konnten nicht festgestellt werden (vgl. Bild 29). Der Grundwasserstand war nicht bekannt.



Bild 29 Schacht 3: Blick in den beschichteten Schacht (links oben); Übergangsbereich Schachtrahmen und Beschichtung (rechts oben); Hohlstelle (links unten); Fehlendes Beschichtungsmaterial in einem Eckbereich des Schachtes (rechts unten)

Ergebnisse für Schacht 4 (vgl. lfd. Nr. 4 in Tabelle 7):

Die vertikalen Wandungen des Schachtes sind vollständig beschichtet. Im Einstiegsbereich ist der Beschichtungsmörtel netzartig gerissen und hat sich bereichsweise schollenartig abgelöst. Es ist jedoch erkennbar, dass lediglich die obere Lage Mörtel fehlt, eine weitere Lage darunter ist immer noch vorhanden. Des Weiteren ragen zwei unverdämmte Altrohre durch die Beschichtung in den Schacht hinein und in einem sehr begrenzten Bereich fehlt der Beschichtungsmörtel bzw. ist nur sehr dünn aufgetragen worden. Infiltrationen oder eine Durchfeuchtung der Beschichtung konnten nicht festgestellt werden (vgl. Bild 30). Der Grundwasserstand war nicht bekannt.



Bild 30 Schacht 4: Blick in den beschichteten Schacht (links oben); schollenartig abgelöste Beschichtung im Bereich des obersten Steigeisens (rechts oben); unverdämmtes Altrrohr (links unten); fehlendes Beschichtungsmaterial (rechts unten)

Die Ergebnisse werden in Abschnitt 5.2.4 weiterführend ausgewertet.

5.2.3 Polymere Beschichtungen

Im Folgenden sind die Untersuchungsergebnisse für sieben polymere Beschichtungen aufgeführt. Eine Beschichtung ist zum Zeitpunkt der Inspektion etwa drei Jahre alt, sechs hingegen waren seit ca. fünf Jahren in Betrieb und wurden bereits in [18] untersucht. Wesentliche Schacht-Randbedingungen sowie Untersuchungsergebnisse sind in Tabelle 8 enthalten. Dabei ist das jeweilige Untersuchungsergebnis farblich hinterlegt. Bei den hier verwendeten „Ampelfarben“ bedeutet:

- grün = mängelfrei
- gelb = geringfügig mangelbehaftet mit lokal begrenzten Schadstellen an der Beschichtung
- rot = stark mangelbehaftet mit einer Häufung von Schäden bzw. großflächig vorhandenen Einzelschäden an der Beschichtung.

Im Anschluss an die tabellarische Übersicht werden einzelne Beispiele exemplarisch dargestellt, um die Bandbreite der Zustandsveränderungen aufzuzeigen.

Tabelle 8 Polymere Beschichtungen (Zustandsübersicht)

Lfd. Nr.	Lage des Schachtes / Verkehrsbelastung	Schachtdaten (Material und Geometrie)	Zustand vor Beschichtung	Schachtansicht vor Sanierung	Beschichtungsmaterial, Applikationstechnik	Schachtansicht 1. Nachuntersuchung	Schachtansicht 2. Nachuntersuchung	Schachtansicht 3. Nachuntersuchung
				mittlere Abreißfestigkeit des Untergrundes		Beschichtungsalter/ mittlere Haftzugfestigkeit/ festgestellte Schäden	Beschichtungsalter/ mittlere Haftzugfestigkeit/ festgestellte Schäden	Beschichtungsalter/ mittlere Haftzugfestigkeit/ festgestellte Schäden
1	in mittelstark befahrener Straße mit Busverkehr (Straßen - BK IV) / hoch	Beton, Tiefe: ca. 6,0 m, Ø: 1,0 m	Nachträglich hergestellter Zulauf, durchgehender Riss in Schachtring, Bitumendichtungen stehen in den Ringfugen über, sehr feuchte Wandungs Oberfläche im unteren Bereich des Schachtes	 2,5 N/mm ²	Oldodur WS 56, Beschichtung mittels Sprüh-Schleuder-Verfahren	 1 Monat 3,5 N/mm ² / - fehlendes Material unterhalb Zulauf, ca. 3 x 3 cm	 6 Monate - / - fehlendes Material unterhalb Zulauf, ca. 3 x 3 cm	 60 Monate 1,0 N/mm ² / - fehlendes Material unterhalb Zulauf, ca. 3 x 3 cm - 3 Blasen in der Beschichtung, ca. 40 x 50 cm
2	in einer Seitenstraße mit Anliegerverkehr (Straßen - BK V) / niedrig	Mauerwerk, Tiefe: ca. 3,3 m, Ø: 1,0 m	Fugen stark korrodiert, Kanalklinker leicht inkrustiert, Anbindungen der Ein- und Abläufe stark ausgewaschen.	 > 2,1 N/mm ²	Oldodur WS 56, Beschichtung von Hand aufgesprüht	 1 Monat 0,5 N/mm ² / - nicht ausgehärtetes Beschichtungsmaterial	-	 60 Monate 1,0 N/mm ² / - nicht ausgehärtetes Beschichtungsmaterial - gerissenes und abgelöstes Material

Tabelle 8 (Fortsetzung)

Lfd. Nr.	Lage des Schachtes / Verkehrsbelastung	Schachtdaten (Material und Geometrie)	Zustand vor Beschichtung	Schachtansicht vor Sanierung	Beschichtungsmaterial, Applikationstechnik	Schachtansicht 1. Nachuntersuchung	Schachtansicht 2. Nachuntersuchung	Schachtansicht 3. Nachuntersuchung
				mittlere Abreißfestigkeit des Untergrundes		Beschichtungsalter/ mittlere Haftzugfestigkeit/ festgestellte Schäden	Beschichtungsalter/ mittlere Haftzugfestigkeit/ festgestellte Schäden	Beschichtungsalter/ mittlere Haftzugfestigkeit/ festgestellte Schäden
3	im Gehweg neben einer Hauptverkehrsstraße, Nähe zu einem Fluss / niedrig	Beton, Tiefe: ca. 2,4 m, Ø:1,0 m	Ringfugen und Einläufe waren bereits mit Mörtel verspachtelt, Schacht macht relativ guten optischen Eindruck		Oldodur WS 56, Beschichtung von Hand aufgesprüht			
				> 1,7 N/mm ²		1 Monat / > 2,0 N/mm ² / -	6 Monate / - / - Schmutzwasserfließspuren unterhalb eines Steigeisens	60 Monate / 1,5 N/mm ² / - Riss (unter Schachtrahmen) - Hohlstelle (Konus) - Wassereindrang
4	in einem Gehweg / niedrig	Beton, Tiefe: ca. 3,0 m, Ø:1,0 m	aus den Ringfugen ragt viel Bitumen-Dichtmasse in den Schacht, der Auflagering ist gerissen, die Wandungsoberfläche des Konus ist sehr rau		Oldodur WS 56, Beschichtung mittels Sprüh-Schleuder-Verfahren			
				> 3,8 N/mm ²		1 Monat / > 1,8 N/mm ² / -	6 Monate / - / -	60 Monate / 1,7 N/mm ² / - geringfügige Ablösung der Beschichtung

Tabelle 8 (Fortsetzung)

Lfd. Nr.	Lage des Schachtes / Verkehrsbelastung	Schachtdaten (Material und Geometrie)	Zustand vor Beschichtung	Schachtansicht vor Sanierung	Beschichtungsmaterial, Applikationstechnik	Schachtansicht 1. Nachuntersuchung	Schachtansicht 2. Nachuntersuchung	Schachtansicht 3. Nachuntersuchung
				mittlere Abreißfestigkeit des Untergrundes		Beschichtungsalter/ mittlere Haftzugfestigkeit/ festgestellte Schäden	Beschichtungsalter/ mittlere Haftzugfestigkeit/ festgestellte Schäden	Beschichtungsalter/ mittlere Haftzugfestigkeit/ festgestellte Schäden
5	im Kreuzungsbereich einer viel befahrenen Straße (Straßen - BK III) / hoch	Mauerwerk, Tiefe: ca. 2,3 m, Ø: 0,85 m	Fugen sehr stark korrodiert, an Kanalanbindungen große Hohlstellen, überstehende Bitumenmasse	 > 1,4 N/mm ²	Oldodur WS 56, Beschichtung mittels Sprüh-Schleuder-Verfahren	 1 Monat / 0,5 N/mm ² / -	- nicht untersucht	 60 Monate / 0,3 N/mm ² / - Riss (unter Schachtrahmen) - Hohlstelle in Konusschräge)
6	im Grünstreifen neben einer Landstraße / niedrig	Beton und Mauerwerk, Tiefe: ca. 4,1 m, untere 0,4 m aus Mauerwerk, Ø:1,0 m	Betonfugen undicht, ansonsten Schacht in relativ gutem Zustand, das Mauerwerk ist stark durchfeuchtet, die Mauerwerksfugen sind korrodiert	 1,6 N/mm ²	Oldodur WS 56, Beschichtung mittels Sprüh-Schleuder-Verfahren	 1 Monat / 1,5 N/mm ² / -	 6 Monate / - / -	 60 Monate / 2,0 N/mm ² / - Häufung von Blasen im Schachtunterteil - Wassereindring durch eine Blase

Tabelle 8 (Fortsetzung)

Lfd. Nr.	Lage des Schachtes / Verkehrsbelastung	Schachtdaten (Material und Geometrie)	Zustand vor Beschichtung	Schachtansicht vor Sanierung	Beschichtungsmaterial, Applikationstechnik	Schachtansicht 1. Nachuntersuchung	Schachtansicht 2. Nachuntersuchung	Schachtansicht 3. Nachuntersuchung
				mittlere Abreißfestigkeit des Untergrundes		Beschichtungsalter/ mittlere Haftzugfestigkeit/ festgestellte Schäden	Beschichtungsalter/ mittlere Haftzugfestigkeit/ festgestellte Schäden	Beschichtungsalter/ mittlere Haftzugfestigkeit/ festgestellte Schäden
7	in einer mittelstark befahrenen Wohnstraße / niedrig	Beton und Mauerwerk, Tiefe: ca. 3,7 m, untere 0,8 m aus Mauerwerk, Ø:1,0 m bzw. ca. 1,0 x 1,0 m	Risse in Betonfertigteilen, ansonsten sind Betonteile in relativ gutem Zustand, das Mauerwerk ist an wenigen Stellen mit geringfügiger Ausdehnung feucht		Multitec, Beschichtung von Hand aufgesprüht		-	
				> 1,8 N/mm ²		1 Monat / 1,3 N/mm ² / -	nicht untersucht	36 Monate / 1,5 N/mm ² / -

Die Untersuchung der Polyurethanbeschichtungen zeigte ein kritisches Gesamtbild. Von sieben untersuchten Beschichtungen war lediglich eine als mängelfrei zu beurteilen und ließ keine Zustandsveränderungen über den Betrachtungszeitraum erkennen (vgl. Tabelle 8, lfd. Nr. 7). An einer weiteren Beschichtung (vgl. Tabelle 8, lfd. Nr. 4) waren zwei örtlich begrenzte Mängel festzustellen, die somit zu einer geringfügig schlechteren Zustandsbewertung führten. Im Wesentlichen handelte es sich dabei um Materialablösungen an einem Steigbügel und einem Kurzliner.

Insgesamt fünf Beschichtungen hingegen offenbarten einen deutlich schlechteren Zustand als bei vorangegangenen Untersuchungen. In nahezu allen Fällen lag dieser in Rissen und der mehr oder weniger stark ausgeprägten Ablösung der Beschichtung begründet, z. T. einhergehend mit messbarem Wassereindrang von bis zu 20 ml/s (vgl. Bild 31).



Bild 31 Beispiele für die Ablösung des Beschichtungsmaterials in Form von wassergefüllten Blasen mit Wasseraustritt im Schachtunterteil (links) und im Einstiegsbereich (rechts)

Dabei war eine Beschichtung bereits seit ihrer Applikation als stark mängelbehaftet eingestuft worden, da hier das Beschichtungsmaterial aufgrund eines Mischfehlers nicht vollständig aushärten konnte (vgl. Tabelle 8, lfd. Nr. 2). Zusätzlich ist das Beschichtungsmaterial im Beobachtungszeitraum an verschiedenen Stellen im Schacht gerissen und löste sich vom Untergrund ab (vgl. Bild 32).

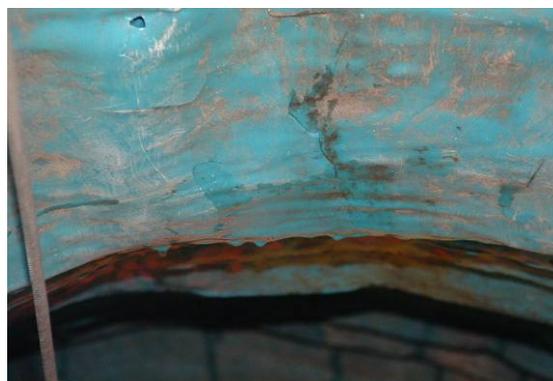


Bild 32 Nicht ausgehärtetes Beschichtungsmaterial (links) und großflächige Ablösung der Beschichtung im Einstiegsbereich (rechts)

5.2.4 Untersuchungsergebnisse

In diesem Abschnitt werden die Untersuchungsergebnisse von Altbeschichtungen diskutiert und bewertet. Dabei wird zwischen Altbeschichtungen aus Mörteln und Kunststoffen unterschieden. Wesentliche Erkenntnisse der Materialuntersuchungen zur Langzeitbeständigkeit sind berücksichtigt.

Mörtelbeschichtungen

Im Abschnitt 5.2.2.1 wurde der Zustand der Mörtelbeschichtungen dargestellt, bei denen aufgrund der bekannten Schachthistorie Zustandsveränderungen nach etwa drei bis fünf Jahren aufgezeigt werden konnten. Im Ergebnis zeigt sich dabei ein vergleichsweise uneinheitliches Bild, dass jedoch die gesamte Bandbreite an möglichen Veränderungen von Mörtelbeschichtungen über einen Zeitraum von bis zu fünf Jahren zeigt. In Tabelle 9 sind die absoluten Zustandsveränderungen an den Beschichtungen zusammengefasst.

Tabelle 9 Mörtelbeschichtungen mit bekannter Historie (vgl. Abschnitt 5.2.2.1)

Schacht Ifd. Nr.	Zustand der Beschichtung bei ...		Bemerkung
	... Erstunter- suchung	... Abschluss- untersuchung	
1	stark mängelbehaftet	geringfügig mängelbehaftet	Die mängelbehaftete Beschichtung wurde ersetzt. Die neue Beschichtung ist unterhalb des Schachtrahmens über den gesamten Umfang gerissen.
2	geringfügig mängelbehaftet	stark mängelbehaftet	Ausdehnung der Bereiche mit Mängeln an bzw. in der Beschichtung
3	mängelfrei	geringfügig mängelbehaftet	Die Beschichtung ist unterhalb des Schachtrahmens über den gesamten Umfang gerissen.
4	geringfügig mängelbehaftet	mängelfrei	Fehlstellen wurden nachgearbeitet
5	mängelfrei	stark mängelbehaftet	vollständiger Substanzverlust
6	mängelfrei	geringfügig mängelbehaftet	Weitere Reparaturarbeiten an dem Schacht führten zu einer allgemeinen Zustandsverschlechterung der Beschichtung und des Schachtes.
7	mängelfrei	geringfügig mängelbehaftet	Die Beschichtung ist unterhalb des Schachtrahmens über den gesamten Umfang gerissen.
8	mängelfrei	geringfügig mängelbehaftet	Die Beschichtung ist unterhalb des Schachtrahmens über den gesamten Umfang gerissen.
9	geringfügig mängelbehaftet	stark mängelbehaftet	Ausdehnung der Bereiche mit Mängeln an bzw. in der Beschichtung

An einem Schacht (vgl. Tabelle 9, Schacht 5) konnte ein vollständiger Substanzverlust festgestellt werden. Dies deutet auf eine falsche Materialwahl hin. Eine Kunststoffbeschichtung wäre hier möglicherweise geeigneter gewesen. Die Beschichtung hatte sich aufgelöst und die darunter liegende Reprofilierung zeigte auch schon erste Anzeichen einer fortschreitenden Karbonatisierung (vgl. [40]).

An zwei Schächten (vgl. Tabelle 9, Schacht 2, 9) trat eine Häufung von Rissen und Hohlstellen auf. Der Zustand der Schächte hat sich im Laufe des Beobachtungszeitraumes weiter verschlechtert. Bei Schacht 9 war ein deutlicher Wassereindrang zu verzeichnen. Hier konnte das Sanierungsziel einer dauerhaften Abdichtung nicht erreicht werden. Allerdings zeigte sich hier bei der ersten Untersuchung direkt nach Fertigstellung der Beschichtung bereits, dass der Mörtel vermutlich in seinem Aushärtprozess durch unzureichende Vorabdichtung gestört war. Bei Schacht 2 ist trotz der festgestellten Schäden an der Beschichtung kein Wassereindrang zu beobachten. Rasterelektronenmikroskopische Untersuchungen an Dünnschliffen des Materials ergaben, dass offensichtlich zur Verbesserung der Verarbeitbarkeit unzulässigerweise ein Luftporenbildner zugesetzt wurde (vgl. [40]). Dies könnte auch die Ursache für die zahlreichen Risse und Hohlstellen sein.

An vier Schächten (vgl. Tabelle 9, Schacht 1, 3, 7, 8) konnte ein Riss am Übergang zum Schachtrahmen festgestellt werden. Um einen derartigen Schaden zu vermeiden, empfiehlt es sich, den Schachtrahmen nicht zu beschichten. Erforderlichenfalls sollte dieser Bereich mit einer elastischen Abdichtung versehen werden. Abgesehen von diesem Schadensbild sind die Beschichtungen intakt und lassen keine Auffälligkeiten erkennen, die auf eine Einschränkung der Funktionsfähigkeit schließen lassen.

Bei den 10 bis 14 Jahre alten Beschichtungen ohne bekannte Sanierungshistorie konnten insbesondere Hohlstellen festgestellt werden. Grundwasserinfiltrationen wurden nicht beobachtet. Hierbei ist jedoch zu beachten, dass die Höhe des Grundwasserstandes zum Beobachtungszeitpunkt nicht bekannt war.

Unerwartet gering war bei allen diesbezüglich untersuchten Beschichtungen der Einfluss einer hohen Haftzugfestigkeit auf das Beschichtungsergebnis. Auch bei Haftzugfestigkeiten unter $0,5 \text{ N/mm}^2$ waren durchaus zufriedenstellende Gesamtergebnisse zu beobachten. Demgegenüber hatten lokal hohe Haftzugfestigkeiten nicht unbedingt ein gutes Beschichtungsergebnis zur Folge.

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

Polymere Beschichtungen

Im Abschnitt 5.2.3 wurde der Zustand aller untersuchten Kunststoffbeschichtungen dargestellt. Aufgrund der bekannten Schachthistorie konnten Zustandsveränderungen an den Beschichtungen nach etwa drei bis fünf Jahren aufgezeigt werden. Im Ergebnis zeigt sich dabei ein vergleichsweise einheitliches Bild. In Tabelle 10 sind die absoluten Zustandsveränderungen an den Beschichtungen mittels Ampelfarben zusammengefasst.

Tabelle 10 Polymere Beschichtungen mit bekannter Historie (vgl. Abschnitt 5.2.3)

Schacht Ifd. Nr.	Zustand der Beschichtung bei ...		Bemerkung
	... Erstunter- suchung	... Abschluss- untersuchung	
1	geringfügig mängelbehaftet	stark mängelbehaftet	Ausdehnung der Bereiche mit Mängeln (insbes. Ablösung der Beschichtung)
2	stark mängelbehaftet	sehr stark mängelbehaftet	neu entstandene Schäden (insbes. Ab- lösung der Beschichtung), Beschich- tungsmaterial war von Beginn an nicht ausgehärtet, Riss am Schachtrahmen
3	mängelfrei	stark mängelbehaftet	neu entstandene Schäden (Ablösung der Beschichtung mit Wassereindrang), Riss am Schachtrahmen
4	mängelfrei	geringfügig mängelbehaftet	lokale geringfügige Ablösung der Be- schichtung an zwei Stellen
5	mängelfrei	stark mängelbehaftet	großflächige Ablösung der Beschich- tung, Riss am Schachtrahmen
6	mängelfrei	stark mängelbehaftet	neu entstandene Schäden (Ablösung der Beschichtung mit Wassereindrang)
7	mängelfrei	mängelfrei	-

An drei Schächten (vgl. Tabelle 10, Schacht 2, 3, 5) konnte ein Riss am Übergang zum Schachtrahmen festgestellt werden. Um einen derartigen Schaden zu vermeiden, empfiehlt es sich, den Schachtrahmen nicht zu beschichten. Erforderlichenfalls sollte dieser Bereich mit einer elastischen Abdichtung versehen werden.

An einem Schacht (vgl. Tabelle 10, Schacht 2) konnte festgestellt werden, dass vermutlich die Komponenten der Beschichtung nicht den Vorgaben entsprechend vermischt wurden. Das Material härtete von Beginn an nicht vollständig aus. Diese Vermutung wurde durch Infrarot-Spektroskopische Untersuchungen bestätigt (vgl. [41]).

An fast allen beobachteten Schächten (vgl. Tabelle 10, Schacht 1 bis 6) konnten Ablösungen der Beschichtung festgestellt werden. Diese vergrößerten sich zum Teil im Laufe des Beobachtungszeitraumes von bis zu 5 Jahren. Bei zwei Schächten (Schacht 3 und 6) konnte eindringendes Grundwasser festgestellt werden. Die Ablö-

sungen konnten sowohl auf Beton als auch auf Mauerwerk beobachtet werden. Auch lokal hohe Haftzugfestigkeiten von über $1,5 \text{ N/mm}^2$ konnten dies nicht verhindern.

Zusammenfassend bleibt festzuhalten, dass bei fast alle betrachteten Beschichtungen deutliche Verschlechterungen zu verzeichnen sind. Insbesondere die Ausdehnung von bereits direkt nach der Beschichtung vorhandenen Hohlstellen stellt z. T. trotz lokal hoher Haftzugfestigkeiten ein großes Problem dar. Ein gleichmäßig guter Verbund scheint hier von ganz besonderer Bedeutung zu sein. Aufgrund der zeitlichen Entwicklung der Schäden ist wohl bei polymeren Beschichtungen besonderes Augenmerk auf die Gewährleistungsabnahme zu legen.

5.3 Begleitung von Sanierungsmaßnahmen an Abwasserschächten

5.3.1 Überblick

Zur Ermittlung von Einsatzgrenzen und relevanten Einflussfaktoren auf die Qualität von Injektions- bzw. Abdichtungsmaßnahmen wurden entsprechende Sanierungsarbeiten am Schachtkörper und an Rohranbindungen in situ durch Mitarbeiter des IKT begleitet. Die Auswahl der Baustellen erfolgte im Wesentlichen nach den jeweils eingesetzten Materialien, um nach Möglichkeit alle Materialgruppen, z.B. Schäume, Harze und Gele auf polymerer Basis sowie Zementleime zu berücksichtigen. Darüber hinaus sollte anhand der Baustellen auch die Eignung der Verfahren für einen Einsatz im Rahmen der Großversuche im IKT überprüft werden.

Unmittelbar nach Abschluss der Sanierungsarbeiten und ein weiteres Mal nach längstmöglicher Dauer, welche die Projektlaufzeit zuließ, wurden die Abdichtungen hinsichtlich ihrer Dichtwirkung optisch überprüft. Insgesamt wurden drei Abdichtungsmaßnahmen an zwei Mauerwerkschächten und einem Betonschacht begleitet. An weiteren drei Schächten konnte die Abdichtung undichter Rohranbindungen verfolgt werden.

5.3.2 Sanierung undichter Rohreinbindungen

Die Abdichtung von undichten Rohreinbindungen stellt eine vergleichsweise häufig vorkommende Sanierungsaufgabe an Abwasserschächten dar. Dabei stellen die Rohranbindungsbereiche aufgrund ihrer Lage - sofern vorhanden tritt in diesen Bereichen eines Schachtes der höchste anstehende Wasserdruck auf - und Platzverhältnissen zum Arbeiten einen durchaus komplizierten Bereich dar.

Unter Berücksichtigung dieser Randbedingungen begleiteten Mitarbeiter des IKT an drei Schächten aus Beton und Mauerwerk mit verschiedenen Rohrwerkstoffen die von Fachfirmen durchgeführten Sanierungsarbeiten zur Abdichtung der undichten Rohranbindungen. Des Weiteren ist der Erfolg der Sanierungen mit einem zeitlichen Abstand von bis zu 16 Monaten erfasst worden. Die Nachuntersuchungen zeigten im Wesentlichen keine Auffälligkeiten, die sanierten Rohranbindungen erschienen optisch dicht und waren weitgehend in demselben Zustand wie unmittelbar nach der Sanierung.

Die wesentlichen Kenndaten zu den Sanierungsobjekten sind in Tabelle 11 enthalten und stellen zum einen die Ausgangssituation vor bzw. unmittelbar nach Beginn der Sanierungsarbeiten und zum anderen die verbrauchten Materialmengen und das Sanierungsergebnis dar. Es zeigte sich, dass die Sanierungsfirmen mit den vorhandenen Arbeitsgeräten und Abdichtungsmaterialien den gewünschten Sanierungserfolg herbeiführen konnten.

Tabelle 11 Abdichtung von Rohreinbindungen

Ifd. Nr.	Werkstoffe Sanierungsobjekte		Undichtigkeit, Wassereindrang	Sanierungseckdaten	Sanierungsergebnis
	Schacht	Haltung			
1	Beton	Steinzeug		Injektion von cft-Harz (Polyurethan): ca. 18 kg Ergelit 10SD (Blitzmörtel): ca. 1 kg Dauer: ca. 2,75 h	
			Undichtigkeit zw. Rohr und Schacht (Ringspalt)		
2	Beton	nicht erkennbar, da mit Liner saniert		Injektion von Köster KB-PUR Gel (Polyurethan): ca. 10 kg Ergelit KT (Reparaturmörtel): ca. 40 kg Dauer: ca. 4,0 h	
			Wassereindrang (Ringraum) zw. Liner und Schacht		
3	Mauerwerk	Steinzeug und Beton		Injektion von Ergelit KBi (Zementleim): ca. 185 kg Dauer: ca. 10,0 h	
			Wassereindrang zw. Rohr und Schacht (Ringraum) sowie aus Mauerwerkfugen		

5.3.3 Abdichtung undichter Schachtkörper

Die Abdichtung partiell undichter Schachtkörper beinhaltet eine große Bandbreite von möglichen Schadensbildern. Die Spanne reicht von lokal begrenzten Undichtigkeiten, beispielsweise in Ringfugen von Betonschächten, bis hin zu flächig und nicht zweifelsfrei lokalisierbarem Feuchtigkeits- bzw. Wassereindrang in Mauerwerk-schächten (vgl. Bild 33).



Bild 33 lokale Undichtigkeiten in einer Ringfuge eines Betonfertigteil-Schachtes (links), flächig durchfeuchtetes Mauerwerk (rechts)

Um die generelle Anwendbarkeit einzelner Abdichtungsmaterialien und -verfahren unter den vorherrschenden Randbedingungen sowie deren Eignung für die nachfolgenden Großversuche festzustellen, begleiteten Mitarbeiter des IKT die Abdichtungsarbeiten an drei verschiedenen Schächten.

Die wesentlichen Kenndaten zu den Sanierungsobjekten sind in Tabelle 12 enthalten und stellen zum einen die Ausgangssituation vor bzw. unmittelbar nach Beginn der Sanierungsarbeiten und zum anderen die Sanierungsdauern und verbrauchten Materialmengen dar. Mit Blick auf die abzudichtenden Mauerwerkschächte ist zu ergänzen, dass die Abdichtung zum Zweck einer nachfolgenden Beschichtung erfolgte.

Im Ergebnis zeigt sich, dass die Sanierung der Ringfuge im Schacht aus Betonfertigteilen (Tabelle 12, lfd. Nr. 2) über den Beobachtungszeitraum erfolgreich war. Darüber hinaus war die Vorabdichtung im Mauerwerkschacht (Tabelle 12, lfd. Nr. 3) im Vorfeld der Mörtelbeschichtung offensichtlich ebenfalls ausreichend, jedoch führte die Abdichtung und Beschichtung nur der unteren 60 cm Schachtwandung zu einem Grundwasseranstieg außerhalb. Dieser Anstieg wiederum ließ Undichtigkeiten am Schachtbauwerk oberhalb der bisher ausgeführten Sanierung erkennen.

Eine wassergefüllte Blase in der Polyharnstoff-Beschichtung des Mauerwerkschachtes (Tabelle 12, lfd. Nr. 1) sowie weitere Undichtigkeiten in der Beschichtung zeigen die hier nicht ausreichende Vorabdichtung des Bauwerks.

Tabelle 12 Abdichtung von Schachtkörpern

Ifd. Nr.	Schachtwerkstoffe	Undichtigkeit, Wassereindrang	Sanierungs Eckdaten	Sanierungsergebnis
1	Mauerwerk	 <p>flächig feuchtes / undichtes Mauerwerk im Schachtunterteil (bis ca. 1,5 m Höhe über Berme; Grundriss ca. 1,6 x 1,6 m)</p>	<p>MC-Injekt GL-93 (Acrylatgel): ca. 120 kg</p> <p>ombran W (Stopfmörtel): ca. 25 kg</p> <p>Dauer: ca. 1,5 Tage (nur Abdichtung, Schätzwert, da Arbeiten mehrfach unterbrochen, um weiteren Feuchteindrang vor Beschichtung zu erkennen)</p>	 <p>Wassergefüllte Blase in der Polyharnstoffbeschichtung</p>
2	Beton	 <p>undichte Schachtringfuge</p>	<p>Köster KB-PUR Gel (Polyurethan): ca. 5 kg</p> <p>Ergelit KT: ca. 12 kg</p> <p>Dauer: ca. 2,3 h</p>	
3	Mauerwerk	 <p>flächig undichtes Mauerwerk (Schachtbauwerk, Grundriss ca. 2 x 2 m, Höhe Abdichtung ca. 0,6 m über Berme)</p>	<p>MC-Konudur 208 (Polyurethan): ca. 150 l</p> <p>MC-Injekt (Polyurethan): ca. 450 l</p> <p>ca. 3 Tage (einschließlich Aufbau Wasserhaltung zzgl. Beschichtungsarbeiten)</p>	 <p>Undichtigkeiten oberhalb der durchgeführten Abdichtung</p>

5.3.4 Untersuchungsergebnisse

Im Ergebnis zeigen die Sanierungsbegleitungen deutlich, dass Abdichtungsarbeiten an Abwasserschächten einen hohen zeitlichen, personellen und materiellen Aufwand erfordern. Dabei stellt sich, auch bei z. T. hohem Schwierigkeitsgrad der Sanierungsaufgabe, der langfristige Erfolg nicht immer automatisch ein. Hier stehen insbesondere die zu sanierenden Mauerwerkschächte im Fokus der Betrachtungen.

Die beiden unter Abschnitt 5.3.3 dargestellten, sanierten Mauerwerkschächte zeigen anschaulich, dass trotz der getätigten Aufwendungen der Sanierungserfolg nicht zu 100 % erzielt werden konnte. Im ersten Fall wurden durch die partielle Abdichtung im Bereich des sanierten Schachtunterteils zwar Infiltrationen zunächst erfolgreich unterbunden; aufgrund der dann fehlenden Drainagewirkung stieg der Grundwasserstand allerdings über die Höhe des abgedichteten Bereichs an, so dass schließlich Wasser durch nicht erkannte Undichtigkeiten in der oberen Schachtwandung eindrang. Auch im zweiten Mauerwerkschacht führte der Anstieg des Grundwassers bzw. das Versagen der Vorabdichtung zu einem Ablösen der Beschichtung mit Blasenbildung.

6 Großversuche im Maßstab 1:1

6.1 Versuchsaufbau und Versuchsdurchführung

Im Großversuchsstand des IKT wurden vergleichende Untersuchungen unter definierten, für alle Abdichtungs- und Beschichtungsverfahren gleichen Randbedingungen im Maßstab 1:1 durchgeführt. Diese Randbedingungen wurden aufgrund von Erfahrungen aus früheren Forschungsvorhaben und Qualitätssicherungsmaßnahmen sowie den in Kapitel 5 beschriebenen In-situ-Maßnahmen abgeleitet und im Rahmen von Lenkungskreissitzungen mit den beteiligten Netzbetreibern abgestimmt. Die Leistungsfähigkeit und Robustheit der Verfahren sowie die Variation geometrischer und verfahrenstechnischer Kennwerte und äußerer Belastungen stand dabei im Vordergrund.

Kernstück des Großversuchsstandes ist eine Stahlwanne von 15 m Länge sowie jeweils 6 m Breite und Höhe. Im Rahmen des Projektes wurden in den Versuchstand insgesamt 20 Schachtbauwerke aus Betonfertigteilen in einem Kies-Sand-Gemisch mit einem Größtkorn von 8 mm eingebaut. Die Schächte besaßen einen Innendurchmesser von 1000 mm (Nennweite DN 1000) und eine Gesamtbauhöhe von etwa 5,6 m. In die Schachtunterteile wurden Gerinne und Schachtfutter mit der Nennweite DN 300 eingebaut. An die eingebauten Schachtfutter wurden Steinzeug- und PVC-KG-Rohre angeschlossen. Auf die Schachtunterteile wurden insgesamt sechs Betonfertigteilringe mit einer Bauhöhe von 500 mm und auf etwa halber Höhe ein Schachtring mit einer Bauhöhe von 1000 mm aufgesetzt. Letzterer verfügte wiederum über zwei Seitenzuläufe der Nennweite DN 150 zur Aufnahme von Steinzeug- und PVC-KG-Rohren. Nach oben schließt ein Schachtkonus das Bauwerk ab. Alle Bauteile bis auf die Schachtunterteile verfügten über werksseitig eingebaute Steigbügel.

Die Betonfertigteile wurden als Neuware geliefert, dem Versuchskonzept entsprechend vorbereitet und in den Versuchsstand eingebaut. Vor dem Einbau wurde stichprobenhaft die Druckfestigkeit von etwa 60 % der Fertigteile mittels Schmidt-Hammer gemessen. An etwa 20 % aller Bauteile wurden zusätzlich Abreißprüfungen an der Außenseite zur Bestimmung der Oberflächenzugfestigkeit durchgeführt. Die Ergebnisse der Festigkeitsprüfungen zeigt Tabelle 13.

Tabelle 13 Festigkeitswerte der Schachtringe aus Betonfertigteilen

	Druckfestigkeit [N/mm ²]	Oberflächenzugfestigkeit [N/mm ²]
Schachtringe h = 500 mm	44,9 ± 6,2	> 2,7 ± 0,8
Schachtringe h = 500 mm	47,7 ± 7,7	> 2,4 ± 0,5
Schachtunterteile	56,1 ± 5,5	Nicht ermittelt

Die Ergebnisse der Qualitätsprüfungen zeigen, dass die Festigkeiten der zu sanierenden Betonbauteile in jedem Fall ausreichend sind, um insbesondere auch die Forderungen der Materialhersteller nach einem beschichtungs- und damit tragfähigen Untergrund zu erfüllen.

Insgesamt elf der Schachtbauwerke waren für Beschichtungsmaßnahmen vorgesehen. Weitere sieben wurden mit unterschiedlichen Verfahren abgedichtet. Zwei Schächte dienen als Pumpschächte zur Entwässerung des Schacht-systems. Die Lage und der Aufbau der Schächte im Versuchsstand können Bild 34, Bild 35 und Bild 36 entnommen werden.

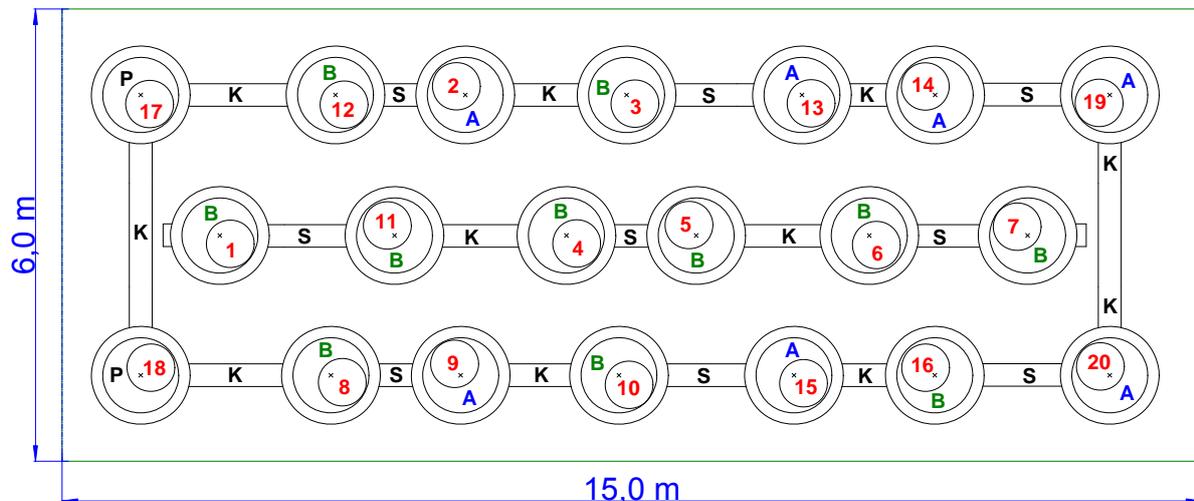


Bild 34 Skizze des Schachtaufbaus im Großversuchsstand – Grundriss
 A: Schacht für Abdichtungsmaßnahmen; B: Schacht für Beschichtungsmaßnahmen; P: Pumpschacht; K: PVC-Rohrleitung; S: Steinzeug-Rohrleitung

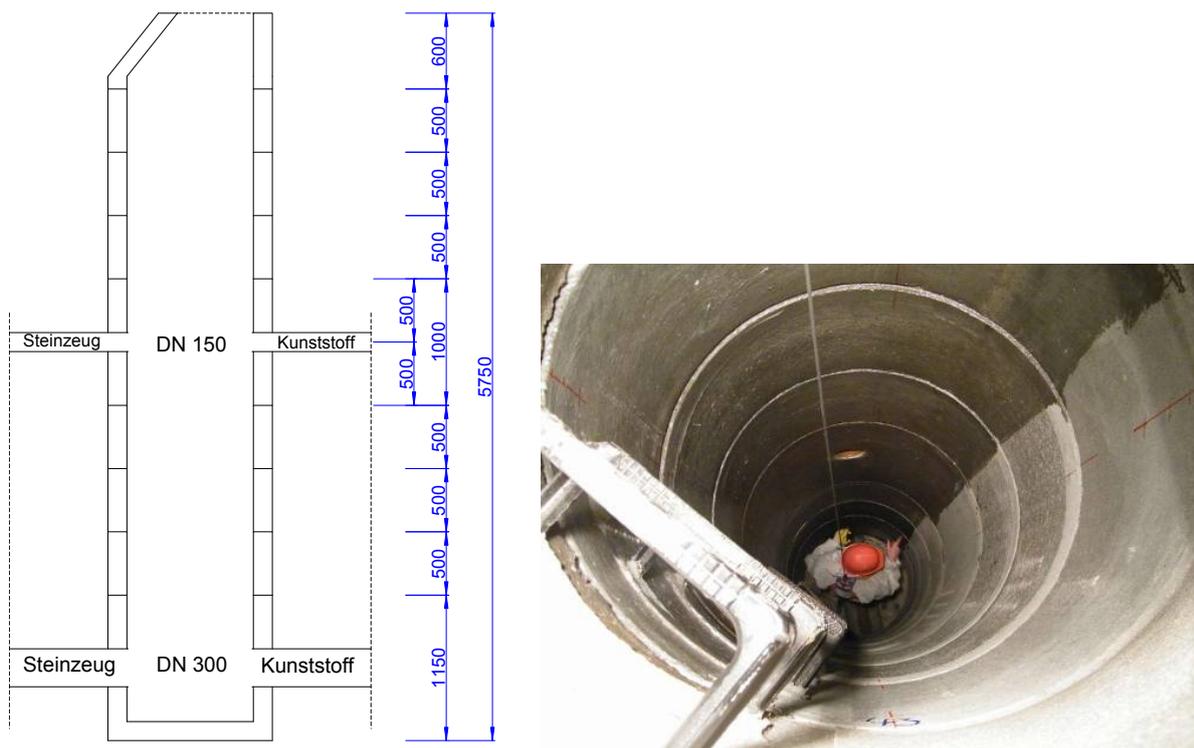


Bild 35 Schachtaufbauwerk im Großversuchsstand – Schnitt (links); Blick in einen fertiggestellten Schacht (rechts)



Bild 36 Einbau der Schächte im Großversuchsstand: Untere Rohrlage DN 300 (links); Mittlere Rohrlage DN 150 (mitte); Fertiggestellter Einbau (rechts)

Vor und während des Einbaus der Betonfertigteile wurden unterschiedliche, geometrische Schäden in die Schachtringe und -unterteile eingebaut. Diese simulierten lokale und flächige Undichtigkeiten sowie undichte Schachtringfugen. Dabei handelt es sich im Wesentlichen um Bohrlöcher in unterschiedlicher Größe und Anzahl. Es wurden drei verschiedene Schadenstypen gemäß Tabelle 14 unterschieden. Diese Schäden wurden in den zu beschichtenden Schächten in doppelter Anzahl in jedes Betonfertigteil eingebaut (vgl. Bild 37), einmal auf der präparierten und einmal auf der unpräparierten Seite. Jede Schachtinnenwand war vor der Untergrundvorbereitung halbseitig mit einem Pflanzenfett präpariert worden (vgl. Bild 35, rechts), die andere

Seite hingegen wurde nicht präpariert. Somit lagen zwei unterschiedliche Qualitäten des Untergrundes vor. Diese wurden im Wesentlichen bei der Ergebnisdarstellung von Beschichtungsinspektionen sowie deren Auswertungen berücksichtigt und dementsprechend - sofern es sich um die präparierte Seite handelte - mit einem „p“ gekennzeichnet.

Tabelle 14 Schadenstypen in den Betonfertigteilen

Schadensart (Abkürzungszeichen)	Anzahl Bohrlöcher	Bohrlochdurchmesser	Bilder der Schadstellen
„Lokale Schädigung“ (LS)	je 1	10 mm	
„Flächige Undichtigkeit“, mit Trennmittel (FU)	je 9	5 mm	
„Schädigung Schachtringfuge“ (SF)	je 4	6 mm	

Die Wasserdrücke an den Schadstellen variierten über die Schachtringe entsprechend deren Einbauhöhe. Zu Erhöhung der Laststufenzahl an den Fugen wurden sechs Schachtringe von 500 mm Höhe eingesetzt. Einen Überblick über die Verteilung und Ausprägung der Schäden in den zur Beschichtung bestimmten Schächten geben die Skizzen im Bild 37.

In die zur Abdichtung bestimmten Schächte wurde nur die Hälfte der Schäden eingebaut, da auf eine Einfettung verzichtet werden konnte und unverhältnismäßig hohe Wasserzuflüsse zu vermeiden waren. Durch eine alternierende Ausrichtung der Fehlstellen am Umfang wurde auch die gegenseitige Beeinflussung von Injektionsmaßnahmen reduziert: Die Fehlstellen „Lokale Schädigung“ (LS) liegen bei etwa

3 Uhr² am Schachumfang, die Fehlstellen „Flächige Undichtigkeit“ (FU) hingegen bei 9 Uhr². Die Schädigungen an den Ringfugen (SF) beschränkten sich auf das Umfeld des Steigbügelgangs, bei etwa 1 und 11 Uhr². Alle Fehlstellen wurden in der gleichen Höhenlage eingebaut, wie dies auch bei den Schachtringen für die Beschichtung vorgesehen war.

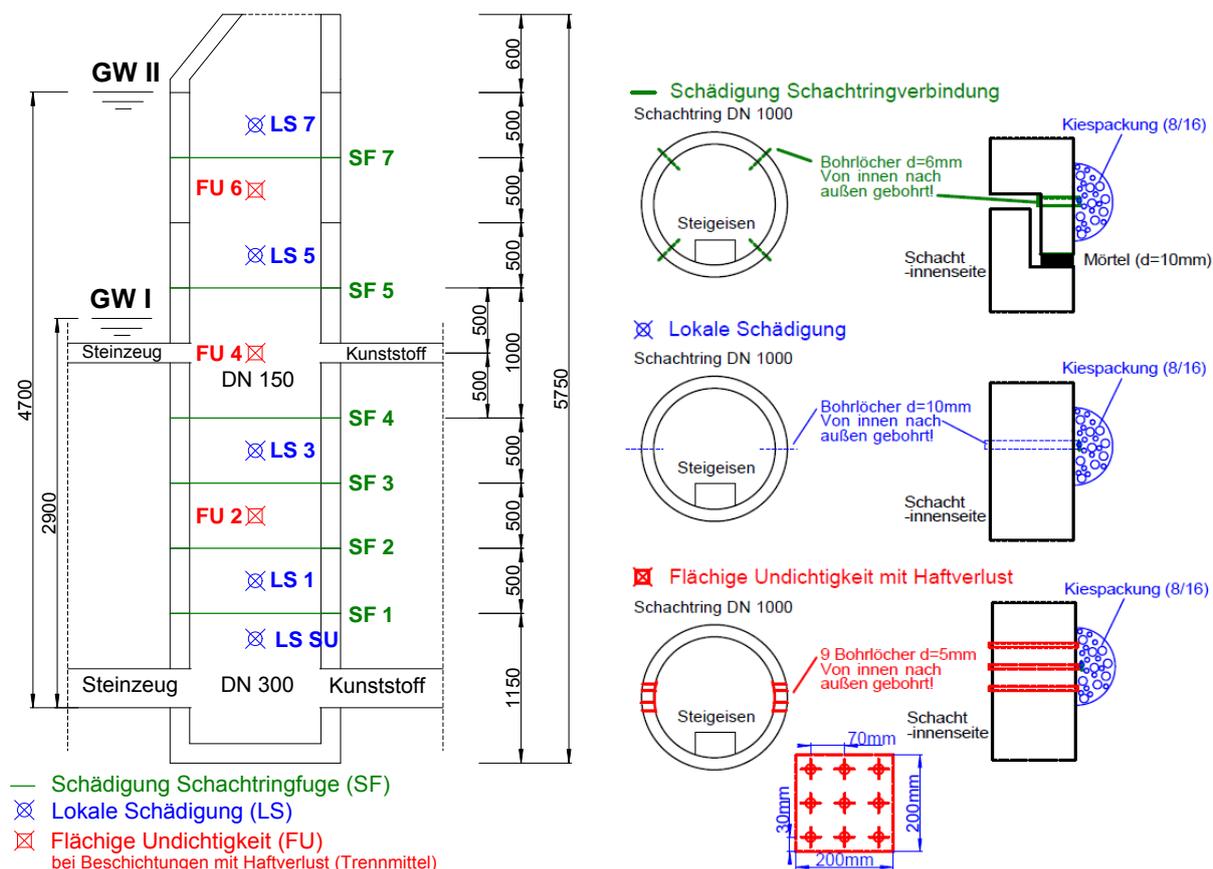


Bild 37 Schäden in zur Beschichtung bestimmten Schächten: Seitenansicht des Schachtkörpers (links) und Schadensbilder (rechts)

Neben den beschriebenen geometrischen Schäden an den Schachtkörpern wurden darüber hinaus die Rohreinbindungsbereiche für den Einsatz der Abdichtungsverfahren im Vorfeld geschädigt. Hier wurden die Dichtungen in den betrachteten Rohranbindungsbereichen partiell entfernt. Die Dichtungen der Steinzeug- und Kunststoffrohre der Nennweite DN 300 wurden jeweils auf etwa der Hälfte ihres Rohrumfanges herausgetrennt (vgl. Bild 38, rechts). Um den potenziellen Wassereindrang für die Dauer der Sanierung mit Blick auf die Pumpenleistung auf ein vertretbares Maß zu begrenzen, wurden die Dichtungen der Seitenzuläufe DN 150 jeweils im Scheitel- und Sohlbereich lediglich auf einer Bogenlänge von ca. fünf Zentimetern aus dem Schachtfutter herausgenommen (vgl. Bild 38, links).

² ausgehend vom Steigbügelgang bei 12 Uhr



Bild 38 Schäden an den Rohreinbindungen: bereichsweise fehlende Dichtung am Anschluss für ein Kunststoffrohr DN 150 (links) und an einem Steinzeugrohr DN 300 (rechts)

Über die eingebauten Schäden hinaus wurden bei den **Schächten für die Beschichtungsmaßnahmen** folgende versuchstechnische Besonderheiten umgesetzt:

1. Simulation von Verschmutzungen der Schachtwand:

Drei Tage vor Beginn der Sanierungsarbeiten wurde jeweils die rechte Schachtwandung - vom Steigbügelgang bei 12 Uhr aus gesehen - mit Pflanzenfett bestrichen, um eine Verschmutzung der Schachtwand zu simulieren (vgl. Bild 39, links oben).

2. Simulation einer Reprofilierung:

Um den Eintrag von Sand und ein Zusetzen der Bohrlöcher an den Schadstellen zu vermeiden bzw. zu reduzieren, wurden Schaumstoff-Pfropfen vor Beginn der Beschichtungsarbeiten in diese eingebracht. Schaumstoff-Bänder bzw. Hinterfüll-Schnüre sind in die offenen Schachtring-Fugen eingelegt worden, um einen vollständigen Verschluss der Fugen z.B. mit Reprofilierungsmörtel zu unterbinden. Auf diese Weise soll die Frage beantwortet werden, wie leistungsfähig die Beschichtungen in Bezug auf ihre Abdichtwirkung nach einem Versagen etwaiger Vorabdichtungen bzw. Reprofilierungen in diesen Bereichen sind. (vgl. Bild 39, rechts oben und links unten).

3. Zeitraffereffekte:

Alle Beschichtungen werden bei vergleichbaren Sanierungsrandbedingungen ohne Vorabdichtung und Reprofilierung eingebaut, da zu diesem Zeitpunkt kein Grundwasserstand simuliert wird. Anschließend wird der Grundwasserstand im Vergleich zu In-situ-Bedingungen schnell angehoben, die Beschichtung unmittelbar mit Wasserdruck belastet und der Grundwasserstand kontinuierlich und über einen längeren Zeitraum (5 Monate) gehalten (vgl. Abschnitt 3).

4. Simulation eines Verbundverlustes:

Nach Abschluss der Untergrundvorbereitung und vor Beginn der Beschichtungsarbeiten wurde ein Trennmittel auf den Bereich der Schadstellen „Flächige Undichtigkeit“ (FU) aufgetragen, das auch im Zuge der Sanierungsarbeiten

nicht entfernt werden darf (vgl. Bild 39, rechts unten). Dies diente zur Untersuchung des Verhaltens von Stellen mit Verbundverlust zwischen Beschichtung und Untergrund. So sollte die Robustheit der einzelnen Beschichtungsmaterialien für den Fall untersucht werden, dass ein vollständiger Haftverbund z.B. aufgrund mangelhafter Oberflächenvorbereitung nicht erreicht werden konnte.

5. Belastungszeitpunkt:

Der Großversuchsstand wurde erst 28 Tage nach der zuletzt eingebauten Mörtelbeschichtung geflutet. Hierdurch wurde eine ausreichende Aushärtung der Materialien gewährleistet.

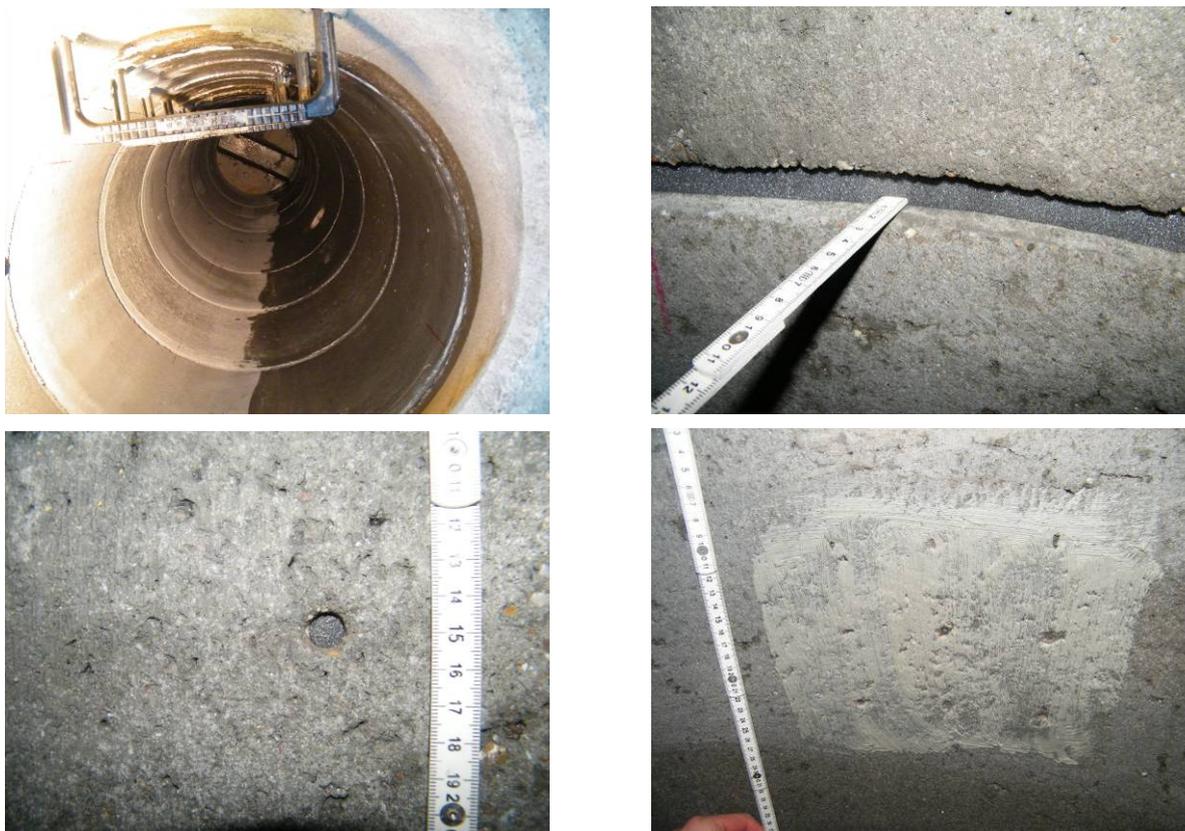


Bild 39 Versuchstechnische Besonderheiten bei der Schachtbeschichtung: halbseitig eingefetteter Schacht (links oben); Schaumstoff in einer Ringfuge (rechts oben); Schaumstoff-Pfropfen in einem Bohrloch (links unten); aufgestrichenes Trennmittel (rechts unten)

Nach dem Einbau und der Aushärtung der Beschichtungen sowie deren optischer Inspektion wurde der Wasserstand im Großversuchsstand stufenweise angehoben. Bezugspunkt für die Höhe des Wasserstandes war die Sohle der unteren Rohreinbindung mit der Nennweite DN 300. Untersucht wurden zwei Grundwasserstände (s. a. Bild 37, links). Folgende **Grundwasserphasen** wurden im Rahmen des Projektes durchlaufen:

- **GW 0:**

Diese Phase beschreibt den Zeitraum vor der Flutung des Versuchsstandes. Im Wesentlichen lag diese „Wartezeit“ begründet in der 28-tägigen Aushärtedauer

der zuletzt eingebauten Mörtelbeschichtung. Die eingebauten Beschichtungen wurden in dieser Phase optisch inspiziert und auf Hohlstellen abgeklopft.

- **GW I – Kurzeit:**

Zunächst wurde der Wasserstand auf eine Höhe von 2,9 m über der Sohle der unteren und dementsprechend etwa 0,3 m über der Sohle der oberen Rohreinbindung angehoben und dann eine Woche lang gehalten. In dieser Zeit sind die Beschichtungen optisch inspiziert und erste Abdichtungen an Rohreinbindungen durchgeführt worden.

- **GW II – Kurzzeit:**

Anschließend wurde der Wasserstand auf eine Höhe von 4,7 m über der Sohle der unteren und dementsprechend etwa 2,1 m über der Sohle der oberen Rohreinbindung angehoben (GW II). Dieser ist dann wiederum eine Woche lang gehalten worden. In dieser Zeit wurden die Beschichtungen und die Abdichtungen der Grundwasserstufe I (GW I) optisch inspiziert und weitere Abdichtungen an Rohreinbindungen und jetzt auch an den Schachtkörpern durchgeführt.

- **GW II – Langzeit:**

Schließlich wurde der Grundwasserstand II über einen Zeitraum von 5 Monaten gehalten. In diesem Zeitraum sind alle Beschichtungen und Abdichtungen optisch inspiziert und Veränderungen aufgezeichnet worden.

Die Vielzahl der Schäden machte zu Versuchsbeginn eine temporäre Abdichtung der Schadstellen mittels Holzdübeln unumgänglich (vgl. Bild 40, links), um die Wasserhaltung im Versuchsaufbau kontrollierbar zu halten. Während der einzelnen Abdichtungen sind diese Holzdübel sukzessive durch die Mitarbeiter der Sanierungsfirmen entfernt worden (vgl. Bild 40, rechts).



Bild 40 *Temporäre Abdichtung der vorab eingebauten Schadstellen mit Holzdübeln: Lage der Schadstellen im Schacht (links); Entfernen des Dübels vor der Sanierung (rechts)*

Bei einem Wasserstand von 4,7 m ergaben sich Infiltrationsmengen durch die provozierten Schadstellen in Höhe von etwa 1,5 l/s in den für die Abdichtungen vorgesehenen Schächten (vgl. Bild 41).



Bild 41 Wassereindrang durch die Schadstellen: Entnahme der Holzdübel (links) und Messung der infiltrierenden Wassermenge (rechts)

Einen Eindruck vom Wassereindrang durch die Schadstellen an den Rohreinbindungen DN 300 zeigt Bild 42. Binnen Sekunden stieg der Wasserstand im Gerinne auf ca. 25 cm an, so dass der Wassereindrang je undichter Rohranbindung zu etwa 10 l/s abgeschätzt werden konnte - bei einem Wasserstand außen von ca. 2,9 Meter über Rohrsohle (GW I).



Bild 42 Undichte Rohranbindung DN 300 mit Wassereindrang durch Schadstellen, Absperrblase wurde bei Sanierung entfernt (links); Starker Wassereindrang unmittelbar nach dem Entfernen der Blase (rechts)

Der Wassereindrang an den Seitenzuläufen DN 150 war deutlich geringer, der Wasserstand außen über Rohrsohle betrug hier lediglich etwa 0,3 Meter (Bild 43).



Bild 43 Wassereindrang durch undichte Rohranbindungen DN 150: Steinzeug (links) und Kunststoff (rechts)

Unter Berücksichtigung der Höhenlage der unterschiedlichen Schäden und der beiden Grundwasserstände I und II sind die herrschenden Wasserdrücke auf die Schadstellen in Tabelle 15 zusammengestellt.

Tabelle 15 Wasserdruckbelastung der Schadstellen

Schadenstyp	Schadstelle	Wasserdruck infolge GW I	Wasserdruck infolge GW II
„Schädigung Rohreinbindung“	DN 150	0,3 mWs	2,1 mWs
	DN 300	2,9 mWs	4,7 mWs
„Flächige Undichtigkeit“ (FU)	FU 2	1,5 mWs	3,3 mWs
	FU 4	0,2 mWs	2,0 mWs
	FU 6	entfällt	0,8 mWs
„Lokale Schädigung“ (LS)	LS SU	2,4 mWs	4,2 mWs
	LS 1	1,9 mWs	3,7 mWs
	LS 3	0,9 mWs	2,7 mWs
	LS 5	entfällt	1,2 mWs
	LS 7	entfällt	0,2 mWs
„Schädigung Schachtringfuge“ (SF)	SF 1	2,2 mWs	4,0 mWs
	SF 2	1,7 mWs	3,5 mWs
	SF 3	1,2 mWs	3,0 mWs
	SF 4	0,7 mWs	2,5 mWs
	SF 5	entfällt	1,5 mWs
	SF 7	entfällt	0,5 mWs

mWs = Meter Wassersäule

Der gesamte Ablauf der Großversuche mit den einzelnen Versuchs- und Grundwasserphasen ist im Bild 44 zusammengefasst.

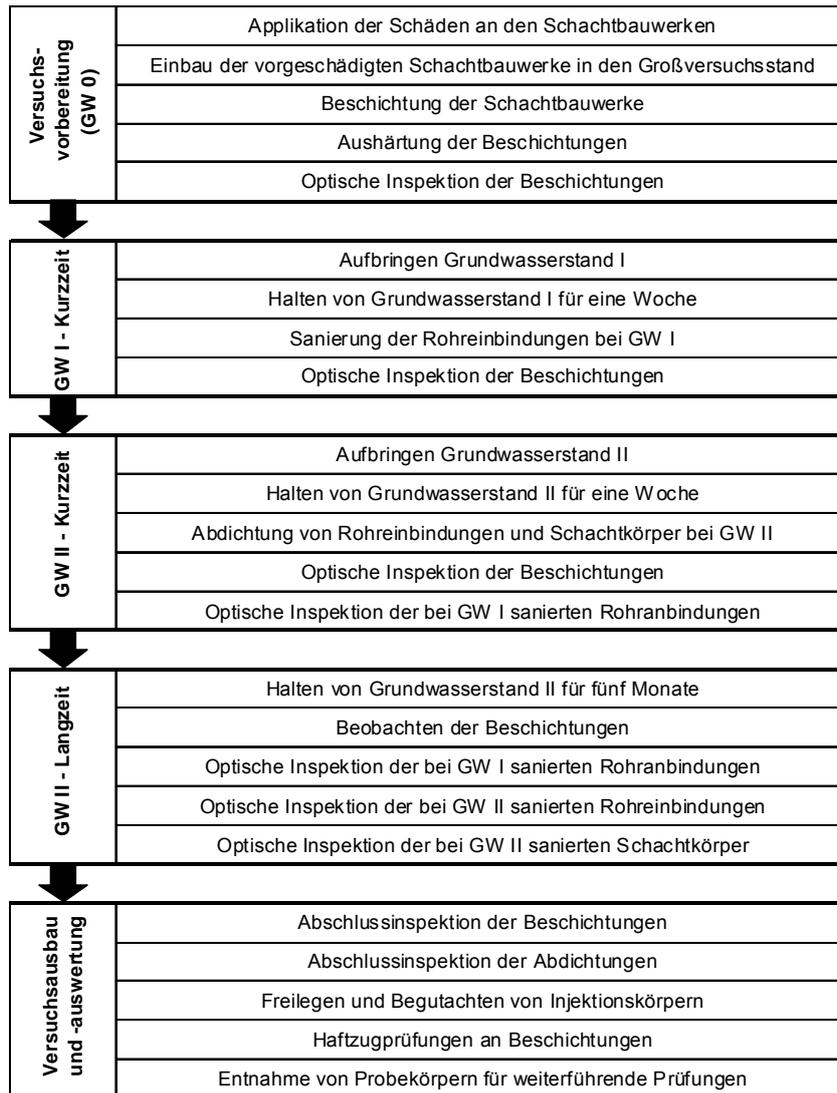


Bild 44 Ablauf der Großversuche

6.2 Beschichtungsmaßnahmen

6.2.1 Versuchsprogramm

Die Beschichtungen wurden von Sanierungsfirmen eingebaut, die seitens der Materialhersteller aufgrund von ausreichender Erfahrung im Umgang mit dem jeweiligen Produkt dem IKT empfohlen worden waren. Es wurden insgesamt elf Beschichtungen in elf Schächte eingebaut; ein Beschichtungsmaterial wurde zweimal, jedoch unter Anwendung von zwei unterschiedlichen Verfahrenstechniken appliziert. Eine Beschreibung der einzelnen Beschichtungsprodukte und deren Anwendung kann den Abschnitten 6.2.1 und 6.2.3 entnommen werden. Der Zeitraum zum Einbau sämtlicher Beschichtungen betrug ca. vier Wochen. Nach Einbau der letzten Mörtelbeschichtung vergingen bis zur Flutung des Versuchsstandes, und damit auch bis zur Belastung der Beschichtungen durch Außenwasserdruck, weitere vier Wochen, in denen die Mörtelbeschichtungen noch aushärten konnten. Bereits in dieser Phase wurden sämtliche Beschichtungen regelmäßig inspiziert, um ggf. Veränderungen am

jeweiligen Beschichtungszustand dokumentieren zu können. Während und nach der Flutung wurde das Inspektionsprogramm fortgesetzt, um wiederum Veränderungen am Zustand der Beschichtungen bei anstehendem Außenwasserdruck aufzunehmen. Die Standzeit betrug fünf Monate. Hiernach wurde das Wasser aus dem Großversuchsstand abgelassen und die sanierten Schächte wurden letztmalig untersucht.

Im Verlaufe des gesamten Versuchs wurde der Zustand der Beschichtungen in regelmäßigen Abständen dokumentiert. Auffälligkeiten sowie Zustandsveränderungen wurden dabei erfasst, insbesondere ob und in welcher Größe die Beschichtungen Hohlstellen, Risse oder Bereiche ohne ausreichenden Materialauftrag, ggf. mit Wassereindrang, aufwiesen. Nach dem Absenken des Grundwassers im Versuchsstand wurden auch Haftzugprüfungen an den einzelnen Beschichtungen durchgeführt, insgesamt 16 Prüfstellen je Schacht. Im Bereich eines jeden Betonfertigteils wurden zwei Prüfungen durchgeführt, d.h. bei insgesamt sieben Schachtringen und einem Schachtunterteil jeweils eine Prüfstelle auf der unpräparierten bzw. mit Fett eingestrichenen Seite des Schachtes.

Die folgenden Abschnitte sind einheitlich aufgebaut und enthalten Informationen zum verwendeten **Material** sowie der **Applikationstechnik**. Darüber hinaus werden wesentliche Verfahrensschritte der **Untergrundvorbereitung** und der **Beschichtungsarbeiten** aufgeführt. Abschließend finden sich Ergebnisse der **Schachtinspektionen** und **Haftzugprüfungen**. Ergänzt werden Ergebnisse der **Schichtdickenmessungen** sowie ggf. weiterführende Untersuchungen.

Nachfolgend werden die einzelnen Untersuchungen bzw. Versuche an den Beschichtungen, zunächst für Mörtel- und anschließend für polymere Produkte, beschrieben.

6.2.2 Mörtelbeschichtungen

6.2.2.1 Übersicht

Mörtelbeschichtungen wurden in sechs Schachtbauwerke mit bereits eingebrachten Fehlstellen eingebaut. Dabei wurden fünf verschiedene Materialien verwendet und drei unterschiedliche Applikationstechniken eingesetzt. Die Beschichtungsarbeiten sowie die Ergebnisse von Schachtinspektionen an den jeweiligen Mörtelbeschichtungen sind in diesem Abschnitt dargestellt. Während der Beschichtungsarbeiten prüften Mitarbeiter des IKT stichprobenhaft die Frischmörtelkonsistenz und nahmen Materialproben für die Bestimmung der Biegezug- und Druckfestigkeit. Die Ergebnisse der Konsistenzprüfungen sind den bei der Sanierungsausführung anwesenden Materialherstellern bzw. Sanierungsmitarbeitern direkt mitgeteilt worden. In Tabelle 16 sind die verwendeten Beschichtungsmaterialien und deren Applikationstechnik zusammengestellt.

Tabelle 16 Mörtelbeschichtungen

Beschichtungsmaterial	Materialgruppe	Hersteller	Applikationstechnik
Ergelit KS 1	kunststoffmodifizierter Zementmörtel	Hermes Technologie GmbH & Co. KG, Schwerte	händisch
Ergelit KS 1	kunststoffmodifizierter Zementmörtel	Hermes Technologie GmbH & Co. KG, Schwerte	angeschleudert (KS-ASS-Verfahren)
KA 20	kunststoffmodifizierter Zementmörtel	Pagel Spezial-Beton GmbH & Co. KG, Essen	händisch
Kanament	kunststoffmodifizierter Zementmörtel	PCI Augsburg GmbH, Augsburg	händisch
ombran MHP	kunststoffmodifizierter Zementmörtel	MC-Bauchemie Müller GmbH & Co. KG, Bottrop	händisch
SD 1 -W	Silikatmörtel	Remmers Baustofftechnik GmbH, Lönningen	händisch und angespritzt

6.2.2.2 Ergelit KS 1 (händischer Auftrag)

Ein präparierter Schacht, wie in Abschnitt 6.1 dargestellt, wurde mit dem Mörtel Ergelit KS 1 von Hand beschichtet. Bei dem Mörtel handelte es sich um einen kunststoffmodifizierten Zementmörtel (vgl. Abschnitt 4.3.2.2). Ein Mitarbeiter des Materialherstellers begleitete die Sanierungsarbeiten.

Untergrundvorbereitung

Wesentliche Verfahrensschritte:

1. Aufsprühen eines Fettlösers, Einwirkdauer ca. 25 Minuten;
2. Hochdruckwasserstrahlen (ca. 320 bar und 24 l/min, Heißwasser mit $T \approx 90^\circ \text{C}$) unter Beimischung von festem Strahlgut (Schmelzkammerschlacke, Körnung: 1 - 2 mm) mittels handgeführter Lanze, Dauer ca. 40 Minuten;
3. Hochdruckwasserstrahlen (ca. 320 bar und 24 l/min, Kaltwasser) unter Beimischung von festem Strahlgut (Schmelzkammerschlacke, Körnung: 1 - 2 mm) mittels handgeführter Lanze, Dauer ca. 40 Minuten (vgl. Bild 45, links);
4. Anrauen der Betonoberfläche im Schachtunterteil mittels Stemmwerkzeug, Dauer ca. 20 Minuten;
5. Reinigen der Schachtsohle, Abspülen der Schachtwand, Dauer ca. 15 Minuten.



Bild 45 Wasser-Feststoff-Strahlen mit Hochdruck und Heißwasser mittels handgeführter Lanze (links), Ergebnis der Untergrundvorbereitung (rechts)

Ergebnis der Untergrundvorbereitung

Die Rauigkeit der vorbereiteten Betonoberfläche betrug überwiegend ca. 1 mm. Nur vereinzelt wurde das oberflächennahe Korn(gerüst) freigelegt (vgl. Bild 45, rechts). Nach erfolgter Inspektion erteilte der Mitarbeiter des Materialherstellers die Freigabe zur Beschichtung des Schachtes. Die Untergrundvorbereitung dauerte insgesamt etwa zwei Stunden und zwanzig Minuten.

Beschichtungsarbeiten

Wesentliche Verfahrensschritte:

1. Vornässen der Betonwand, sofern sie nicht mattfeucht erscheint;
2. Einbürsten einer Haftbrücke (vgl. Bild 46, links);
3. Aufbringen des Beschichtungsmörtels auf die Haftbrücke mittels Kelle und Stahlglätter von oben nach unten (vgl. Bild 46, rechts);
4. Abreiben der bereits angezogenen Mörtelbeschichtung mit einem nassen Schwamm (vgl. Bild 47, links);
5. Regelmäßiges, zweimal tägliches Befeuchten der Mörtelbeschichtung für die Dauer von einer Woche.



Bild 46 Vorbereitung für das Auftragen der Haftbrücke (links), Glätten der Beschichtung nach dem Auftragen des Mörtels (rechts)



Bild 47 Abreiben der Mörteloberfläche mit einem Schwamm (links), Blick in den beschichteten Schacht (rechts)

Arbeitsaufwand und Materialverbrauch

Das Beschichten des Schachtes dauerte etwa sieben Stunden. Dabei wurden insgesamt ca. 540 kg Trockenmörtel verarbeitet.

Inspektionsergebnisse GW 0

Vor der Flutung des Versuchsstandes waren bei einem Abklopfen der Beschichtung alle Hohlstellen aus planmäßiger Verbundschwächung durch Trennmittel in ihrer vorgesehenen Ausdehnung sowie darüber hinaus unplanmäßige, großflächige Hohlstellen - wie u.a. nahezu der gesamte Bereich in Schachtring 5 - wahrnehmbar. Nach dem Besprühen der Beschichtung mit Wasser waren im Bereich aller Hohlstellen Risse zu erkennen (vgl. Bild 48).



Bild 48 Zustand der Beschichtung ohne Grundwassereinwirkung: Risse erkennbar nach Befeuchten der Beschichtungsfläche mit Wasser (links), Detailbild eines Risses innerhalb einer Hohlstelle (Rissverlauf mit roten Pfeilen angezeigt, rechts)

Inspektionsergebnisse GW I - Kurzzeit

Nach der Flutung des Versuchsstandes auf GW I waren Risse bis zu der Höhe des anstehenden Wassers auf der Beschichtungsoberfläche sichtbar. Feuchtefahnen in unterschiedlich großer Ausdehnung bildeten sich an den Rissen (vgl. Bild 49). Hohlstellen aus planmäßiger Verbundschwächung durch Trennmittel und unplanmäßige Hohlstellen waren unterhalb von GW I vermutlich infolge Wasserfüllung bei einem Abklopfen nicht mehr wahrnehmbar. Oberhalb von GW I waren die bereits bei GW 0 erkannten Hohlstellen bei einem Abklopfen weiterhin wahrnehmbar.

Inspektionsergebnisse GW II - Kurzzeit

Nach der Flutung des Versuchsstandes auf GW II waren Risse auf der gesamten Beschichtungsoberfläche sichtbar, um die sich Feuchtefahnen in unterschiedlich großer Ausdehnung bildeten (vgl. Bild 49). Hohlstellen aus planmäßiger Verbundschwächung durch Trennmittel und unplanmäßige Hohlstellen waren unterhalb von GW II vermutlich infolge Wasserfüllung bei einem Abklopfen nicht mehr wahrnehmbar.

Inspektionsergebnisse GW II - Langzeit

Innerhalb des Beobachtungszeitraums bildeten sich im Bereich der Risse weiße Ausblühungen (vgl. Bild 49). Die Rissbreiten betragen überwiegend etwa 0,1 bis 0,2 mm. Die Feuchtefahnen an den Rissen veränderten sich in ihrer Ausdehnung ständig über die gesamte Versuchszeit mit Außenwasserdruck (vgl. Bild 50) und trockneten zum Versuchsende hin merklich ab. Die infiltrierende Wassermenge aus diesen Feuchtefahnen war jedoch so gering, dass sich an der Schachtwandung keine Tropfen bildeten und sie messtechnisch daher nicht erfasst werden konnte. Alle Hohlstellen (vgl. Inspektionsergebnisse GW 0) konnten bei einem Abklopfen weiterhin nicht wahrgenommen werden.



Bild 49 Beschichtung unter Grundwassereinfluss: Ausdehnung der Feuchtigkeit auf der Beschichtung (links), Detailbild eines Risses mit weißen Ausblühungen (rechts)



Bild 50 Beschichtung unter Grundwassereinfluss mit Beispiel für eine geringere (links) und größere (rechts) Ausdehnung der Feuchtefahnen, Zustandsveränderung innerhalb von drei Wochen

Haftzugprüfungen

Die Haftzugprüfungen wurden an Stellen durchgeführt, die bei einem Abklopfen der Beschichtung auf eine Verbundwirkung schließen ließen. Stellen mit planmäßiger Verbundschwächung durch Trennmittel wurden grundsätzlich nicht auf Haftzugfestigkeit geprüft. Bei insgesamt 16 durchgeführten Haftzugprüfungen konnte lediglich in 10 Fällen ein Haftzugwert messtechnisch bestimmt werden³. An sechs Prüfstellen löste sich bereits beim Vorbohren die Beschichtung vom Betonuntergrund. Hier waren dreimal der vor Reinigung mit Pflanzenfett präparierte Bereich und dreimal der Bereich ohne Präparation betroffen. Bei nahezu allen Prüfungen konnte ein Adhäsionsversagen zwischen Beschichtung (hier: Haftbrücke) und Betonuntergrund festgestellt werden (Bild 51). Die wesentlichen Ergebnisse der Haftzugprüfungen sind in Tabelle 17 enthalten.

³ die übrigen Werte gingen mit 0 N/mm² in die Berechnung der Mittelwerte ein.

Tabelle 17 Haftzugfestigkeiten der Beschichtung

Stichprobenumfang	Haftzugfestigkeit in N/mm ²		
	Mittelwert	kleinster Einzelwert	größter Einzelwert
Gesamtanzahl = 16	0,76	0,42	3,15
präparierter Untergrund = 8	0,94	0,44	3,15
unpräparierter Untergrund = 8	0,67	0,42	2,28



Bild 51 Bruchstelle, exemplarisch für ein vollständiges Versagen in der Verbundfuge

Beschichtungsdicke

Die Beschichtungsdicke betrug im Mittel 20,8 mm bei einer Bandbreite der einzelnen Messwerte von 15,8 mm bis 33,7 mm. In der Tendenz war dabei eine Zunahme der Beschichtungsdicke von oben nach unten zu erkennen.

Weitere Untersuchungen

Während der Beschichtungsarbeiten wurden stichprobenartig die Mörtelkonsistenzen überprüft und aus derselben Materialcharge Mörtelprismen für die Bestimmung der Biegezug- und Druckfestigkeit gewonnen. Die Messwerte für das Ausbreitmaß können Tabelle 18 entnommen werden.

Tabelle 18 Ausbreitmaß [42] und Konsistenz [43] des Frischmörtels

Materialentnahme (Bauabschnitt)	Ausbreitmaß	Konsistenz
Schachtring 5	13,9 cm	steif
Schachtring 4	13,9 cm	steif
Schachtring 1	13,4 cm	steif

Die mittlere Biegezugfestigkeit betrug nach 28 Tagen ca. 6,6 N/mm², für die Druckfestigkeit ergaben sich im Mittel 56,6 N/mm². Der Hersteller gibt für die Biegezugfestigkeit 7 N/mm² und für die Druckfestigkeit 60 N/mm² an.

Fazit

Im Rahmen der Inspektionen zeigte sich, dass etwa die Hälfte der Beschichtungsfläche hohllagig war. Die Beschichtung war von Rissen mit einer Breite von 0,1 mm bis 0,2 mm nahezu vollständig durchzogen. Ein Herauslösen von Teilen der Beschichtung infolge des anstehenden Grundwasserdrucks wurde während der gesamten Versuchsdauer nicht beobachtet.

Über die fünfmonatige Standzeit unter Grundwassereinwirkung zeigte sich Feuchtigkeit in weiten Bereichen auf der Beschichtung, eindringend über die Risse in der Beschichtung. Jedoch war dieser Wassereindrang so gering, dass sich keine Tropfen an der Schachtwand bildeten. Daher war die Infiltrationsmenge nicht messbar und offensichtlich auch nicht abflusswirksam.

6.2.2.3 Ergelit KS 1 (KS-ASS-Verfahren)

Ein präparierter Schacht, wie in Abschnitt 6.1 dargestellt, wurde mit dem Mörtel Ergelit KS 1 mittels KS-ASS-Anschleuderverfahren maschinell beschichtet. Bei dem Mörtel handelte es sich um einen kunststoffmodifizierten Zementmörtel (vgl. Abschnitt 4.3.2.2). Ein Mitarbeiter des Materialherstellers begleitete die Sanierungsarbeiten.

Untergrundvorbereitung

Wesentliche Verfahrensschritte:

1. Aufbringen und Einbürsten eines Fettlösers von Hand auf die präparierte Schachtseite, Verarbeitung und Einwirkdauer ca. 15 Minuten;
2. Abspülen der Schachtwand mit Kaltwasser (drucklos), Dauer ca. 10 Minuten;
3. Maschinelles Hochdruckwasserstrahlen mittels rotierender Reinigungsdüsen (TSSR⁴) mit ca. 300 bar und Kaltwasser (vgl. Bild 52, links), Dauer ca. 45 Minuten;
4. Erneutes Einsprühen der Schachtwand mit einem Fettlöser, Dauer ca. 30 Minuten, Einwirkzeit ca. 100 Minuten;
5. Maschinelles Hochdruckwasserstrahlen mittels rotierender Reinigungsdüsen (TSSR⁴) mit ca. 300 bar und Heißwasser mit $T \approx 90^\circ \text{C}$, Dauer ca. 30 Minuten;
6. Maschinelles Druckwasserstrahlen unter Beimischung von festem Strahlgut (Schmelzkammerschlacke, Körnung: 1 - 2 mm) mittels rotierender Reinigungsdüsen (HDS-Jet⁴) mit ca. 200 bar und Kaltwasser, Dauer ca. 55 Minuten;
7. Säubern und Abkleben aller Steigbügel, dabei letztmalige Kontrolle der Schachtwand, Dauer ca. 50 Minuten;
8. Reinigen noch dunkler Stellen von Hand mit Aceton auf der präparierten Seite des Schachtes, Dauer ca. 20 Minuten.

⁴ Bezeichnung des Reinigungsverfahrens gemäß Hersteller



Bild 52 Maschinelle Untergrundvorbereitung mittels rotierender Reinigungsdüsen (links), Ergebnis der Untergrundvorbereitung (rechts)

Ergebnis der Untergrundvorbereitung

Die Rauigkeit der vorbereiteten Betonoberfläche betrug überwiegend ca. 1 mm (vgl. Bild 52, rechts). Nur vereinzelt wurde das oberflächennahe Korn(gerüst) freigelegt. Die Untergrundvorbereitung dauerte insgesamt etwa sechs Stunden. Nach erfolgter Inspektion erteilte der Mitarbeiter des Materialherstellers die Freigabe zur Beschichtung des Schachtes.

Beschichtungsarbeiten

Wesentliche Verfahrensschritte:

1. Aufbauen und Einrichten der Maschinenteknik für das Anschleuderverfahren;
2. Herstellen des Beschichtungsmörtels von Hand mittels Zweiwellen-Mischer zur kontinuierlichen Beschickung der Förderpumpe
3. Anschleudern der ersten Lage Mörtel als Haftbrücke;
4. Anschleudern des Beschichtungsmörtels auf die Haftbrücke (vgl. Bild 53, links), sukzessives Beschichten mit insgesamt 15 Zyklen (ein Zyklus umfasst die Auf- und Abwärtsbewegung des Schleuderkopfes);
5. Beschichten der Ringfugen und Einbindebereiche der Steigbügel von Hand (vgl. Bild 53, rechts);
6. Abstreichen des händisch aufgetragenen Mörtels mit einem Schwammbrett (vgl. Bild 54, links);
7. Nachbearbeiten der Beschichtung von Hand im Übergangsbereich des Schachtunterteils zur Berme;
8. Abdecken des Schachtes mit einer Folie, zusätzlich wurde die frische Beschichtung für die Dauer von einer Woche regelmäßig befeuchtet.

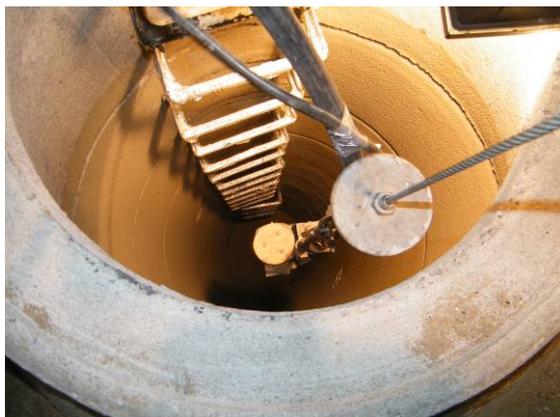


Bild 53 Schleudermotor während der Beschichtung (links), händisches Nachbearbeiten der Beschichtung im Bereich der Schachtringfugen (rechts)



Bild 54 Abreiben der Beschichtung im Bereich der Ringfugen mit einem Schwammbrett (links), Blick in den beschichteten Schacht (rechts)

Arbeitsaufwand und Materialverbrauch

Das Beschichten des Schachtes dauerte etwa fünf Stunden und dreißig Minuten. Dabei wurden insgesamt ca. 455 kg Trockenmörtel verarbeitet.

Inspektionsergebnisse GW 0

Vor der Flutung des Versuchsstandes waren alle Hohlstellen aus planmäßiger Verbundschwächung durch Trennmittel in ihrer gesamten Ausdehnung sowie unplanmäßige, großflächige Hohlstellen - wie u.a. nahezu der gesamte Bereich in Schachtring 3 - bei einem Abkopfen wahrnehmbar. Zu diesem Zeitpunkt waren in der Beschichtung im Bereich der Hohlstellen Risse zu erkennen, jedoch erst nach dem Besprühen der Schachtwand mit Wasser (vgl. Bild 55, links). Zusätzlich waren Risse in den einzelnen Schachtringfugen vorhanden (vgl. Bild 55, rechts).



Bild 55 Zustand der Beschichtung ohne Grundwassereinwirkung nach Befeuchten der Oberfläche: Risse im Bereich einer Hohlstelle aus planmäßiger Verbundschwächung durch Trennmittel (links); Beispiel für einen Riss in einer Schachtringfuge (rechts)

Inspektionsergebnisse GW I - Kurzzeit

Nach der Flutung des Versuchsstandes auf GW I waren Risse bis zu der Höhe des anstehenden Wassers auf der Beschichtungsoberfläche sichtbar. Im Bereich der Schachtringfugen bildeten sich darüber hinaus netzartige Risse aus, z.T. waren Feuchtefahnen in verschiedenen Ausdehnungen erkennbar. Hohlstellen aus planmäßiger Verbundschwächung durch Trennmittel und unplanmäßige Hohlstellen waren unterhalb von GW I vermutlich infolge Wasserfüllung bei einem Abklopfen nicht mehr wahrnehmbar. Oberhalb von GW I waren die bereits bei GW 0 erkannten Hohlstellen bei einem Abklopfen weiterhin wahrnehmbar.

Inspektionsergebnisse GW II - Kurzzeit

Nach der Flutung des Versuchsstandes auf GW II waren Risse auf der gesamten Beschichtungsoberfläche sichtbar. Im Bereich der Schachtringfugen bildeten sich darüber hinaus netzartige Risse aus (vgl. Bild 56, links), z.T. waren Feuchtefahnen in verschiedenen Ausdehnungen erkennbar. Weitere Feuchtefahnen befinden sich einzeln in Einbindebereichen der Steigbügel (vgl. Bild 56, rechts). Hohlstellen aus planmäßiger Verbundschwächung durch Trennmittel und unplanmäßige Hohlstellen waren unterhalb von GW II vermutlich infolge Wasserfüllung bei einem Abklopfen nicht mehr wahrnehmbar.



Bild 56 KS-ASS-Beschichtung unter Grundwassereinwirkung: Netzartige Risse im Bereich einer Schachtringfuge (links) und Beispiel für eine Feuchtefahne auf der Beschichtung im Einbindebereich eines Steigbügels (rechts)



Bild 57 KS-ASS-Beschichtung unter Grundwassereinwirkung: Risse im Bereich einer Hohlstelle aus planmäßiger Verbundschwächung durch Trennmittel mit weißen Ausblühungen (links) und Beispiel für Risse und Feuchtefahnen im Bereich einer unplanmäßigen Hohlstelle (rechts)

Inspektionsergebnisse GW II - Langzeit

Innerhalb des Beobachtungszeitraums bildeten sich in Teilbereichen von Rissen weiße Ausblühungen (vgl. Bild 57). Die Risse in der Beschichtung hatten überwiegend eine Breite von 0,1 bis 0,2 mm, in Ringfugen konnten maximale Rissbreiten in der Beschichtung von bis zu 0,5 mm gemessen werden. Die seit Beginn der Flutung vorhandenen Feuchtefahnen variierten über die Versuchszeit in ihrer Ausdehnung und trockneten zum Versuchsende erkennbar ab. Der Wassereindrang an den Feuchtefahnen war so gering, dass sich keine Tropfen an der Schachtwand bildeten. Daher war er nicht messbar und offensichtlich auch nicht abflusswirksam. Alle Hohlstellen (vgl. Inspektionsergebnisse GW 0) konnten bei einem Abklopfen weiterhin nicht wahrgenommen werden.

Haftzugprüfungen

Die Haftzugprüfungen wurden an Stellen durchgeführt, die bei einem Abklopfen der Beschichtung auf eine Verbundwirkung schließen ließen. Stellen mit planmäßiger Verbundschwächung durch Trennmittel wurden grundsätzlich nicht auf Haftzugfestig-

keit geprüft. Bei insgesamt 16 durchgeführten Haftzugprüfungen konnte lediglich in 13 Fällen ein Haftzugwert messtechnisch bestimmt werden³. An drei Prüfstellen löste sich bereits beim Vorbohren die Beschichtung vom Betonuntergrund. Hier waren einmal der vor Reinigung mit Pflanzenfett präparierte Bereich und zweimal der Bereich ohne Präparation betroffen. Bei nahezu allen Prüfungen konnte ein Adhäsionsversagen zwischen Beschichtung (hier: Haftbrücke) und Betonuntergrund festgestellt werden (Bild 58). Die wesentlichen Ergebnisse der Haftzugprüfungen sind in Tabelle 19 enthalten.

Tabelle 19 Haftzugfestigkeiten der Beschichtung

Stichprobenumfang	Haftzugfestigkeit in N/mm ²		
	Mittelwert	kleinster Einzelwert	größter Einzelwert
Gesamtanzahl = 16	0,52	0,04	2,15
präparierter Untergrund = 8	0,46	0,04	1,94
unpräparierter Untergrund = 8	0,59	0,15	2,15



Bild 58 Bruchstelle, exemplarisch für ein vollständiges Versagen in der Verbundfuge

Beschichtungsdicke

Die Beschichtungsdicke betrug im Mittel 12,9 mm bei einer Bandbreite der einzelnen Messwerte von 10,6 mm bis 16,6 mm. In der Tendenz war dabei eine Zunahme der Beschichtungsdicke von oben nach unten zu erkennen.

Weitere Untersuchungen

Während der Beschichtungsarbeiten wurden stichprobenhaft die Mörtelkonsistenzen überprüft und aus derselben Materialcharge Mörtelprismen für die Bestimmung der Biegezug- und Druckfestigkeit gewonnen. Die Messwerte für das Ausbreitmaß können Tabelle 20 entnommen werden.

Tabelle 20 Ausbreitmaß [42] und Konsistenz [43] des Frischmörtels

Materialentnahme (Baub Abschnitt)	Ausbreitmaß	Konsistenz
Haftbrücke (1. Lage)	13,3 cm	steif
Beschichtungsmörtel	14,0 cm	plastisch
Beschichtungsmörtel für händische Nacharbeiten	15,3 cm	plastisch

Die mittlere Biegezugfestigkeit betrug nach 28 Tagen ca. 6,5 N/mm², für die Druckfestigkeit ergaben sich im Mittel etwa 70 N/mm². Der Hersteller gibt für die Biegezugfestigkeit einen Wert von 7 N/mm² an und für die Druckfestigkeit 60 N/mm².

Fazit

Im Rahmen der Inspektionen zeigte sich, dass etwa 2/3 der Beschichtung hohllagig war und lediglich ca. 1/3 der Beschichtungsfläche über einen Verbund zum Betonuntergrund verfügte. Die Beschichtung war von Rissen mit einer Breite von 0,1 mm bis 0,5 mm nahezu vollständig durchzogen. Ein Herauslösen von Teilen der Beschichtung infolge des anstehenden Grundwassers wurde während der gesamten Versuchsdauer nicht beobachtet.

Über die fünfmonatige Standzeit unter Grundwassereinwirkung zeigte sich Feuchtigkeit in weiten Bereichen auf der Beschichtung, eindringend über die Risse in der Beschichtung. Der Wassereindrang war jedoch so gering, dass sich keine Tropfen an der Schachtwand bildeten. Daher war er nicht messbar und offensichtlich auch nicht abflusswirksam (vgl. Bild 59).



Bild 59 Blick in den Schacht mit trockener Berme

6.2.2.4 KA 20

Ein präparierter Schacht, wie in Abschnitt 6.1 dargestellt, wurde mit dem Mörtel KA 20 von Hand beschichtet. Bei dem Mörtel handelte es sich um einen kunststoffmodifizierten Zementmörtel (vgl. Abschnitt 4.3.2.2). Mitarbeiter des Materialherstellers begleiteten die Sanierungsarbeiten.

Untergrundvorbereitung

Wesentliche Verfahrensschritte:

1. Maschinelles Hochdruckwasserstrahlen mittels rotierender Reinigungsdüsen (vgl. Bild 60, links) mit ca. 300 bar und Heißwasser $T \approx 95^\circ \text{C}$, Dauer ca. 80 Minuten;
2. Kontrolle der gereinigten Schachtwand durch die Sanierungsfirma, Dauer ca. 20 Minuten;
3. Umbau der Reinigungseinrichtung für Handbetrieb, Dauer ca. 30 Minuten;
4. Hochdruckwasserstrahlen (ca. 450 bar und ca. 30 l/min, Kaltwasser) unter Beimischung von festem Strahlgut (Schmelzkammerschlacke, Körnung: 1 - 2 mm) mittels Handlanze (vgl. Bild 60, rechts), Dauer ca. 40 Minuten;
5. Aufstreichen und Einbürsten eines Fettlösers von Hand, Verarbeitung und Einwirkdauer ca. 30 Minuten;
6. Erneutes Hochdruckwasserstrahlen mittels Handlanze mit 350 bar und Heißwasser $T \approx 95^\circ \text{C}$, Dauer ca. 30 Minuten;
7. Fräsen des Schachtunterteils mittels Trennschleifer zur Erhöhung der Untergrundrauhigkeit, Dauer ca. 25 Minuten;
8. Druckwasserstrahlen der vor Reinigung präparierten Seite des Schachtes mittels Handlanze mit etwa 150 bar und Kaltwasser unter Zugabe eines Fettlösers, Dauer ca. 25 Minuten;
9. Trocknen des Schachtes mit Heißluftgebläse und Heizstrahler, Dauer ca. 30 Minuten;
10. Inspektion des Schachtes durch einen Mitarbeiter der Sanierungsfirma, Dauer ca. 10 Minuten;
11. Prüfung der Oberflächenzugfestigkeit des vorbehandelten Betonuntergrunds an definierten Prüfflächen (Ergebnisse sind in Tabelle 21 dargestellt) durch die Sanierungsfirma, Dauer ca. 60 Minuten;
12. Letztmaliges Reinigen der Schachtwand mittels Druckwasserstrahlen mit 150 bar und Kaltwasser, Dauer ca. 10 Minuten.

Tabelle 21 Ergebnisse der Abreißprüfung nach der Untergrundvorbehandlung

Prüfung Schachtbauteil	Lage ¹	Abreißfestigkeit	Bruchstelle
Schachtring 7	1 Uhr	> 4,0 N/mm ²	100 % Kohäsionsbruch im Betonuntergrund
Schachtring 4	1 Uhr	> 3,6 N/mm ²	100 % Kohäsionsbruch im Betonuntergrund

¹ Ausgehend von dem Steigbügelgang bei 12 Uhr



Bild 60 Maschinelle Untergrundvorbereitung mittels rotierender Reinigungsdüsen (links), Ergebnis der Untergrundvorbereitung (rechts)

Ergebnis der Untergrundvorbereitung

Die Rauigkeit der vorbereiteten Betonoberfläche betrug überwiegend ca. 1 mm. Das oberflächennahe Korn(gerüst) ist weitgehend nicht freigelegt worden (vgl. Bild 60, rechts). Die Untergrundvorbereitung bzw. Schachtreinigung dauerte ca. fünf Stunden und zwanzig Minuten, qualitätssichernde Untersuchungen nahmen etwa eine Stunde in Anspruch. Nach erfolgter Inspektion erteilte der Mitarbeiter des Materialherstellers die Freigabe zur Beschichtung des Schachtes.

Beschichtungsarbeiten

Wesentliche Verfahrensschritte:

1. Vornässen der Betonwandung, sofern sie nicht mattfeucht erscheint;
2. Aufquasten einer Haftbrücke;
3. Auftragen der Beschichtung auf die Haftbrücke mittels Kelle und Stahlglätter (vgl. Bild 61, rechts);
4. Abreiben der bereits angezogenen Mörtelbeschichtung mit einem nassen Schwamm (vgl. Bild 61, links);
5. Aufsprühen eines Verdunstungsschutzes auf die Beschichtung (vgl. Bild 62, rechts);
6. Abdecken des Schachtes mit einer Folie und zweimaliges Befeuchten der Beschichtung an den nachfolgenden Tagen (Sicherheitsmaßnahme für den Fall, dass der Verdunstungsschutz nicht vollflächig aufgetragen wurde).



Bild 61 Auftragen des Beschichtungsmörtels (links), Abreiben der Mörteloberfläche mit einem Schwamm (rechts)



Bild 62 Aufsprühen eines Verdunstungsschutzes auf die Beschichtung (links), Blick in den beschichteten Schacht (rechts)

Arbeitsaufwand und Materialverbrauch

Das Beschichten des Schachtes dauerte etwa elf Stunden. Dabei wurden insgesamt ca. 550 kg Trockenmörtel verarbeitet.

Inspektionsergebnisse GW 0

Vor der Flutung des Versuchsstandes waren bei einem Abklopfen alle Hohlstellen aus planmäßiger Verbundschwächung durch Trennmittel in ihrer vorgesehenen Ausdehnung, z.T. aber auch größer als erwartet, wahrnehmbar. Darüber hinaus haben sich insbesondere in der unteren Hälfte des Schachtes unplanmäßige Hohlstellen ausgebildet. Im Bereich des Schachtrings 3 lag beispielsweise nahezu die gesamte Beschichtung hohl und war von Rissen durchzogen. Dabei waren die Risse zunächst nur dann zu erkennen, als die Beschichtung mit Wasser eingesprüht worden war (vgl. Bild 63).

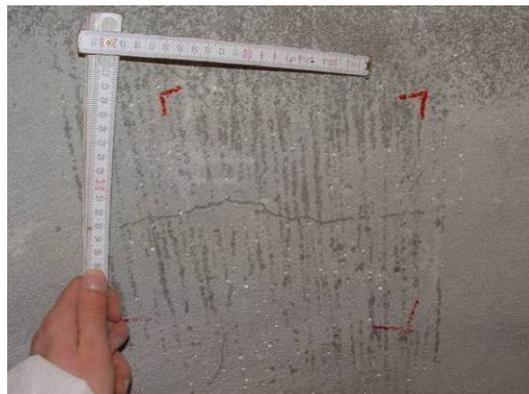
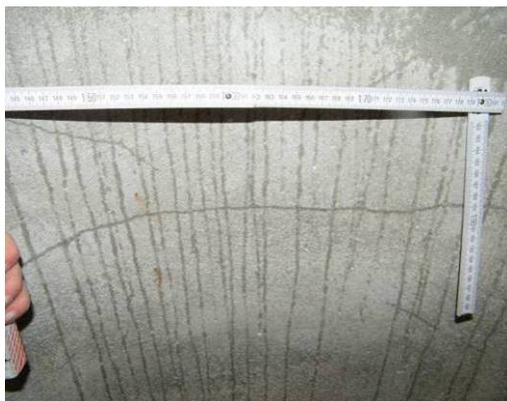


Bild 63 Beschichtung ohne Grundwassereinwirkung nach Befeuchten der Oberfläche: Risse in der Beschichtung im Bereich einer unplanmäßigen Hohlstelle (links), Riss im Bereich einer Hohlstelle aus planmäßiger Verbundschwächung durch Trennmittel (FU 4, rechts)

Inspektionsergebnisse GW I - Kurzzeit

Nach der Flutung des Versuchsstandes auf GW I zeigten sich Feuchtefahnen auf der Beschichtung bis zur Höhe des anstehenden Grundwassers, ausgehend von den Rissen in der Beschichtung sowohl in Bereichen von Hohlstellen aus planmäßiger Verbundschwächung durch Trennmittel sowie unplanmäßigen Hohlstellen. Dabei perlte das Wasser zunächst überwiegend in kleinen Tropfen an der mit einem wachshaltigen Nachbehandlungsmittel bearbeiteten Beschichtungsoberfläche ab (vgl. Bild 63). Hohlstellen aus planmäßiger Verbundschwächung durch Trennmittel und unplanmäßige Hohlstellen waren unterhalb von GW I vermutlich infolge Wasserfüllung bei einem Abklopfen nahezu nicht mehr wahrnehmbar. Oberhalb von GW I waren die bereits bei GW 0 erkannten Hohlstellen bei einem Abklopfen weiterhin wahrnehmbar.

Inspektionsergebnisse GW II - Kurzzeit

Nach der Flutung des Versuchsstandes auf GW II waren Risse mit Feuchtefahnen auf der gesamten Beschichtungsoberfläche sichtbar. Alle Hohlstellen konnten bei einem Abklopfen der Beschichtung nahezu nicht mehr wahrgenommen werden.

Inspektionsergebnisse GW II - Langzeit

Innerhalb des Beobachtungszeitraums erreichten die Feuchtefahnen die Berme des Schachtes (vgl. Bild 64, rechts). Vereinzelt haftete durch die Risse eingetragenes Bodenmaterial an der Beschichtung an und lief in Form von Fließspuren an der Schachtwandung herab (vgl. Bild 64 und Bild 65). Die Risse hatten eine Breite von 0,1 mm bis 0,4 mm. Alle Hohlstellen konnten bei einem Abklopfen der Beschichtung nahezu nicht mehr wahrgenommen werden.



Bild 64 Beschichtung unter Grundwassereinwirkung: Risse in der Beschichtung mit nicht abflusswirksamen Feuchtefahnen im Bereich einer Hohlstelle aus planmäßiger Verbundschwächung durch Trennmittel (FU 6p, links), Feuchtefahnen auf der Schachtwand bis auf die Berme (rechts)

An dem linken Einbindebereich des vierten Steigbügels von unten drang Wasser in den Schacht ein (vgl. Bild 65, rechts). Die maximale Infiltrationsmenge betrug ca. 0,7 ml/s (entspricht ca. 60 Liter pro Tag) und wurde etwa sechs Wochen nach der Flutung des Versuchsstandes gemessen. Zum Versuchsende war dieser Wassereindrang jedoch so gering, dass sich keine Tropfen mehr an der Schachtwand bildeten. Daher war er nicht mehr messbar und nur noch in Form von Feuchtefahnen auf der Beschichtung zu erkennen.



Bild 65 Beschichtung unter Grundwassereinwirkung: Geringfügiger Wassereindrang an der linken Einbindestelle des vierten Steigbügels von unten (links), Schmutzanhaftungen auf der Beschichtung im Bereich eines Risses (rechts)

Haftzugprüfungen

Die Haftzugprüfungen wurden an Stellen durchgeführt, die bei einem Abklopfen der Beschichtung auf eine Verbundwirkung schließen ließen. Stellen mit planmäßiger

Verbundschwächung durch Trennmittel wurden grundsätzlich nicht auf Haftzugfestigkeit geprüft. Bei insgesamt 16 durchgeführten Haftzugprüfungen konnte in 15 Fällen ein Haftzugwert messtechnisch bestimmt werden³. An einer Prüfstelle im Bereich der vor Reinigung mit Pflanzenfett präparierten Seite löste sich bereits beim Vorbohren die Beschichtung vom Betonuntergrund. Bei nahezu allen Prüfungen konnte ein Adhäsionsversagen zwischen Beschichtung (hier: Haftbrücke) und Betonuntergrund festgestellt werden. Die wesentlichen Ergebnisse der Haftzugprüfungen sind in Tabelle 22 enthalten.

Tabelle 22 Haftzugfestigkeiten der Beschichtung

Stichprobenumfang	Haftzugfestigkeit in N/mm ²		
	Mittelwert	kleinster Einzelwert	größter Einzelwert
Gesamtanzahl = 16	> 0,59	0,03	> 1,19
präparierter Untergrund = 8	> 0,43	0,03	0,90
unpräparierter Untergrund = 8	> 0,75	0,04	> 1,19



Bild 66 Bruchstelle, exemplarisch für ein vollständiges Versagen in der Verbundfuge

Beschichtungsdicke

Die Beschichtungsdicke betrug im Mittel 14,0 mm bei einer Bandbreite der einzelnen Messwerte von 6,8 mm bis 17,3 mm. In der Tendenz war dabei eine Zunahme der Beschichtungsdicke von oben und unten zur Bauwerksmitte hin zu erkennen.

Weitere Untersuchungen

Während der Beschichtungsarbeiten wurden stichprobenhaft die Mörtelkonsistenzen überprüft und aus derselben Materialcharge Mörtelprismen für die Bestimmung der Biegezug- und Druckfestigkeit gewonnen. Die Messwerte für das Ausbreitmaß können Tabelle 23 entnommen werden.

Tabelle 23 Ausbreitmaß [42] und Konsistenz [43] des Frischmörtels

Materialentnahme (Bauabschnitt)	Ausbreitmaß	Konsistenz
Schachtring 7	14,5 cm	plastisch
Schachtring 5	14,5 cm	plastisch
Schachtring 2	14,3 cm	plastisch

Die mittlere Biegezugfestigkeit betrug nach 28 Tagen ca. 6,7 N/mm², für die Druckfestigkeit ergaben sich im Mittel etwa 60,7 N/mm². Der Hersteller gibt für die Biegezugfestigkeit einen Wert von 9 N/mm² an und für die Druckfestigkeit von 60 N/mm².

Fazit

Im Rahmen der Inspektionen zeigte sich, dass etwa die Hälfte der Beschichtung hohllagig war. Die Beschichtung war von Rissen mit einer Breite von 0,1 mm bis 0,4 mm nahezu vollständig durchzogen. Ein Herauslösen von Teilen der Beschichtung infolge des anstehenden Grundwasserdrucks wurde während der gesamten Versuchsdauer nicht beobachtet.

Solange der Versuchsstand geflutet war, drang Wasser in den Schacht durch Risse in der Beschichtung in Form von Feuchtefahnen ein. Dieser Wassereindrang war offensichtlich nicht abflusswirksam. Ein geringfügiger, jedoch abflusswirksamer Wassereindrang hingegen war an der Einbindestelle eines Steigbügels vorhanden. Zum Versuchsende war dieser Wassereindrang jedoch so gering, dass sich keine Tropfen mehr an der Schachtwand bildeten. Daher war er nicht mehr messbar und nur noch in Form von Feuchtefahnen auf der Beschichtung zu erkennen.

6.2.2.5 Kanament

Ein präparierter Schacht, wie in Abschnitt 6.1 dargestellt, wurde mit dem Mörtel Kanament von Hand beschichtet. Bei dem Mörtel handelte es sich um einen kunststoffmodifizierten Zementmörtel (vgl. Abschnitt 4.3.2.2). Ein Mitarbeiter des Materialherstellers begleitete die Sanierungsarbeiten.

Untergrundvorbereitung

Wesentliche Verfahrensschritte:

1. Hochdruckwasserstrahlen (ca. 450 bar und 30 l/min, Heißwasser mit $T \approx 90^\circ \text{C}$) mittels handgeführter Lanze und Rotationsdüse (vgl. Bild 67, links), Dauer ca. 45 Minuten;
2. Prüfen der Oberflächenzugfestigkeit des vorbehandelten Betonuntergrunds (vgl. Tabelle 24) ohne definierte Prüffläche durch einen Mitarbeiter des Materialherstellers, Dauer ca. 60 Minuten;
3. Optische Kontrolle der Schachtwand durch einen Mitarbeiter des Materialherstellers und dabei zusätzliches Benetzen der vor Reinigung mit einem Pflanzenfett präparierten Seite mit Wasser (bei ggf. vorhandenen Rückständen von Fett auf

der Schachtwand wäre hier ein Aberlen des aufgesprühten Wassers zu erkennen), Dauer ca. 15 Minuten.

Tabelle 24 Ergebnisse der Abreißprüfung nach der Untergrundvorbehandlung

Prüfung Schachtringbauteil	Lage ¹	Abreißfestigkeit	Bruchstelle
Schachtring 6	1 Uhr	>4,0 N/mm ²	100 % Adhäsionsbruch in der Klebefuge
Schachtring 6	11 Uhr	>4,0 N/mm ²	100 % Adhäsionsbruch in der Klebefuge
Schachtring 3	10 Uhr	>3,0 N/mm ²	100 % Adhäsionsbruch in der Klebefuge
Schachtring 2	9 Uhr	>4,0 N/mm ²	100 % Adhäsionsbruch in der Klebefuge

¹ Ausgehend von dem Steigbügelgang bei 12 Uhr

Ergebnis der Untergrundvorbereitung

Die Rauigkeit der vorbereiteten Betonoberfläche betrug überwiegend ca. 1 mm. Das oberflächennahe Korn(gerüst) ist weitgehend nicht freigelegt worden (vgl. Bild 67, rechts). Die Untergrundvorbereitung dauerte ca. 45 Minuten, qualitätssichernde Untersuchungen des Materialherstellers nahmen etwa eine Stunde und fünfzehn Minuten in Anspruch. Nach erfolgter Inspektion erteilte der Mitarbeiter des Materialherstellers die Freigabe zur Beschichtung des Schachtes.



Bild 67 Hochdruckwasserstrahlen mit Heißwasser mittels handgeführter Lanze (links), Ergebnis der Untergrundvorbereitung (rechts)

Beschichtungsarbeiten

Wesentliche Verfahrensschritte:

1. Vornässen der Betonwandung, sofern sie nicht mattfeucht erscheint;
2. Aufbringen des Beschichtungsmörtels im Bereich der Schachtringfugen nach dem Einbürsten einer Haftbrücke;

3. Aufquasten einer Haftbrücke im Bereich der unmittelbar nachfolgend zu beschichtenden Schachtringe (vgl. Bild 68, links);
4. Sukzessives Beschichten des Schachtkörpers mittels Kelle und Stahlglätter von oben nach unten (vgl. Bild 68, rechts);
5. Abreiben der bereits angezogenen Mörtelbeschichtung mit einem nassen Schwamm (vgl. Bild 69, links);
6. Regelmäßiges, zweimal tägliches Befeuchten der Mörtelbeschichtung für die Dauer von drei Tagen.



Bild 68 Auftragen der Haftbrücke mittels Quast (links), Glätten der Beschichtung nach dem Auftragen des Mörtels (rechts)



Bild 69 Abreiben der Mörteloberfläche mit einem Schwamm (links), Blick in den beschichteten Schacht (rechts)

Arbeitsaufwand und Materialverbrauch

Das Beschichten des Schachtes dauerte etwa sechs Stunden. Dabei wurden insgesamt ca. 600 kg Trockenmörtel verarbeitet.

Inspektionsergebnisse GW 0

Vor der Flutung des Versuchsstandes waren bei einem Abklopfen der Beschichtung alle Hohlstellen aus planmäßiger Verbundschwächung durch Trennmittel in ihrer vorgesehenen Ausdehnung, z.T. aber auch geringer als erwartet, wahrnehmbar.

Inspektionsergebnisse GW I - Kurzzeit

Es konnten keine Auffälligkeiten an der Beschichtung festgestellt werden. Alle Hohlstellen unterhalb des Wasserstandes waren bei einem Abklopfen der Beschichtung nicht mehr wahrnehmbar. Oberhalb von GW I hingegen waren die bereits bei GW 0 erkannten Hohlstellen bei einem Abklopfen weiterhin zu erkennen.

Inspektionsergebnisse GW II - Kurzzeit

Es konnten keine Auffälligkeiten an der Beschichtung festgestellt werden. Alle Hohlstellen waren bei einem Abklopfen der Beschichtung nicht mehr wahrnehmbar unterhalb des Wasserstandes.

Inspektionsergebnisse GW II - Langzeit

Im Beobachtungszeitraum bildeten sich an drei Einbindebereichen von Steigbügeln weiße Ausblühungen in geringfügiger Ausdehnung (vgl. Bild 70), an denen jedoch kein Wassereindrang festgestellt werden konnte.



Bild 70 Weiße Ausblühungen an einem Einbindebereich des Steigbügels

Während der gesamten Versuchsdauer befand sich bereichsweise Feuchtigkeit auf der Beschichtungsoberfläche. Messungen des Taupunktabstandes und der Feuchtigkeit ließen erkennen, dass Tauwasser auf der Beschichtungsoberfläche ausgefallen war. Ein Abschlagen der obersten Schicht der feuchten Beschichtung zeigte darunter trockenes Beschichtungsmaterial, so dass eine Durchfeuchtung der Beschichtung ausgeschlossen werden konnte (vgl. Bild 71).



Bild 71 Feuchtigkeitsmessung auf der Beschichtung (links); innerhalb der roten Markierung zeigte sich nach dem Abschlagen der obersten Mörtellage eine trockene Beschichtung (rechts)

Während der gesamten Versuchszeit war kein Wassereindrang durch die Beschichtung zu erkennen.

Haftzugprüfungen

Die Haftzugprüfungen wurden an Stellen durchgeführt, die bei einem Abklopfen der Beschichtung auf eine Verbundwirkung schließen ließen. Stellen mit planmäßiger Verbundschwächung durch Trennmittel wurden grundsätzlich nicht auf Haftzugfestigkeit geprüft. Bei insgesamt 16 durchgeführten Haftzugprüfungen konnte in 15 Fällen ein Haftzugwert messtechnisch bestimmt werden³. An einer Prüfstelle löste sich bereits beim Vorbohren die Beschichtung vom Betonuntergrund in dem vor Reinigung mit Pflanzenfett präparierten Bereich. Bei der Mehrzahl der Prüfungen konnte ein Adhäsionsversagen zwischen Beschichtung (hier: Haftbrücke) und Betonuntergrund festgestellt werden (vgl. Bild 72, links), z.T. erfolgte der Bruch aber auch im Beschichtungsmörtel (vgl. Bild 72, rechts). Die wesentlichen Ergebnisse der Haftzugprüfungen sind in Tabelle 25 enthalten.

Tabelle 25 Haftzugfestigkeiten der Beschichtung

Stichprobenumfang	Haftzugfestigkeit in N/mm ²		
	Mittelwert	kleinster Einzelwert	größter Einzelwert
Gesamtanzahl = 16	1,29	0,13	2,19
präparierter Untergrund = 8	> 0,97	0,13	> 1,82
unpräparierter Untergrund = 8	1,62	0,75	2,19

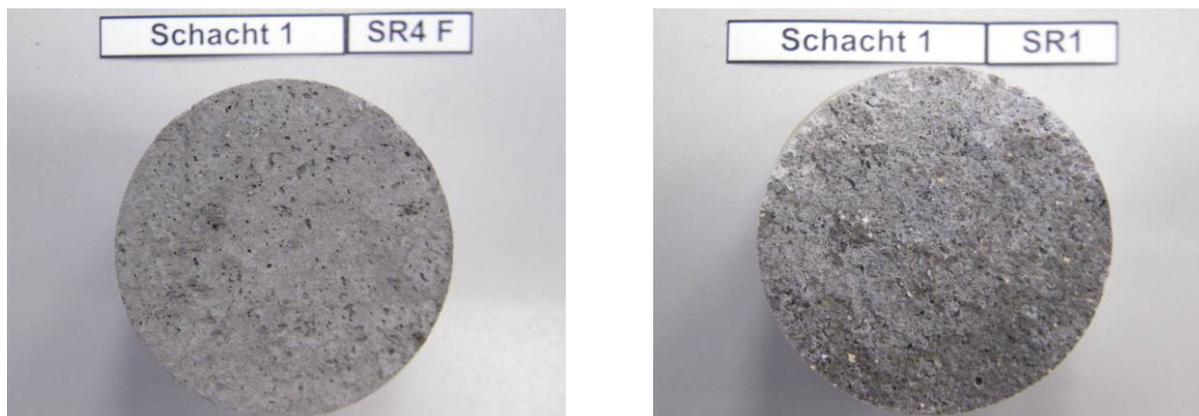


Bild 72 Bruchstellen, exemplarisch für ein vollständiges Versagen in der Verbundfuge (links) sowie im Beschichtungsmörtel (rechts)

Beschichtungsdicke

Die Beschichtungsdicke betrug im Mittel 17,4 mm bei einer Bandbreite der einzelnen Messwerte von 10,0 mm bis 23,8 mm. In der Tendenz war dabei eine Zunahme der Beschichtungsdicke von oben und von unten zur Bauwerksmitte hin zu erkennen.

Weitere Untersuchungen

Während der Beschichtungsarbeiten wurden stichprobenhaft die Mörtelkonsistenzen überprüft und aus derselben Materialcharge Mörtelprismen für die Bestimmung der Biegezug- und Druckfestigkeit gewonnen. Die Messwerte für das Ausbreitmaß können Tabelle 26 entnommen werden.

Tabelle 26 Ausbreitmaß [42] und Konsistenz [43] des Frischmörtels

Materialentnahme (Bauabschnitt)	Ausbreitmaß	Konsistenz
Schachtring 5	13,9 cm	steif
Schachtring 4	13,9 cm	steif
Schachtring 1	13,4 cm	steif

Die mittlere Biegezugfestigkeit betrug nach 28 Tagen ca. 6,8 N/mm², für die Druckfestigkeit ergaben sich im Mittel etwa 52,9 N/mm². Der Hersteller gibt für die Biegezugfestigkeit Werte von ≥ 8 N/mm² an, für die Druckfestigkeit $\geq 60,0$ N/mm².

Fazit

Die Beschichtung dichtete alle planmäßig vorgeschädigten und ungeschädigten Bereiche des Schachtes über die gesamte Versuchsdauer sicher ab, es war kein Wassereindrang in den Schacht zu erkennen. Vereinzelt konnte auf der Beschichtungsfläche ausgefallenes Tauwasser festgestellt werden.

6.2.2.6 ombran MHP

Ein präparierter Schacht, wie in Abschnitt 6.1 dargestellt, wurde mit dem Mörtel ombran MHP von Hand beschichtet. Bei dem Mörtel handelte es sich um einen kunststoffmodifizierten Zementmörtel (vgl. Abschnitt 4.3.2.2).

Untergrundvorbereitung

Wesentliche Verfahrensschritte:

1. Aufstreichen eines Fettlösers mit einem Quast, Verarbeitung und Einwirkdauer ca. 70 Minuten;
2. Hochdruckwasserstrahlen (ca. 260 bar und ca. 20 l/min, Kaltwasser) mittels Handlanze und Rotationsdüse, Dauer ca. 10 Minuten;
3. Erneutes Aufstreichen eines Fettlösers mit einem Quast, Verarbeitung und Einwirkdauer ca. 45 Minuten;
4. Erneutes Hochdruckwasserstrahlen (s.o.), Dauer ca. 15 Minuten;
5. Hochdruckwasserstrahlen (ca. 340 bar und 22 l/min, Kaltwasser) unter Beimengung von festem Strahlgut mittels handgeführter Lanze (vgl. Bild 73, links), Dauer ca. 45 Minuten;
6. Abspülen der Schachtwand mit Wasser, Dauer ca. 5 Minuten;
7. Entfernen des Strahlguts und Reinigung der Schachtsohle, Dauer ca. 20 Minuten.



Bild 73 Wasser-Feststoff-Strahlen mit Hochdruck und Kaltwasser (links), Ergebnis der Untergrundvorbereitung (rechts)

Ergebnis der Untergrundvorbereitung

Die Rauigkeit der vorbereiteten Betonoberfläche betrug überwiegend ca. 1 mm. Das oberflächennahe Korn(gerüst) ist weitgehend nicht freigelegt worden (vgl. Bild 73, rechts). Die Untergrundvorbereitung dauerte drei Stunden und dreißig Minuten.

Beschichtungsarbeiten

Wesentliche Verfahrensschritte:

1. Einsprühen der Schachtwand mit Wasser (vgl. Bild 74, links);

2. Einbürsten der Haftbrücke (ombran HB) mittels Quast in Bereichen, die unmittelbar danach beschichtet wurden (vgl. Bild 74, rechts);
3. Sukzessives Auftragen der Beschichtung mittels Kelle und Stahlglätter von oben nach unten (vgl. Bild 75, links);
4. Aufsprühen eines Nachbehandlungsmittels auf die Beschichtungsoberfläche.



Bild 74 Vornässen des Betonuntergrunds (links), Aufquasten der Haftbrücke (rechts)



Bild 75 Auftragen des Mörtels (links), Blick in den beschichteten Schacht (rechts)

Arbeitsaufwand und Materialverbrauch

Das Beschichten des Schachtes dauerte etwa sechs Stunden und dreißig Minuten. Dabei wurden insgesamt ca. 525 kg Beschichtungsmörtel und 16 kg der Haftbrücke verarbeitet.

Inspektionsergebnisse GW 0

Etwa eine Woche nach dem Auftragen der Beschichtung konnten nahezu alle Hohlstellen aus planmäßiger Verbundschwächung durch Trennmittel bei einem Abklopfen der Beschichtung akustisch festgestellt werden, jedoch in einer deutlich geringeren Ausdehnung als erwartet. Darüber hinaus bildeten sich im Schachtunterteil an drei Stellen unplanmäßig Hohlstellen in einer Größe von ca. 30 x 30 cm. Risse in der Beschichtung waren hingegen nicht zu erkennen.

Inspektionsergebnisse GW I - Kurzzeit und GW II - Kurzzeit

Es konnten keine Auffälligkeiten an der Beschichtung festgestellt werden. Alle Hohlstellen unterhalb des jeweiligen Wasserstandes waren bei einem Abklopfen der Beschichtung akustisch nicht mehr wahrnehmbar.

Inspektionsergebnisse GW II - Langzeit

Im Beobachtungszeitraum zeigten sich im Bereich einer Hohlstelle aus planmäßiger Verbundschwächung durch Trennmittel (FU 2, vgl. Bild 76, links) und der zweiten Schachtringfuge SF 2 horizontale Risse. An beiden Stellen befanden sich bereichsweise weiße Ausblühungen. Geringfügiger, nicht messbarer Eindrang von Feuchtigkeit konnte jedoch nur im Bereich der o.g. Hohlstelle FU 2 festgestellt werden (vgl. Bild 76, rechts).

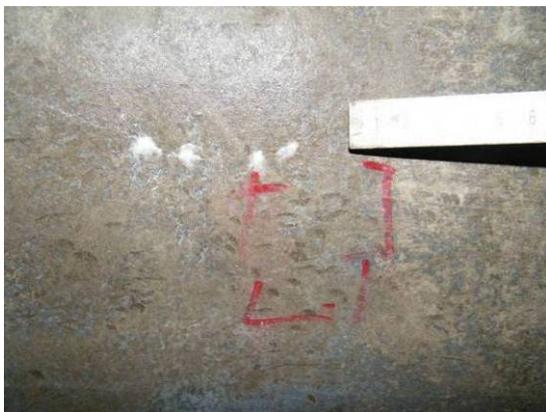


Bild 76: Beschichtung unter Grundwassereinwirkung: Weiße Ausblühungen an einem Riss im Bereich einer Hohlstelle aus planmäßiger Verbundschwächung durch Trennmittel (FU 2) ohne Feuchteindrang (links) und mit geringer Feuchtefahne (rechts)

An der linken Einbindestelle des vierten Steigbügels von unten war innerhalb der ersten Versuchshälfte ein messbarer Wassereindrang von maximal 0,75 ml/s (entspricht ca. 65 Liter pro Tag, vgl. Bild 77, links) vorhanden. Zum Ende der Versuche jedoch nahm der Wassereindrang ab (letzte Messung: 0,07 ml/s, entspricht ca. sechs Liter pro Tag) und konnte schließlich nicht mehr messtechnisch erfasst werden, da sich keine Tropfen an der Schachtwand mehr bildeten. Lediglich Feuchtefahnen und bräunliche, schlammähnliche Anhaftungen auf der Beschichtungsoberfläche waren zu dieser Zeit erkennbar (vgl. Bild 77, rechts).



Bild 77 Beschichtung unter Grundwassereinwirkung: Abtropfendes Wasser, eingedrungen an dem linken Einbindebereich des vierten Steigbügels (links), Wasserfließspuren auf der Beschichtung bis in das Gerinne hinein (rechts)

Weitere Auffälligkeiten an der Beschichtung wurden im gesamten Beobachtungszeitraum nicht festgestellt.

Haftzugprüfungen

Die Haftzugprüfungen wurden an Stellen durchgeführt, die bei einem Abklopfen auf eine Verbundwirkung schließen ließen. Stellen mit planmäßiger Verbundschwächung durch Trennmittel wurden grundsätzlich nicht auf Haftzugfestigkeit geprüft. Bei insgesamt 16 durchgeführten Haftzugprüfungen konnte in 15 Fällen ein Haftzugwert messtechnisch bestimmt werden³. An einer Prüfstelle löste sich bereits beim Vorbohren die Beschichtung vom Betonuntergrund in dem vor Reinigung mit Pflanzenfett präparierten Bereich. Bei nahezu allen Prüfungen konnte ein Adhäsionsversagen zwischen Beschichtung (hier: Haftbrücke) und Betonuntergrund festgestellt werden (Bild 78). Die wesentlichen Ergebnisse der Haftzugprüfungen sind in Tabelle 27 enthalten.

Tabelle 27 Haftzugfestigkeiten der Beschichtung

Stichprobenumfang	Haftzugfestigkeit in N/mm ²		
	Mittelwert	kleinster Einzelwert	größter Einzelwert
Gesamtanzahl = 16	1,04	0,24	2,02
präparierter Untergrund = 8	0,75	0,24	1,89
unpräparierter Untergrund = 8	1,33	0,34	2,02



Bild 78 Bruchstelle, exemplarisch für ein vollständiges Versagen in der Verbundfuge

Beschichtungsdicke

Die Beschichtungsdicke betrug im Mittel 18,4 mm bei einer Bandbreite der einzelnen Messwerte von 13,7 mm bis 20 mm. In der Tendenz war dabei eine Zunahme der Beschichtungsdicke von oben und unten zur Bauwerksmitte hin zu erkennen.

Weitere Untersuchungen

Während der Beschichtungsarbeiten wurden stichprobenhaft die Mörtelkonsistenzen überprüft und aus derselben Materialcharge Mörtelprismen für die Bestimmung der Biegezug- und Druckfestigkeit gewonnen. Die Messwerte für das Ausbreitmaß können Tabelle 28 entnommen werden.

Tabelle 28 Ausbreitmaß [42] und Konsistenz [43] des Frischmörtels

Materialentnahme (Bauabschnitt)	Ausbreitmaß	Konsistenz
Schachtring 7	11,6 cm	steif
Schachtring 6	12,8 cm	steif
Schachtring 3	13,0 cm	steif
Schachtring 1	12,3 cm	steif

Die mittlere Biegezugfestigkeit betrug nach 28 Tagen ca. 6,9 N/mm², für die Druckfestigkeit ergaben sich im Mittel etwa 69,1 N/mm². Der Hersteller gibt für die Biegezugfestigkeit einen Wert von 6,2 N/mm² an und für die Druckfestigkeit von 52,2 N/mm².

Fazit

Während des gesamten Beobachtungszeitraums zeigten sich an planmäßig vorgeschädigten und ungeschädigten Bereichen des Schachtes keine wesentlichen Auffälligkeiten an der Beschichtung. Es war kein messtechnisch erfassbarer Wassereindring vorhanden, die nicht abflusswirksame Feuchtefahne bildete sich ausschließlich in dem Bereich mit einer Hohlstelle aus planmäßiger Verbundschwächung durch Trennmittel (FU 2).

Ein geringfügiger, jedoch abflusswirksamer Wassereindrang war lediglich an der Einbindestelle eines Steigbügels vorhanden. Zum Versuchsende nach etwa fünf Monaten war dieser Wassereindrang jedoch so gering, dass sich keine Tropfen an der Schachtwand bildeten. Daher war er nicht mehr messbar und nur noch in Form von Feuchtefahnen auf der Beschichtung zu erkennen.

6.2.2.7 SD 1 -W

Ein präparierter Schacht, wie in Abschnitt 6.1 dargestellt, wurde mit dem Mörtel SD 1 -W jeweils zur Hälfte von Hand und im Anspritzverfahren beschichtet. Bei dem Mörtel handelte es sich um einen 2-komponentigen Silikatmörtel (vgl. Abschnitt 4.3.2.2). Mitarbeiter des Materialherstellers begleiteten die Sanierungsarbeiten.

Untergrundvorbereitung

Wesentliche Verfahrensschritte:

1. Aufquasten eines Fettlösers, Verarbeitung und Einwirkdauer ca. 40 Minuten;
2. Hochdruckwasserstrahlen (ca. 350 bar, Heißwasser $T \approx 75^\circ$ bis 90° C) unter Beimischung von festem Strahlgut (Schmelzkammerschlacke, Körnung: 1 - 2 mm) mittels Handlanze, Dauer ca. 25 Minuten;
3. Hochdruckwasserstrahlen (ca. 380 bar und 22 l/min, Kaltwasser) mittels handgeführter Lanze und Rotationsdüse, Dauer ca. 35 Minuten (vgl. Bild 79, links);
4. Entfernen des Strahlguts und Reinigen der Schachtsohle, Dauer ca. 15 Minuten.

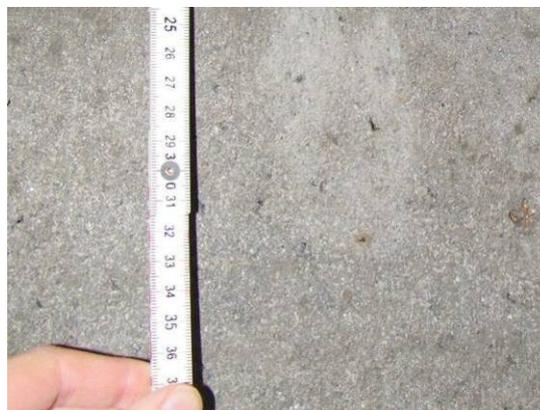


Bild 79 Untergrundvorbereitung mittels Hochdruckwasser-Strahlen (links),
Ergebnis der Untergrundvorbereitung (rechts)

Ergebnis der Untergrundvorbereitung

Die Rauigkeit der vorbereiteten Betonoberfläche beträgt überwiegend ca. 1 mm. Das oberflächennahe Korn(gerüst) ist weitgehend nicht freigelegt worden (vgl. Bild 79, rechts). Die Untergrundvorbereitung dauerte ca. zwei Stunden. Nach erfolgter Inspektion erteilte der Mitarbeiter des Materialherstellers die Freigabe zur Beschichtung des Schachtes.

Beschichtungsarbeiten

Unmittelbar vor Beginn der Beschichtungsarbeiten wies der Materialhersteller und Sanierer nachdrücklich darauf hin, dass das Beschichtungsmaterial aufgrund der vergleichsweise weichen Materialkonsistenz für eine Überbrückung der Schachtringfugen - wie in der Versuchsplanung vorgesehen - nicht geeignet ist und nur nach vorheriger Reprofilierung der Ringfugen eingesetzt werden kann. In diesem Fall wurde daher eine Verfüllung der Ringfugen auf ca. 0,5 cm Tiefe bis zur Hinterfüllschnur aus Schaumstoff zugelassen.

Wesentliche Verfahrensschritte:

1. Abdichten und Reprofilieren der Schachtringfugen und Rohranbindungen mit einem Dichtspachtel;
2. Aufbringen der Beschichtung in der oberen Schachthälfte von Hand (vgl. Bild 80, links);
3. Aufsprühen der B-Komponente des Beschichtungsmaterials auf die noch frische Beschichtung;
4. Abreiben der bereits anreagierten Beschichtung mit einem feuchten Schwamm;
5. Aufbringen der Beschichtung mittels Anspritzverfahren in der unteren Schachthälfte in zwei Lagen (vgl. Bild 80, rechts);
6. Aufsprühen der B-Komponente des Beschichtungsmaterials auf die noch frische Beschichtung;
7. Abreiben der bereits anreagierten Beschichtung mit einem feuchten Schwamm (vgl. Bild 81, links);
8. Nachbehandeln der Beschichtung durch Aufstreichen eines Verdunstungsschutzes.



Bild 80 Materialauftrag von Hand mittels Kelle und Glätter (links) und im Nassspritzverfahren (rechts)



Bild 81 Abreiben der Beschichtung mit einem feuchten Schwamm (links), Blick in den beschichteten Schacht (rechts)

Arbeitsaufwand und Materialverbrauch

Das Beschichten des Schachtes dauerte etwa acht Stunden. Dabei wurden insgesamt ca. 450 kg der Komponente A und 110 kg der Komponente B des Beschichtungsmaterials verarbeitet. Von dem Nachbehandlungsmittel wurden etwa 2,5 kg auf die beschichtete Schachtwand aufgebracht.

Inspektionsergebnisse GW 0

Vor der Flutung des Versuchsstandes waren alle Hohlstellen aus planmäßiger Verbundschwächung durch Trennmittel in ihrer vorgesehenen Ausdehnung bei einem Abklopfen akustisch wahrnehmbar.

Inspektionsergebnisse GW I - und GW II - Kurzzeit

Es konnten keine Auffälligkeiten an der Beschichtung festgestellt werden. Keine der Hohlstellen aus planmäßiger Verbundschwächung durch Trennmittel war bei einem Abklopfen akustisch wahrnehmbar.

Inspektionsergebnisse GW II - Langzeit

Innerhalb des Beobachtungszeitraums waren alle Hohlstellen aus planmäßiger Verbundschwächung durch Trennmittel (FU 2, 4 und 6, jeweils beidseitig) bei einem Abklopfen akustisch nicht lokalisierbar.

Jedoch zeigten sich dort einzelne Risse, an denen sich Feuchtefahnen bildeten und z.T. weiße Ausblühungen anhafteten (vgl. Bild 82, links). Die Feuchtefahnen waren in ihrer Ausdehnung weitgehend auf die Bereiche der Hohlstellen beschränkt. Der nicht abflusswirksame Wassereindrang konnte dort ebenso messtechnisch nicht erfasst werden wie an dem einen geringfügig undichten Einbindebereich des vierten Steigbügels von unten (vgl. Bild 82, rechts).

Vereinzelt befanden sich weiße Anhaftungen auf der Beschichtungsoberfläche, wobei es sich nach Angaben des Materialherstellers um auskristallisierte Salze handelt, die keine Auswirkungen auf die Beschichtungsqualität haben.



Bild 82 Feuchtigkeit auf der Beschichtung unterhalb eines Risses im Bereich einer Hohlstelle aus planmäßiger Verbundschwächung durch Trennmittel (FU 6p, links), Feuchtfahne unterhalb des linken Einbindebereichs des vierten Steigbügels (rechts)

In Bereichen der lokalen Schädigungen LS 3, 5 und 7 zeigten sich dunkle Verfärbungen in der Beschichtung (vgl. Bild 83, links). Feuchtigkeitsmessungen auf der Oberfläche ergaben hier jedoch keine Unterschiede im Vergleich zu hellen Bereichen der Beschichtung. Nach Ansicht des Materialherstellers könnten diese Verfärbungen dennoch ein Anzeichen für das hinter der Beschichtung anstehende Wasser sein.



Bild 83 Dunkle Färbung der Beschichtung im Bereich einer lokalen Fehlstelle in Schachtring 3 (links), minderfestes Beschichtungsmaterial im unteren Bereich des Schachtes kann mit einem Spachtel ca. 2 mm tief abgeschabt werden (rechts)

Im unteren Bereich des Schachtes war das Beschichtungsmaterial in Teilbereichen von weicher Konsistenz und konnte mit einem Spachtel bis zu 2 mm tief abgetragen werden (vgl. Bild 83, rechts). Darunter befand sich allerdings fester Beschichtungsmörtel, der keine weiteren Auffälligkeiten zeigte.

Die von Hand aufgetragene Beschichtung in der oberen Schachthälfte war im Gegensatz zu der aufgespritzten Beschichtung in der unteren Schachthälfte von vergleichsweise welliger Struktur.

Haftzugprüfungen

Die Haftzugprüfungen wurden an Stellen durchgeführt, die bei einem Abklopfen der Beschichtung auf eine Verbundwirkung schließen ließen. Stellen mit planmäßiger Verbundschwächung durch Trennmittel wurden grundsätzlich nicht auf Haftzugfestigkeit geprüft. An 16 Prüfstellen wurde die Haftzugfestigkeit messtechnisch bestimmt. Die wesentlichen Ergebnisse der Haftzugprüfungen sind in Tabelle 29 enthalten. Mit Blick auf die Bruchflächen zeigte jeweils etwa die Hälfte der Prüfstellen ein Adhäsionsversagen in der Verbundfuge zwischen Beschichtung und Untergrund (Bild 84, links) sowie ein Kohäsionsversagen im Beschichtungsmörtel (Bild 84, rechts), dabei z.T. auch oberflächennah.

Tabelle 29 Haftzugfestigkeiten der Beschichtung

Stichprobenumfang	Haftzugfestigkeit in N/mm ²		
	Mittelwert	kleinster Einzelwert	größter Einzelwert
Gesamtanzahl = 16	1,10	0,13	1,89
präparierter Untergrund = 8	1,19	0,86	1,83
unpräparierter Untergrund = 8	1,00	0,13	1,89

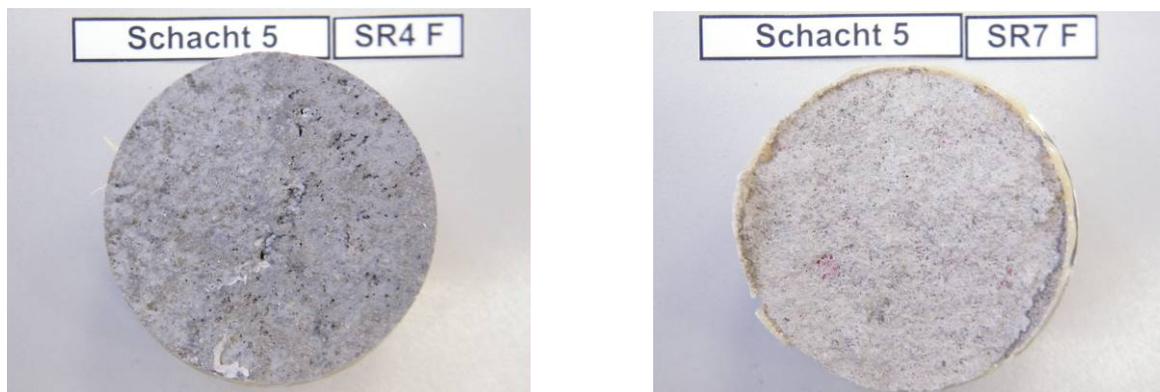


Bild 84 Bruchstellen, exemplarisch für ein vollständiges Versagen in der Verbundfuge (links) und im Beschichtungsmörtel (rechts)

Beschichtungsdicke

Die Beschichtungsdicke betrug im Mittel 7,2 mm bei einer Bandbreite der einzelnen Messwerte von 4,7 mm bis 10,4 mm. Dabei streuten die Messwerte über die gesamte Schachthöhe.

Weitere Untersuchungen

Während der Beschichtungsarbeiten wurden stichprobenhaft die Mörtelkonsistenzen überprüft und aus derselben Materialcharge Mörtelprismen für die Bestimmung der Biegezug- und Druckfestigkeit gewonnen. Die Messwerte für das Ausbreitmaß können Tabelle 30 entnommen werden.

Tabelle 30 Ausbreitmaß [42] und Konsistenz [43] des Frischmörtels

Materialentnahme (Bauabschnitt)	Ausbreitmaß	Konsistenz
Schachtring 5 - händisch	17,0 cm	plastisch
Schachtring 2 - maschinell	19,0 cm	plastisch

Die mittlere Biegezugfestigkeit betrug nach 28 Tagen ca. 4,0 N/mm², für die Druckfestigkeit ergaben sich im Mittel 29,7 N/mm². Der Hersteller gibt für die Biegezugfestigkeit 5 N/mm² und für die Druckfestigkeit 25 N/mm² an.

Fazit

Während des gesamten Beobachtungszeitraums zeigten sich an planmäßig vorgeschädigten und ungeschädigten Bereichen des Schachtes keine wesentlichen Auffälligkeiten an der Beschichtung. Es war kein messtechnisch erfassbarer Wassereindring vorhanden, nicht abflusswirksame Feuchtefahnen bildeten sich ausschließlich in den Bereichen mit Hohlstellen aus planmäßiger Verbundschwächung durch Trennmittel (FU 2, 4 und 6, jeweils im vor Reinigung präparierten und unpräparierten Bereich) und an einer Steigbügleinbindung.

Da das Beschichtungsmaterial laut Hersteller bei Überbrückung von Schachtringfugen unbedingt einer vorherigen Reprofilierung bedarf, wurde hier eine geringfügige Verfüllung der Ringfugen auf ca. 0,5 cm Tiefe bis zur Schaumstoffschnur zugelassen. In der Folge kann eine Abdichtungswirkung in diesen Bereichen nicht allein der Beschichtung zugeschrieben werden.

Im unteren Schachtbereich zeigte sich eine weiche Beschichtungsmörteloberfläche. Nach Aussage des Materialherstellers kann dies möglicherweise auf das nachträgliche Abreiben der Beschichtung mit der Flüssig-Komponente B zurückgeführt werden, wenn der nachträgliche Auftrag dieser Komponente das Mischungsverhältnis des Beschichtungsmörtels nachteilig verändert hat. Jedoch bleibt festzuhalten, dass die Beschichtung unter der weichen Oberflächenschicht noch fest war und einen nachweisbaren Verbund zum Untergrund aufwies. Darüber hinaus konnte in diesem Bereich kein Wassereindring festgestellt werden.

6.2.3 Polymere Beschichtungen

6.2.3.1 Übersicht

Polymere Beschichtungen wurden in fünf Schachtbauwerke mit bereits eingebrachten Fehlstellen eingebaut. Die einzelnen Beschichtungsarbeiten sowie die Ergebnisse von Schachtinspektionen an den jeweiligen Kunststoffbeschichtungen sind in diesem Abschnitt dargestellt. In Tabelle 31 sind die verwendeten Beschichtungsmaterialien und deren Applikationstechnik zusammengestellt.

Tabelle 31 Polymere Beschichtungen

Beschichtungsmaterial	Materialgruppe	Hersteller	Applikationstechnik
Autoschicht	Polymer-Silikat-Harz	ASAG Umwelttechnik, Neukirchen-Vluyn	angeschleudert
Eprocoat	Polyharnstoff	Trelleborg Pipe Seals Duisburg GmbH, Duisburg	aufgesprüht
Oldodur WS 56	Polyurethan	PSL Handels GmbH, Arnsberg	aufgesprüht und angeschleudert
Polyfill	Polymer-Silikat-Harz	Innovative Sewer Techno- logies GmbH, Bochum	angespritzt
Ultracoat	Epoxidharz	Warren Environmental, Inc., US - Carver, MA	aufgesprüht

6.2.3.2 Autoschicht auf einem Handlaminat

Der Materialhersteller bzw. Sanierer machte bereits im Vorfeld der Sanierungsarbeiten darauf aufmerksam, dass das Beschichtungsmaterial nicht zur Überbrückung von Schachtringfugen und größeren Löchern geeignet ist und daher diese Bereiche zwingend mit einem mineralischen Mörtel zu reprofilieren seien. Um die vorgesehenen Versuchsrandbedingungen auch bei diesem Verfahren bei zu behalten, d.h. eine vorhergehende Abdichtung auszuschließen, wurde auf eine altvertraute Einbauvariante ausgewichen. Dabei handelte es sich um eine Kombination aus Auskleidung und Beschichtung. Der präparierte Schacht (vgl. Abschnitt 6.1) wurde zunächst mit einem Handlaminat, bestehend aus multidirektionalen Gewebematten und einem Polymer-Silikatharz, ausgekleidet und anschließend mit dem Material „Autoschicht“ im Anschleuderverfahren beschichtet. Bei dem Beschichtungsmaterial handelt es sich um ein Polymer-Silikatharz (vgl. Abschnitt 4.3.3.2).

Untergrundvorbereitung

Wesentliche Verfahrensschritte:

1. Aufbringen und Einbürsten eines Fettlösers von Hand auf die mit Pflanzenfett präparierte Schachtseite, Dauer einschließlich Einwirkzeit ca. 60 Minuten;
2. Abspülen der Schachtwand mit kaltem Wasser, Dauer ca. 15 Minuten;
3. Maschinelles Hochdruckwasserstrahlen mittels rotierender Reinigungsdüsen (TSSR⁴) mit ca. 300 bar und Kaltwasser (vgl. Bild 85, links), Dauer ca. 80 Minuten;
4. Optische Kontrolle der zuvor gereinigten Schachtwand, Dauer ca. 15 Minuten;
5. Erneutes Einsprühen der Schachtwand mit einem Fettlöser, Dauer einschließlich Einwirkzeit ca. 65 Minuten;
6. Maschinelles Hochdruckwasserstrahlen mittels rotierender Reinigungsdüsen (TSSR⁴) mit ca. 300 bar und Heißwasser mit $T \approx 90^\circ \text{C}$, Dauer ca. 20 Minuten;
7. Erneute Kontrolle der gereinigten Schachtwand, Dauer ca. 20 Minuten;

8. Säubern und Abkleben aller Steigbügel, dabei letztmalige Kontrolle der Schachtwand, Dauer ca. 80 Minuten;
9. Reinigung noch dunkler Stellen von Hand mit Aceton auf der präparierten Seite des Schachtes, Dauer ca. 30 Minuten.



Bild 85 Schachtreinigung mittels rotierender Düsen (links), Ergebnis der Untergrundvorbereitung (rechts)

Ergebnis der Untergrundvorbereitung

Die Rauigkeit der vorbereiteten Betonoberfläche betrug überwiegend ca. 1 mm. Das oberflächennahe Korn(gerüst) ist weitgehend nicht freigelegt worden (vgl. Bild 85, rechts). Nach erfolgter Inspektion erteilte der Vorarbeiter der Sanierungsfirma die Freigabe zur Laminierung und anschließender Beschichtung des Schachtes. Die Untergrundvorbereitung dauerte insgesamt etwa sechs Stunden und dreißig Minuten.

Sanierungsarbeiten

Wesentliche Verfahrensschritte - Auskleidung mittels Handlaminat:

1. Aufstreichen des Polymer-Silikatharzes auf die gereinigte Schachtwand;
2. Andrücken der Gewebematten mit einer Rolle auf das zuvor aufgestrichene Harz (vgl. Bild 86, links);
3. Tränken der Gewebematten mit Harz;
4. Anwerfen von Quarzsand (Körnung: 0,7 – 1,2 mm) auf das klebeaktive Harz.



Bild 86 Laminierarbeiten vor der Beschichtung: Andrücken der Gewebematten (links), Blick in den mittels Laminat ausgekleideten Schacht (rechts)

Wesentliche Verfahrensschritte - Beschichtung:

1. Aufbauen und Einrichten der Maschinenteknik für das Anschleuderverfahren;
2. Anmischen des 3-komponentigen Beschichtungsmaterials von Hand mittels Zweiwellen-Mischer (vgl. Bild 87, rechts);
3. Kontinuierliches Beschicken der Förderpumpe zur stillstandsfreien Beschichtung des Schachtes (vgl. Bild 87, links);
4. Händisches Nachbearbeiten von Steigbügleinbindungen.



Bild 87 Baustelleneinrichtung für Beschichtungsarbeiten (links), Anmischen des Beschichtungsmaterials vor Befüllen der Förderpumpe (rechts)



Bild 88 Schleudermotor während der Beschichtung (links), Blick in den beschichteten Schacht (rechts)

Arbeitsaufwand und Materialverbrauch

Das Auskleiden mit dem Handlaminat und das nachfolgende Beschichten des Schachtes dauerten etwa zwölf Stunden. Dabei wurden für die Laminierarbeiten insgesamt etwa 14 kg Harz und 7 kg Härter sowie etwa 19 m² Gewebematten benötigt. Die Beschichtung mit Autoschicht erforderte 47,6 kg Harz, 29,4 kg Härter und 7 kg Füller.

Inspektionsergebnisse GW 0

Vor der Flutung des Versuchsstandes waren alle Hohlstellen aus planmäßiger Verbundschwächung durch Trennmittel bei einem Abklopfen akustisch wahrnehmbar, z.T. jedoch in geringerer Ausdehnung als erwartet. Darüber hinaus konnten durch Abklopfen einzelne, hohl liegende Bereiche von geringer Ausdehnung (ca. 3 x 3 cm) an drei Stellen in Schachtring 1 und 5 festgestellt werden. Auffälligkeiten an der Beschichtung wie etwa Risse, fehlender Materialauftrag, Pinholes etc. waren nicht sichtbar (vgl. Bild 89).

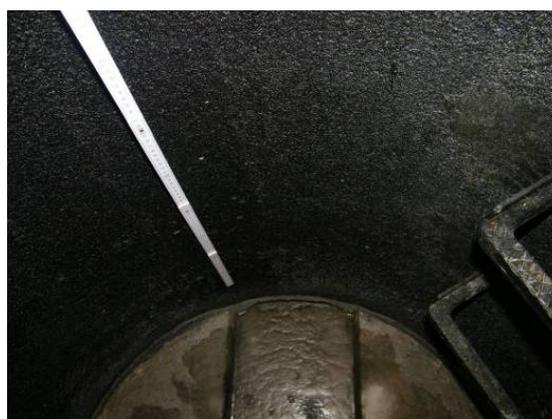


Bild 89 Kontrolle der Beschichtung ohne Grundwassereinwirkung: Rauhe Beschichtungsoberfläche im Bereich einer Schachtringfuge (links), Beschichtung im Schachtunterteil (rechts)

Inspektionsergebnisse GW I - Kurzzeit

Nach der Flutung des Versuchsstandes bis zum Wasserstand GW I drang an den Schachtringfugen SF 1 bis SF 4 Wasser in den Schacht ein. Die Infiltrationsmenge wurde nicht gemessen.

Inspektionsergebnisse GW II - Kurzzeit und GW II - Langzeit

Nach der Flutung des Versuchsstandes bis zum Wasserstand GW II zeigten sich an jeder Schachtringfuge (SF) bis zu acht Undichtigkeiten in der Beschichtung sowie dem darunter liegenden Handlaminat. Durch jede einzelne Undichtigkeit infiltrierte bis zu 3,5 ml/s in den Schacht, so dass die Gesamtmenge über alle Ringfugen zu etwa 0,2 l/s (entspricht etwa 17,3 m³/d) abgeschätzt werden kann (vgl. Bild 90). An der Materialprobe aus dem Bereich einer Schachtringfuge mit Undichtigkeit zeigte sich ein Loch in der Beschichtung und dem darunter liegenden Handlaminat mit einem Durchmesser von ca. 0,8 mm (vgl. Bild 91, rechts).



Bild 90 Autoschicht-Beschichtung unter Grundwassereinwirkung: Undichtigkeiten in allen Schachtringfugen (links), Detailaufnahme einer Ringfuge mit Wassereindrang (rechts)



Bild 91 Wassereindrang mit Schmutzfließspuren an allen Schachtringfugen (links), Materialprobe aus einem Bereich mit einer Undichtigkeit - fehlendes Material mit einem Durchmesser von ca. 0,8 mm (rechts)

Während des gesamten Beobachtungszeitraums mit maximalem Wasserstand zeigten sich keine wesentlichen Veränderungen an dem Zustand der beschichteten Aus-

kleidung und der infiltrierenden Wassermenge. Alle zuvor erkannten Hohlstellen konnten bei einem Abklopfen akustisch nicht mehr wahrgenommen werden. An allen Schadstellen lokale Schädigung (LS) und flächige Undichtigkeit (FU) konnte kein Wassereindrang festgestellt werden.

Haftzugprüfungen

Die Haftzugprüfungen wurden an Stellen durchgeführt, die bei einem Abklopfen des beschichteten Handlaminats auf eine Verbundwirkung schließen ließen. Stellen mit planmäßiger Verbundschwächung durch Trennmittel wurden grundsätzlich nicht auf Haftzugfestigkeit geprüft. Bei insgesamt 16 durchgeführten Haftzugprüfungen konnte in 14 Fällen ein Haftzugwert messtechnisch bestimmt werden. An zwei Prüfstellen löste sich bereits beim Vorbohren das beschichtete Handlaminat vom Betonuntergrund in dem vor Reinigung mit einem Pflanzenfett präparierten Bereich. Die wesentlichen Ergebnisse der Haftzugprüfungen sind in Tabelle 32 enthalten. Bei nahezu allen Prüfungen konnte ein Versagen in der Verbundfuge zwischen dem beschichteten Handlaminat und dem Betonuntergrund festgestellt werden (vgl. Bild 92).

Tabelle 32 Haftzugfestigkeiten der Beschichtung

Stichprobenumfang	Haftzugfestigkeit in N/mm ²		
	Mittelwert	kleinster Einzelwert	größter Einzelwert
Gesamtanzahl = 16	0,35	0,07	0,78
präparierter Untergrund = 8	0,28	0,16	0,63
unpräparierter Untergrund = 8	0,43	0,07	0,78

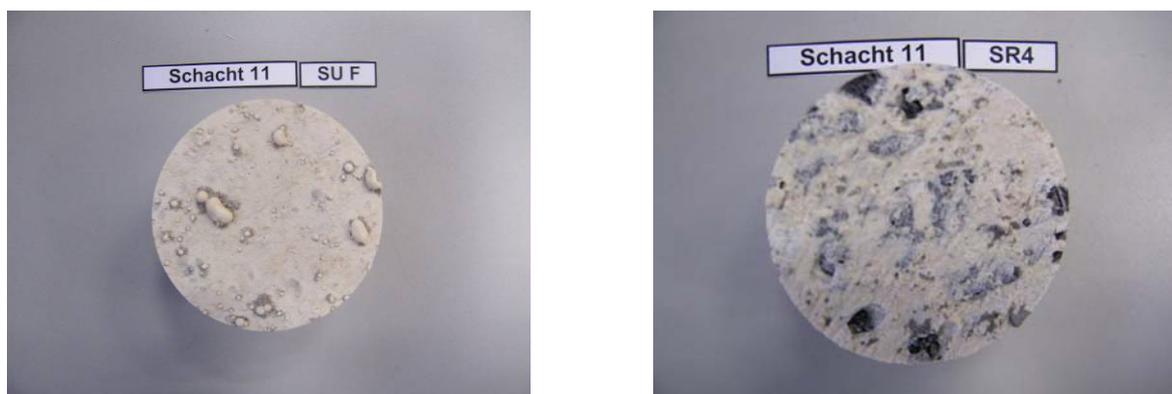


Bild 92 Bruchstellen, exemplarisch für ein vollständiges Versagen in der Verbundfuge zwischen beschichtetem Handlaminat und Betonuntergrund; Probekörper (rechts) zeigt bereichsweise kein Laminat sondern lediglich schwarzes Beschichtungsmaterial

Beschichtungs- und Handlaminatdicke

Die Dicke des Beschichtungsmaterials betrug im Mittel 4,8 mm bei einer Bandbreite der einzelnen Messwerte von 3,9 mm bis 6,7 mm. In der Tendenz war dabei eine Abnahme der Beschichtungsdicke von oben nach unten zu erkennen. Das Handla-

minat wies im Mittel lediglich eine Dicke von 1,4 mm auf bei einer Bandbreite der einzelnen Messwerte von 0,2 mm bis 3,2 mm. Die Messwerte streuten über die gesamte Schachthöhe.

Fazit

Das mit Autoschicht beschichtete Handlaminat wies in allen Schachtringfugen (SF) deutliche Undichtigkeiten auf. Die für diese Versuche entwickelte Sonderlösung (Beschichtung auf einem Handlaminat zur Überbrückung nicht reprofiliert Schachtringfugen) war offensichtlich nicht erfolgreich, um das Schadensbild „undichte Schachtringfuge“ gemäß Versuchsrandbedingungen zu sanieren. Zudem zeigten Messungen, dass das Laminat nur eine sehr geringe Schichtdicke hatte und partiell z.T. nicht vorhanden war (siehe Probekörper der Haftzugprüfungen). Eine Reprofilierung von Ringfugen und größeren Fehlstellen zur Herstellung einer glatten Untergrundfläche scheint also bei diesem Beschichtungsmaterial unerlässlich zu sein.

In den übrigen Bereichen dichtete das Material gut ab. Auffälligkeiten waren überwiegend als Hohlstellen im Bereich mit Trennmittleinsatz zu erkennen, aber auch hier ohne Beeinträchtigung der Dichtwirkung.

6.2.3.3 Eprocoat

Ein präparierter Schacht, wie in Abschnitt 6.1 dargestellt, wurde mit Eprocoat beschichtet. Bei dem Beschichtungsmaterial handelte es sich um einen Polyharnstoff (vgl. Abschnitt 4.3.3.2), der mittels handgeführter Düse auf die Schachtwand aufgesprüht wurde.

Untergrundvorbereitung

Wesentliche Verfahrensschritte:

1. Hochdruckwasserstrahlen mittels handgeführter Lanze (ca. 300 bar und 19 l/min, Heißwasser mit $T \approx 70^\circ \text{C}$, Rotationsdüse), Dauer ca. 15 Minuten;
2. Hochdruckwasserstrahlen mittels handgeführter Flächen-Rotationsdüse (etwa 300 bar und 19 l/min, Heißwasser mit $T \approx 95^\circ \text{C}$), Dauer ca. 45 Minuten;
3. Erneutes Hochdruckwasserstrahlen mittels handgeführter Lanze (ca. 300 bar und 19 l/min, Kaltwasser, Rotationsdüse, vgl. Bild 93, links), Dauer ca. 20 Minuten;
4. Trocknen der Schachtwand mittels Gebläse und Warmluft ($T = 32^\circ \text{C}$), Dauer ca. 25 Minuten;
5. Optische Kontrolle der gereinigten Schachtwandung, insbesondere auf der mit einem Pflanzenfett präparierten Seite, Dauer ca. 5 Minuten;
6. Prüfung der Oberflächenzugfestigkeit des Betons (= 2,97 N/mm² und Bruch zu 100 % in der Klebefuge) ohne Bohren einer Ringnut an einer Stelle, Dauer ca. 10 Minuten;
7. Ausblasen der Schachtringfugen mit Druckluft, Dauer ca. 5 Minuten;

8. Kontrolle der gereinigten Betonoberfläche mittels Ölteststreifen, Dauer ca. 5 Minuten;
9. Weitere Trocknung des Schachtes mit Warmluft, Dauer ca. 50 Minuten;
10. Messung der Oberflächenfeuchtigkeit ergibt überwiegend ca. 3,5 Masse-%, Dauer ca. 15 Minuten;
11. Abkleben der Steigbügel und letztmalige Inspektion des Schachtes durch die Sanierungsfirma, Dauer ca. 30 Minuten.



Bild 93 Hochdruckwasserstrahlen mit Heißwasser (links), Ergebnis der Untergrundvorbereitung (rechts)

Ergebnis der Untergrundvorbereitung

Die Rauigkeit der vorbereiteten Betonoberfläche betrug überwiegend ca. 1 mm. Das oberflächennahe Korn(gerüst) ist weitgehend nicht freigelegt worden (vgl. Bild 93, rechts). Nach erfolgter Inspektion erteilte der Vorarbeiter der Sanierungsfirma die Freigabe zur Beschichtung des Schachtes. Die Untergrundvorbereitung bzw. Schachtreinigung dauerte ca. drei Stunden, qualitätssichernde Untersuchungen nahmen etwa dreißig Minuten in Anspruch.

Beschichtungsarbeiten

Wesentliche Verfahrensschritte:

1. Auftragen des sog. Primers (eproprim E, Primer auf Polyurethanbasis als Haftverbesserer) mittels Quast von unten nach oben (vgl. Bild 94, links), in dem Bereich der planmäßigen Verbundschwächung durch Trennmittel (Schadstellen „flächige Undichtigkeit“ FU) wurde kein Primer aufgetragen;
2. Anwerfen von Quarzsand mit einer Körnung von 0,6 - 1,2 mm auf den klebeaktiven Primer (vgl. Bild 94, rechts);
3. Trocknen des Schachtes mit einem Heizgebläse, zunächst mit einer Temperatur $T \approx 45^\circ \text{C}$, im weiteren Verlauf bei etwa $T \approx 32^\circ \text{C}$;
4. Vorbereiten der Systemtechnik: Aufheizen und Rühren des Beschichtungsmaterials, Start der Pumpenanlage, Kontrolle der Düse und Sprühpistole etc.;
5. Abfegen von losem Sand auf der Schachtwand;

6. Messen der Oberflächenfeuchtigkeit auf der Schachtwandung, Umgebungstemperatur und relativen Luftfeuchtigkeit durch die Sanierungsfirma, Abgleich mit zulässigen Werten aus dem Verfahrenshandbuch;
7. Aufsprühen des Beschichtungsmaterials mittels handgeführter Düse von unten nach oben (vgl. Bild 95, links);
8. Kontrolle der Beschichtung durch die Sanierungsfirma, Kennzeichnung von Fehlstellen mit anschließendem Nachbearbeiten;
9. Entfernen des Steigeisenschutzes, Säubern der Schachtsohle.



Bild 94 Auftragen des Primers (links), Bestreuen des klebeaktiven Primers mit Quarzsand (rechts)



Bild 95 Aufsprühen des Beschichtungsmaterials im Schachtkonus (links), Blick in den beschichteten Schacht (rechts)

Arbeitsaufwand und Materialverbrauch

Das Beschichten des Schachtes dauerte etwa sechs Stunden und dreißig Minuten. Dabei wurden insgesamt ca. 120 kg Harz und Härter verarbeitet.

Inspektionsergebnisse GW 0

Vor der Flutung des Versuchsstandes war bei einem Abklopfen keine der Hohlstellen aus planmäßiger Verbundschwächung durch Trennmittel akustisch wahrnehmbar. Teilweise befanden sich Pinholes im Beschichtungsmaterial und die Beschichtungs-

oberfläche war überwiegend von unebener Struktur. Vereinzelt waren die Steigbügleinbindungen nicht vollständig mit Beschichtungsmaterial umschlossen.



Bild 96 *Eprocoat-Beschichtung ohne Grundwassereinwirkung: Bläschen in der Beschichtungsoberfläche (links), Beispiel für einen stärker strukturierten Bereich der Beschichtung und nicht vollständig mit Beschichtungsmaterial umschlossene Steigbügleinbindung (rechts)*

Inspektionsergebnisse GW I - Kurzzeit

Nach der Flutung des Versuchsstandes auf GW I war ein Ablösen der Beschichtung an den beiden Hohlstellen aus planmäßiger Verbundschwächung durch Trennmittel in Schachtring 2 (FU 2, beidseitig) deutlich zu erkennen. Auf der unpräparierten Seite des Schachtes löste sich die Beschichtung innerhalb des Schachtrings 2 über eine Höhe von ca. 40 cm ab, ein Wassereindrang war jedoch nicht vorhanden (vgl. Bild 97, links, oberer Bildbereich). Im Gegensatz dazu löste sich auf der vor Reinigung mit einem Pflanzenfett präparierten und anschließend gereinigten Seite des Schachtes die Beschichtung an der Hohlstelle in vertikaler Richtung ab und vergrößerte sich dann bis zum Gerinne-Rohrscheitel (vgl. Bild 97, rechts und links, unterer Bildbereich). In der Folge floß das Wasser zwischen Beschichtung und Betonuntergrund vertikal dem Gerinne zu.

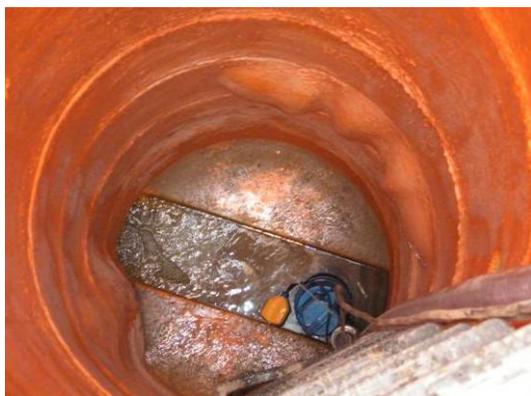


Bild 97 *Eprocoat-Beschichtung unter Grundwassereinwirkung (GW I): Abgelöste Beschichtung im Bereich von Hohlstellen aus planmäßiger Verbundschwächung durch Trennmittel FU 2, beidseitig (links) und erheblicher Wassereindrang im Gerinnebereich innerhalb der roten Markierung (rechts)*

Inspektionsergebnisse GW II - Kurzzeit

Die wassergefüllten Blasen im Bereich der Schadstelle FU 2 vergrößerten sich weiter nach Erreichen von GW II. Der bereits im Gerinnebereich geöffnete Blasenkanal auf der vor Reinigung mit Pflanzenfett präparierten Seite (FU 2p) führte dem Schacht eine Wassermenge von etwa 1,8 Liter pro Sekunde zu.

Inspektionsergebnisse GW II - Langzeit

Der Schacht wurde zu Beginn des Beobachtungszeitraums abgesperrt und geflutet, um in den übrigen Versuchsschächten auch weiterhin eine geordnete Wasserhaltung sicherzustellen. Eine weitere Beobachtung entfiel.

Haftzugprüfungen

Die Haftzugprüfungen wurden an Stellen durchgeführt, die bei einem Abklopfen der Beschichtung auf eine Verbundwirkung schließen ließen. Stellen mit planmäßiger Verbundschwächung durch Trennmittel wurden grundsätzlich nicht auf Haftzugfestigkeit geprüft. Bei insgesamt 16 durchgeführten Haftzugprüfungen konnte in 14 Fällen ein Haftzugwert messtechnisch bestimmt werden³. An zwei Prüfstellen löste sich bereits beim Vorbohren die Beschichtung vom Betonuntergrund, sowohl auf der vor Reinigung mit einem Pflanzenfett präparierten, als auch auf der nicht vorbehandelten Seite des Schachtes. Die wesentlichen Ergebnisse der Haftzugprüfungen sind in Tabelle 33 enthalten. Bei nahezu allen Prüfungen erfolgte der Bruch in der Verbundfuge zwischen Beschichtung und Betonuntergrund bzw. im Primer (vgl. Bild 98).

Tabelle 33 Haftzugfestigkeiten der Beschichtung

Stichprobenumfang	Haftzugfestigkeit in N/mm ²		
	Mittelwert	kleinster Einzelwert	größter Einzelwert
Gesamtanzahl = 16	0,78	0,65	1,12
präparierter Untergrund = 8	0,85	0,78	1,12
unpräparierter Untergrund = 8	0,70	0,65	1,04



Bild 98 Bruchstelle, exemplarisch für ein vollständiges Versagen in der Verbundfuge zwischen Beschichtung und Betonuntergrund bzw. im Primer

Beschichtungsdicke

Die Beschichtungsdicke betrug im Mittel 5,4 mm bei einer Bandbreite der einzelnen Messwerte von 3,5 mm bis 9,2 mm. Dabei variierte die Beschichtungsdicke über die gesamte Schachthöhe.

Fazit

In ungeschädigten Bereichen und an allen planmäßig geschädigten Bereichen oberhalb von Schachtring 2 ließ das Beschichtungsmaterial - bis auf einzelne Bläschen in der Oberfläche - keine Auffälligkeiten erkennen und dichtete hier im beobachteten Zeitraum sicher ab.

Das Ablösen der Beschichtung vom Betonuntergrund bei anstehendem Außenwasserdruck beschränkte sich zunächst auf die Bereiche mit Hohlstellen aus planmäßiger Verbundschwächung durch Trennmittel (Schadstellen FU 2, beidseitig) und vergrößerte sich von dort ausgehend in horizontaler (FU 2) und vertikaler Richtung (FU 2p). Auf der mit einem Pflanzenfett präparierten und anschließend gereinigten Seite des Schachtes schälte sich die Beschichtung soweit ab, dass schließlich erhebliche Wassermengen durch eine Öffnung oberhalb des Rohrscheitels dem Gerinne zufließen. Dies ist offensichtlich auf die in den angrenzenden Bereichen nur vergleichsweise geringe Haftzugfestigkeit der Beschichtung zurückzuführen, die somit dem anstehenden Wasserdruck keinen ausreichenden Widerstand leisten konnte.

6.2.3.4 Oldodur WS 56

Ein präparierter Schacht, wie in Abschnitt 6.1 dargestellt, wurde mit Oldodur WS 56 beschichtet. Bei dem Beschichtungsmaterial handelte es sich um ein Polyurethan (vgl. Abschnitt 4.3.3.2), das sowohl mittels handgeführter Düse, als auch im Sprüh-Schleuder-Verfahren auf die Schachtwandung aufgetragen wurde. Ein Mitarbeiter des Verfahrensanbieters begleitete die Sanierungsarbeiten.

Untergrundvorbereitung

Wesentliche Verfahrensschritte:

1. Aufsprühen eines Fettlösers, Einwirkdauer ca. 35 Minuten;
2. Hochdruckwasserstrahlen mittels handgeführter Lanze (ca. 320 bar und 23 l/min, Kaltwasser, Rotationsdüse, vgl. Bild 99, links), Dauer ca. 35 Minuten;
3. Druckwasserstrahlen mittels Handlanze (ca. 120 bar, Heißwasser $T \approx 90^\circ \text{C}$), Dauer ca. 5 Minuten;
4. Trocknen der Schachtwand mittels heizbarem Gebläse mit einer Wärmeleistung von 18,8 kW, Dauer ca. 90 Minuten;
5. Inspektion des vorbereiteten Schachtes durch den Verfahrensanbieter, Dauer ca. 15 Minuten;
6. Weiteres Trocknen der Schachtwand mittels Gebläse, Dauer ca. 10 Minuten.



Bild 99 Hochdruckwasserstrahlen mit Kaltwasser (links), Ergebnis der Untergrundvorbereitung (rechts)

Ergebnis der Untergrundvorbereitung

Die Rauigkeit der vorbereiteten Betonoberfläche beträgt überwiegend ca. 1 mm (vgl. Bild 99, rechts). Das oberflächennahe Korn(gerüst) ist weitgehend nicht freigelegt worden. Nach erfolgter Inspektion erteilte der Mitarbeiter des Verfahrens-anbieters die Freigabe zur Beschichtung des Schachtes. Die Untergrundvorbereitung dauerte insgesamt etwa drei Stunden und zwanzig Minuten.

Beschichtungsarbeiten

Wesentliche Verfahrensschritte:

1. Abkleben der Steigbügel mit einer Folie (vgl. Bild 101, links);
2. Aufstreichen des sog. Primers (BASF Mastertop P 677 Z, Primer auf Epoxidharzbasis, Haftverbesserer) mit einer Rolle auf die Betonoberfläche von unten nach oben (vgl. Bild 100, links);
3. Aufsprühen der Beschichtung mittels handgeführter Düse im Bereich der Steig-eisen, Schachtringfugen und Rohranbindungen (vgl. Bild 100, rechts);
4. Aufbauen und Einrichten der Maschinentchnik für das automatische Sprüh-Schleuder-Verfahren;
5. Flächiges Beschichten des Schachtkörpers mittels Sprüh-Schleuder-Verfahren von oben nach unten (vgl. Bild 101, links);
6. Nachbearbeiten von Vertiefungen in der Beschichtung mit Oldodur WS 56 Handpaste mit einem Pinsel;
7. Entfernen des Steigbügelschutzes.



Bild 100 Aufstreichen des Primers auf die Schachtwand (links), Beschichtungsauftrag mittels handgeführter Sprühdüse (rechts)



Bild 101 Anschleudern des Beschichtungsmaterials (links), Blick in den beschichteten Schacht (rechts)

Arbeitsaufwand und Materialverbrauch

Das Beschichten des Schachtes dauerte etwa drei Stunden. Dabei wurden insgesamt ca. 100 l Harz und Härter verarbeitet.

Inspektionsergebnisse GW 0

Vor der Flutung des Versuchsstandes waren bei einem Abklopfen in den Bereichen mit planmäßiger Verbundschwächung durch Trennmittel keine Hohlstellen zu erkennen. Vereinzelt zeigten sich Pinholes im Beschichtungsmaterial. Die Beschichtungsoberfläche war überwiegend glatt, in den Ringfugen z.T. aber auch von unebener Struktur.



Bild 102 Oldodur-Beschichtung ohne Grundwassereinwirkung: Pinhole in der Beschichtung (links) und geringfügig fehlendes Beschichtungsmaterial im Bereich einer Steigbügeleinbindung (rechts)

Inspektionsergebnisse GW I - Kurzzeit

Auch nach der Flutung des Versuchsstandes waren in den Bereichen mit planmäßiger Verbundschwächung durch Trennmittel bei einem Abklopfen keine Hohlstellen zu erkennen.

Im Beobachtungszeitraum bildeten sich an einer Steigbügeleinbindung Wassertropfen, die eine Infiltrationsintensität von ca. 0,1 ml/s (entspricht etwa 8,6 l/d, vgl. Bild 103, links) hatten. Weitere Auffälligkeiten an der Beschichtung waren zu diesem Zeitpunkt nicht erkennbar.

Inspektionsergebnisse GW II - Kurzzeit

Unmittelbar nach dem Aufbringen von GW II zeigten sich in der Schachtringfuge 7 im vor der Reinigung präparierten Bereich (SF 7 p) zwei Undichtigkeiten mit einer gesamten Infiltrationsmenge von ca. 40 ml/s (entspricht etwa 3,4 m³/d, vgl. Bild 103, rechts). Das Wasser infiltrierte durch Löcher in der Beschichtung, die im Bereich der Schachtringfuge 7 an Stellen mit ungleichmäßigem Materialauftrag entstanden sind. Die Infiltration durch diese Fehlstellen schwankte über den Beobachtungszeitraum geringfügig.

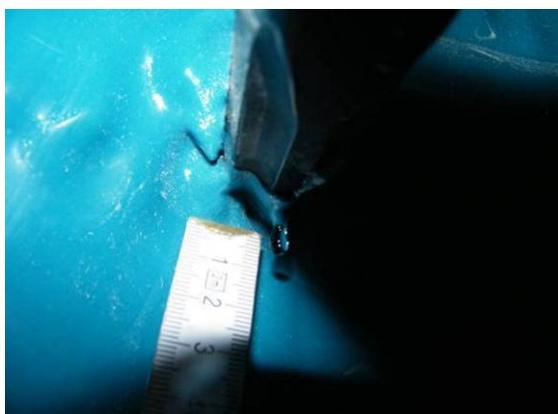


Bild 103 Oldodur-Beschichtung mit Grundwassereinwirkung: Wassertropfen an einer Steigbügeleinbindung (links), Wassereindrang im Bereich der obersten Schachtringfuge SF 7p (rechts)

Inspektionsergebnisse GW II - Langzeit

Nach ca. sieben Wochen riss die Beschichtung im Bereich einer Hohlstelle aus planmäßiger Verbundschwächung durch Trennmittel ohne Vorankündigung - z.B. durch Blasenbildung - auf und Wasser drang in den Schacht ein. Die Schichtdicke des Materials betrug an dem Riss lediglich 4,8 mm (s.a. Beschichtungsdicke). Hier infiltrierten ca. 0,8 Liter pro Sekunde (vgl. Bild 104) in den Schacht. Der Wassereindrang im Bereich der Schachtringfuge 7 (SF 7p) dauerte unvermindert an.

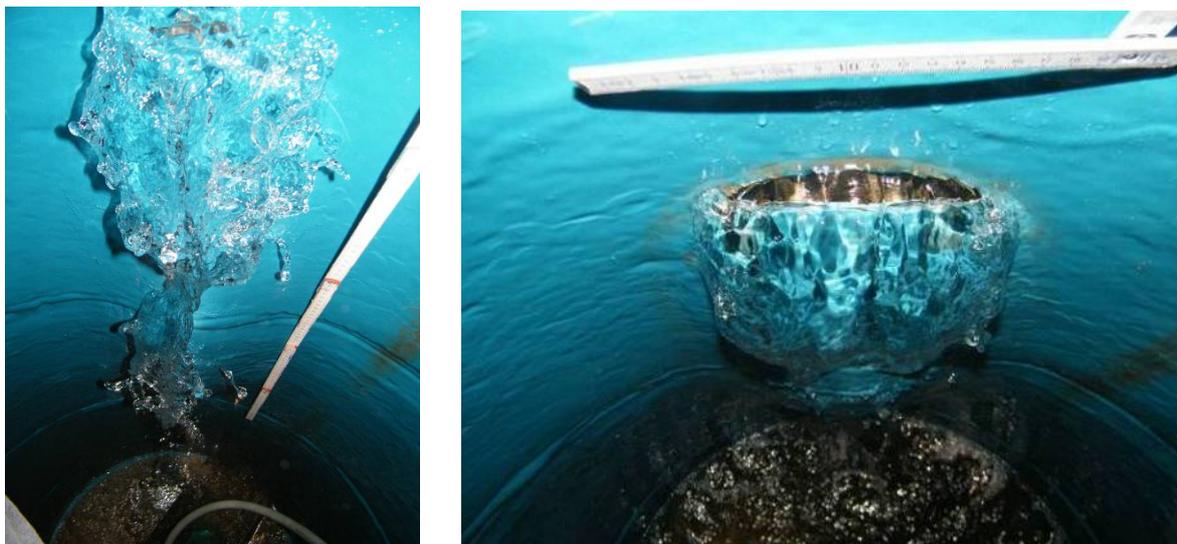


Bild 104 Wassereindrang durch einen Riss in der Beschichtung im oberen Bereich einer vertikalen Blase, die sich ausgehend von einer planmäßigen Verbundschwächung durch Trennmittel (FU 2) gebildet hat (links); Detailansicht des Risses (rechts)

Der Schacht wurde in der Woche darauf abgesperrt und geflutet, um in den übrigen Versuchsschächten auch weiterhin eine geordnete Wasserhaltung sicherzustellen. Eine weitere Beobachtung entfiel.

Haftzugprüfungen

Die Haftzugprüfungen wurden an Stellen durchgeführt, die bei einem Abklopfen der Beschichtung auf eine Verbundwirkung schließen ließen. Stellen mit planmäßiger Verbundschwächung durch Trennmittel wurden grundsätzlich nicht auf Haftzugfestigkeit geprüft. An 16 Prüfstellen wurde die Haftzugfestigkeit messtechnisch bestimmt. Die wesentlichen Ergebnisse der Haftzugprüfungen sind in Tabelle 33 enthalten. Bei 14 Prüfungen trat ein Bruch in der Klebefuge auf. Hier stellt der gemessene Wert lediglich eine untere Grenze der tatsächlichen Verbundfestigkeit von Beschichtung und Untergrund dar. In zwei Fällen trat der Bruch im Betonuntergrund auf (vgl. Bild 105).

Tabelle 34 Haftzugfestigkeiten der Beschichtung

Stichprobenumfang	Haftzugfestigkeit in N/mm ²		
	Mittelwert	kleinster Einzelwert	größter Einzelwert
Gesamtanzahl = 16	> 3,14	> 2,25	> 3,61
präparierter Untergrund = 8	> 3,23	> 2,49	> 3,61
unpräparierter Untergrund = 8	> 3,05	> 2,25	> 3,54



Bild 105: Bruchstelle, exemplarisch für ein vollständiges Versagen im Betonuntergrund

Beschichtungsdicke

Die Beschichtungsdicke betrug im Mittel 6,3 mm bei einer Bandbreite der einzelnen Messwerte von 4,8 mm bis 8,1 mm. Dabei variierte die Beschichtungsdicke über die gesamte Schachthöhe.

Fazit

In ungeschädigten Bereichen und an lokalen Schädigungen (LS) des Schachtes ließ das Beschichtungsmaterial - bis auf einzelne Pinholes - keine Auffälligkeiten erkennen und dichtete sicher ab. Allerdings kam es an einer Steigbügleinbindung zu Tropfenbildungen mit geringfügiger Infiltration.

Deutliche Undichtigkeiten mit z.T. erheblichem Wassereindrang fanden sich an der (planmäßig nicht reprofilierten) obersten Schachtringfuge 7 (SF 7p) und an einer tief liegenden Schadstelle mit planmäßiger Verbundschwächung durch Trennmittel („Flächige Undichtigkeit“, FU 2). Ausgehend von dieser Fehlstelle mit Verbundschwächung schälte sich die Beschichtung nach ca. 8 Wochen mit einem Mal ab. Der entstandene Blasenkanal von ca. 15 cm Breite und ca. 80 cm Höhe riss unvermittelt auf mit in der Folge erheblichem Wassereindrang.

6.2.3.5 Polyfill

Ein präparierter Schacht, wie in Abschnitt 6.1 dargestellt, wurde mit Polyfill beschichtet. Bei dem Beschichtungsmaterial handelte es sich um ein 3-komponentiges Polymer-Silikatharz (vgl. Abschnitt 4.3.3.2), das mittels Anspritzverfahren von Hand auf

die Schachtwand aufgetragen wurde. Mitarbeiter des Materialherstellers begleiteten die Sanierungsarbeiten.

Untergrundvorbereitung

Wesentliche Verfahrensschritte:

1. Feststoffstrahlen (Körnung: 0,2 - 1,4 mm) der gesamten Schachtwand mit ca. 120 bar (vgl. Bild 106, links), Dauer ca. 45 Minuten;
2. Kontrolle der Wandungsoberfläche und erneutes Feststoffstrahlen der mit Pflanzenfett präparierten Seite im Schacht, Dauer ca. 10 Minuten;
3. Druckwasserstrahlen (ca. 120 bar) mittels Handlanze mit Kaltwasser zur abschließenden Reinigung der Schachtwand, Dauer ca. 30 Minuten.



Bild 106 Untergrundvorbereitung mittels Feststoffstrahlen im Bereich des Schachtkonus (links), Ergebnis der Untergrundvorbereitung (rechts)

Ergebnis der Untergrundvorbereitung

Die Rauigkeit der vorbereiteten Betonoberfläche beträgt überwiegend ca. 2 bis 3 mm. Das oberflächennahe Korn(gerüst) wurde nahezu vollständig freigelegt (vgl. Bild 106, rechts). Nach erfolgter Inspektion erteilte der Mitarbeiter des Materialherstellers die Freigabe zur Beschichtung des Schachtes. Die Untergrundvorbereitung dauerte insgesamt etwa eine Stunde und dreißig Minuten.

Beschichtungsarbeiten

Unmittelbar vor Beginn der Beschichtungsarbeiten wies der Materialhersteller und Sanierer nachdrücklich darauf hin, dass das Beschichtungsmaterial aufgrund der üblicherweise dünnen Ausführungsdicke von unter 4 mm für eine Überbrückung der Schachtringfugen und größerer Fehlstellen – wie in der Versuchsplanung vorgesehen – nicht geeignet ist und nur nach vorheriger Reprofilierung von Ringfugen und ggf. auch größeren Löchern und Lunckern eingesetzt werden kann. In diesem Fall wurde daher eine Verfüllung der Ringfugen mit dem schnellabbindenden Stopfmörtel seal-tec xPress auf ca. 0,5 cm Tiefe bis zur Hinterfüllschnur aus Schaumstoff zugelassen.

Wesentliche Verfahrensschritte:

1. Reprofilierung der Schachtringfugen und Luncker (vgl. Bild 107, links);
2. Belüftung des Schachtes über Nacht mittels Gebläse;
3. Anmischen des 3-komponentigen Beschichtungsmaterials von Hand mittels Zweiwellen-Mischer;
4. Kontinuierliches Beschicken der Förderpumpe zur stillstandsfreien Beschichtung des Schachtes
5. Auftragen der Beschichtung im Bereich der Hohlstellen aus planmäßiger Verbundschwächung durch Trennmittel zunächst von Hand (vgl. Bild 107, rechts);
6. Anschließendes Auftragen der Beschichtung mittels handgeführter Spritzdüse von unten nach oben (vgl. Bild 108, links).



Bild 107 Reprofilierung der Ringfugen von Hand (links), händische Beschichtung der Bereiche von Hohlstellen aus planmäßiger Verbundschwächung durch Trennmittel (rechts)



Bild 108 Auftragen der Beschichtung mittels handgeführter Spritzdüse (links), Blick in den beschichteten Schacht (rechts)

Arbeitsaufwand und Materialverbrauch

Das Beschichten des Schachtes dauerte etwa 8 Stunden. Dabei wurden insgesamt ca. 34 kg Harz, 21 kg Härter und 55 kg der Pulverkomponente verarbeitet.

Inspektionsergebnisse GW 0

Vor der Flutung des Versuchsstandes waren alle Hohlstellen aus planmäßiger Verbundschwächung durch Trennmittel bei einem Abklopfen akustisch wahrnehmbar, jedoch in ihrer Ausdehnung z.T. deutlich geringer als erwartet. Im Rahmen dieser Untersuchungen zeigte sich ein unvollständiger Materialauftrag im Einbindebereich mehrerer Steigbügel (vgl. Bild 109, links). Darüber hinaus konnten im Bereich der zwei Hohlstellen aus planmäßiger Verbundschwächung durch Trennmittel in Schachtring 2 (FU 2, beidseitig) sowohl ein Abplatzen des Materials in einer Ausdehnung von ca. 1 x 1 cm, als auch ein Riss im Beschichtungsmaterial von ca. 5 cm Länge (vgl. Bild 109, rechts) festgestellt werden.



Bild 109 Polyfill-Beschichtung ohne Grundwassereinwirkung: Beispiel für einen unvollständigen Materialauftrag unterhalb einer Steigbügeleinbindung (links) und Riss in der Beschichtung im Bereich einer Hohlstelle aus planmäßiger Verbundschwächung durch Trennmittel FU 2 (rechts)

Inspektionsergebnisse GW I - Kurzzeit und GW II - Kurzzeit

Nach der Flutung des Versuchsstandes waren alle Hohlstellen aus planmäßiger Verbundschwächung durch Trennmittel bei einem Abklopfen akustisch wahrnehmbar, in ihrer Ausdehnung z.T. jedoch deutlich geringer als erwartet. Ein geringfügiger Wassereindring in Form von Feuchtefahnen war zunächst im Bereich der Hohlstelle aus planmäßiger Verbundschwächung durch Trennmittel in Schachtring 2 im vor der Reinigung unpräparierten Bereich (FU 2) zu erkennen. Nach dem Anheben des Wasserstandes auf GW II zeigten sich geringfügige Feuchtefahnen auch an der Schadstelle FU 4 im vor der Reinigung unpräparierten Bereich.

Inspektionsergebnisse GW II - Langzeit

Im Beobachtungszeitraum zeigten sich an den Hohlstellen aus planmäßiger Verbundschwächung durch Trennmittel in Schachtring 2 und 4 (FU 2 und FU 4, jeweils in den vor der Reinigung präparierten und nicht präparierten Bereichen) sowie den reprofilierten Schachtringfugen SF 1, SF 4 und SF 5 Undichtigkeiten in unterschiedlicher Intensität (vgl. Bild 110). In den Ringfugen waren dabei die stets die vor der Reinigung mit einem Pflanzefett präparierten Bereiche betroffen. Dabei traten die Undichtigkeiten zunächst im unteren Bereich des Schachtes auf, mit andauernder Versuchszeit jedoch auch in höher gelegenen Bereichen mit planmäßig eingebauten Vorschädigungen.



Bild 110 Polyfill-Beschichtung unter Grundwassereinwirkung GW II - Langzeit: Wassereindrang im Bereich einer Hohlstelle aus planmäßiger Verbundschwächung durch Trennmittel FU 2 (links), geringfügiger Wassereindrang im Bereich einer vorgeschädigten, reprofilierten Schachtringfuge SF 1 (rechts)

Im vor der Reinigung nicht präparierten Bereich einer Hohlstelle aus planmäßiger Verbundschwächung durch Trennmittel in Schachtring 2 (FU 2) konnte eine maximale Infiltrationsmenge von ca. 86 ml/s (entspricht ca. 7,4 m³/d) gemessen werden. Zum Ende der Versuche war hier kein Wassereindrang mehr feststellbar, da sich die Bohrlöcher dieser planmäßigen Fehlstelle mit Feinstanteilen aus dem Boden zugesetzt haben (vgl. Bild 111, links). Ein Bohrkern konnte aus dieser Fehlstelle gewonnen werden. Das Bild zeigt den Kern mit einer Bohrung sowie dem Bodenmaterial, dass das Bohrloch über eine Länge von etwa zwei Zentimeter als Pfropfen verschlossen hat.

Im Bereich der Hohlstelle aus planmäßiger Verbundschwächung durch Trennmittel in Schachtring 4 auf der vor Reinigung nicht präparierten Seite (FU 4) konnte zum Ende des Versuchs eine Infiltrationsmenge von ca. 91 ml/s (entspricht ca. 7,8 m³/d) gemessen werden. Der höchste Wassereindrang lag hier bei 120 ml/s (entspricht ca. 10,4 m³/d) und wurde etwa in der Mitte des Beobachtungszeitraums gemessen.

An einer Steigbügleinbindung konnte ein geringfügiger Wassereindrang in Form von Tropfen und Feuchtefahne festgestellt werden (vgl. Bild 111, rechts), der jedoch nicht abflusswirksam war.



Bild 111 Mit Feinstanteilen aus dem Boden zugesetztes Bohrloch einer Fehlstelle (links), geringfügiger Wassereindrang unterhalb einer Steigbügleinbindung mit weißen Fließspuren (rechts)

Haftzugprüfungen

Die Haftzugprüfungen wurden an Stellen durchgeführt, die bei einem Abklopfen der Beschichtung auf eine Verbundwirkung schließen ließen. Stellen mit planmäßiger Verbundschwächung durch Trennmittel wurden grundsätzlich nicht auf Haftzugfestigkeit geprüft. An 16 Prüfstellen wurde die Haftzugfestigkeit messtechnisch bestimmt. Die wesentlichen Ergebnisse der Haftzugprüfungen sind in Tabelle 35 enthalten. Bei nahezu allen Prüfungen trat ein Bruch in der Klebefuge auf. Hier stellt der gemessene Wert lediglich eine untere Grenze der tatsächlichen Verbundfestigkeit von Beschichtung und Untergrund dar. Vereinzelt lag der Bruch auch im Betonuntergrund (vgl. Bild 112).

Tabelle 35 Haftzugfestigkeiten der Beschichtung

Stichprobenumfang	Haftzugfestigkeit in N/mm ²		
	Mittelwert	kleinster Einzelwert	größter Einzelwert
Gesamtanzahl = 16	> 2,93	1,95	> 4,27
präparierter Untergrund = 8	> 2,87	> 2,06	> 3,88
unpräparierter Untergrund = 8	> 2,99	1,95	> 4,27



Bild 112: Bruchstelle exemplarisch für ein vollständiges Versagen im Betonuntergrund

Beschichtungsdicke

Die Beschichtungsdicke betrug im Mittel 3,5 mm bei einer Bandbreite der einzelnen Messwerte von 2,8 mm bis 4,4 mm. In der Tendenz war dabei eine Abnahme der Beschichtungsdicke von oben nach unten zu erkennen.

Fazit

In ungeschädigten Bereichen und an lokalen Schädigungen (LS) des Schachtes ließ das Beschichtungsmaterial keine Auffälligkeiten erkennen und dichtete sicher ab. Da das Beschichtungsmaterial gemäß Herstellerangaben bei der Überbrückung von Schachtringfugen und größeren Fehlstellen unbedingt einer vorherigen Reprofilierung bedarf, wurde hier eine geringfügige Verfüllung der Ringfugen auf ca. 0,5 cm Tiefe bis zur Hinterfüllschnur aus Schaumstoff zugelassen. In der Folge kann eine Abdichtungswirkung in diesen Bereichen nicht allein der Beschichtung zugeschrieben werden. Feuchtefahnen wurden an drei Schachtringfugen SF 1, 4 und 5 beobachtet.

In vier Bereichen mit planmäßiger Verbundschwächung durch Trennmittel (FU 2 und FU 4, jeweils beidseitig) löste sich das Beschichtungsmaterial weiter ab und Infiltrationen traten auf. Diese waren je nach Lage und anstehendem Außenwasserdruck unterschiedlich stark ausgeprägt und variierten in ihrer Intensität über die fünfmonatige Versuchszeit. Der nicht messbare Wassereindrang an einem Steigbügel war zudem nicht abflusswirksam.

6.2.3.6 Ultracoat

Ein präparierter Schacht, wie in Abschnitt 6.1 dargestellt, wurde mit Ultracoat beschichtet. Bei dem Beschichtungsmaterial handelte es sich um ein Epoxidharz (vgl. Abschnitt 4.3.3.2), das mittels handgeführter Düse auf die Schachtwand aufgesprüht wurde. Mitarbeiter des Verfahrensanbieters begleitete die Sanierungsarbeiten.

Untergrundvorbereitung

Wesentliche Verfahrensschritte:

1. Entfernen des Fettes von Hand mit Stofftüchern und Spachteln, Dauer ca. 75 Minuten;

2. Einbürsten eines Fettlösers von Hand, Dauer einschließlich Einwirkzeit ca. 35 Minuten;
3. Druckwasserstrahlen von Hand, jedoch ohne Düse (ca. 140 bar, Heißwasser mit $T \approx 95^\circ \text{C}$), Dauer ca. 45 Minuten (vgl. Bild 113, links);
4. Haptische Kontrolle der Oberfläche auf Fettrückstände, Dauer ca. 20 Minuten;
5. Einsprühen der Schachtwand mit ca. 10 %-iger Salzsäure, Verbrauch etwa 5 Liter, Dauer ca. 25 Minuten;
6. Druckwasserstrahlen mittels handgeführter Lanze (ca. 250 bar und 15 l/min, Kaltwasser, Rotationsdüse), Dauer ca. 15 Minuten;
7. Nach Inspektion der Schachtwand erneutes Auftragen eines Fettlösers auf der mit Fett präparierten Seite des Schachtes, Dauer einschließlich Einwirkzeit ca. 65 Minuten;
8. Erneutes Druckwasserstrahlen mittels Handlanze (ca. 250 bar und 15 l/min, Kaltwasser, Rotationsdüse), Dauer ca. 30 Minuten;
9. Trocknen der Schachtwand und der Ringfugen mit Gebläse und Druckluftpistole, Dauer ca. 65 Minuten;
10. Anrauen des Schachtunterteils mit Hilfe eines Hammers (Kratzhammer), Dauer ca. 20 Minuten.



Bild 113 Abspülen der Schachtwand ohne Reinigungsdüse (links), Ergebnis der Untergrund-vorbereitung (rechts)

Ergebnis der Untergrundvorbereitung

Die Rauigkeit der vorbereiteten Betonoberfläche betrug überwiegend ca. 1 mm (vgl. Bild 113, rechts). Das oberflächennahe Korn(gerüst) ist weitgehend nicht freigelegt worden. Im Schachtunterteil befanden sich bedingt durch die Bearbeitung mit einem Hammer Kerben von bis zu 3 mm Tiefe im Beton. Nach erfolgter Inspektion erteilte der Vorarbeiter der Sanierungsfirma die Freigabe zur Beschichtung des Schachtes. Die Untergrundvorbereitung dauerte insgesamt etwa sieben Stunden.

Beschichtungsarbeiten

Wesentliche Verfahrensschritte:

1. Aufsprühen der Beschichtung im Bereich der Schachtringfugen, Steigbügel und der weiteren, planmäßig eingebauten Schadstellen (vgl. Bild 114, links);
2. Belüften des Schachtes mittels Gebläse;
3. Kontrolle der bereits beschichteten Bereiche durch die Sanierungsfirma;
4. Flächiges Aufsprühen der Beschichtung auf die Schachtwand mittels handgeführter Düse (vgl. Bild 114, rechts);
5. Erneute Inspektion der gesamten Beschichtung;
6. Öffnen und Entfernen kleinerer Blasen in der Beschichtungsoberfläche (vgl. Bild 115, links);
7. Nachbearbeiten einzelner Fehlstellenbereiche mit einer Handpaste des Beschichtungsmaterials sowie Nachsprühen einzelner Bereiche.



Bild 114 Beschichten der Ringfugen (links) und des Konus (rechts)



Bild 115 Kontrolle der Beschichtung und Nachbearbeiten einzelner Fehlstellen (links), Blick in den beschichteten Schacht (rechts)

Arbeitsaufwand und Materialverbrauch

Das Beschichten des Schachtes dauerte etwa sechs Stunden und dreißig Minuten. Dabei wurden insgesamt ca. 93 Liter Harz und Härter verarbeitet.

Inspektionsergebnisse GW 0

Vor der Flutung des Versuchsstandes war keine der Hohlstellen aus planmäßiger Verbundschwächung durch Trennmittel bei einem Abklopfen akustisch wahrnehmbar. Vereinzelt befanden sich Pinholes im Beschichtungsmaterial. Die Beschichtungsoberfläche ist überwiegend glatt, z.T. in den Ringfugen aber auch von unebener Struktur (vgl. Bild 116).



Bild 116 Ultracoat-Beschichtung ohne Grundwassereinwirkung: Beispiel für ein Pinhole in der Beschichtung (links), Beispiel für einen geringfügig stärker strukturierten Bereich der Beschichtung (rechts)

Inspektionsergebnisse GW I - Kurzzeit

Nach der Flutung des Versuchsstandes waren bei einer Untersuchung zwei Hohlstellen (Schadstellen: FU 6p und FU 6) aus planmäßiger Verbundschwächung durch Trennmittel bei einem Abklopfen akustisch wahrnehmbar, jedoch in deutlich geringerer Ausdehnung (ca. 3 x 3 cm) als erwartet. Beide Hohlstellen lagen oberhalb des Grundwasserstandes.

Bereits mit ansteigendem Grundwasser zeigten sich zwei Undichtigkeiten in der Beschichtung in Bereichen mit planmäßig eingebauten Fehlstellen auf der vor Reinigung unpräparierten Seite des Schachtes. In einem Fall war dies die Schadstelle LS SU, in dem zweiten Fall SF 1 (vgl. Bild 117). Zu Beginn wurde in der Summe ein Wassereindrang von ca. 2 ml/s (entspricht etwa 0,17 m³/d) gemessen.

Inspektionsergebnisse GW II - Kurzzeit und GW II - Langzeit

Bei allen Untersuchungen mit anstehendem Grundwasser konnten keine Hohlstellen aus planmäßiger Verbundschwächung durch Trennmittel mehr bei einem Abklopfen akustisch wahrgenommen werden.

Die Infiltration durch die bereits o.g. Fehlstellen schwankte über die Versuchslaufzeit, nach etwa zwei Wochen mit anstehendem Außenwasserdruck GW II erhöhte sich die infiltrierende Menge in der Summe von etwa 4 ml/s (entspricht etwa 0,35 m³/d) auf ca. 6 ml/s (entspricht etwa 0,5 m³/d). Zum Versuchsende hingegen wurde nur noch ein Wassereindrang von 0,2 ml/s (entspricht etwa 17 l/d) gemessen. Auch hier ist es sehr wahrscheinlich, dass sich die Bohrlöcher der planmäßig eingebauten Schadstellen mit Feinstanteilen aus dem Boden zugesetzt haben (vgl. Abschnitt 6.2.3.5).

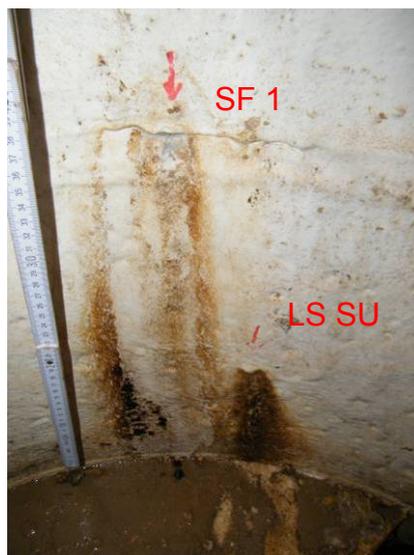
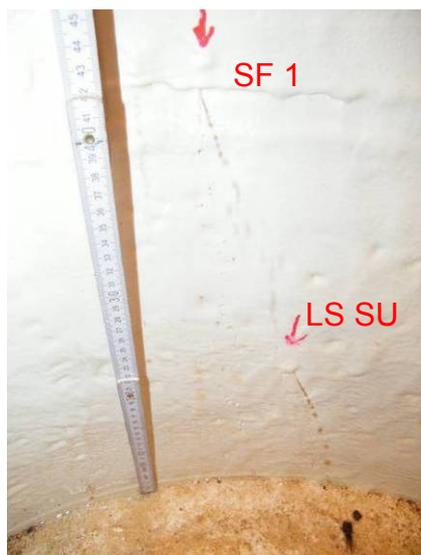


Bild 117 *Ultracoat-Beschichtung unter Grundwassereinwirkung: Wassereindringung durch zwei Fehlstellen in der Beschichtung an den Schadstellen LS SU und SF 1 zu Beginn der Flutung des Versuchsstandes (links) und zum Ende (rechts)*

Darüber hinaus zeigte sich an einem Steigbügel in Schachtring 5 nach etwa acht Wochen mit anstehendem Außenwasserdruck ein geringfügiger, nicht messtechnisch erfassbarer Wassereindringung in Form von braunen Schmutzwasserfließspuren und einzelnen Wassertropfen (vgl. Bild 118).



Bild 118 *Ultracoat-Beschichtung unter Grundwassereinwirkung: Wassertropfen an einer Steigbügeleinbindung (links) und bräunliche Fließspuren unterhalb dieser zum Ende der Beobachtungszeit (rechts)*

Haftzugprüfungen

Die Haftzugprüfungen wurden an Stellen durchgeführt, die bei einem Abklopfen der Beschichtung auf eine Verbundwirkung schließen ließen. Stellen mit planmäßiger Verbundschwächung durch Trennmittel wurden grundsätzlich nicht auf Haftzugfestigkeit geprüft. An 16 Prüfstellen wurde die Haftzugfestigkeit messtechnisch bestimmt. Die wesentlichen Ergebnisse der Haftzugprüfungen sind in Tabelle 36 enthalten. Bei etwa der Hälfte der Prüfungen trat ein Bruch in der Klebefuge auf. Hier stellt der gemessene Wert lediglich eine untere Grenze der tatsächlichen Verbundfestigkeit von

Beschichtung und Untergrund dar. Die übrigen Prüfstellen versagten entweder vollständig im Betonuntergrund oder im Beschichtungsmaterial (vgl. Bild 119).

Tabelle 36 Haftzugfestigkeiten der Beschichtung

Stichprobenumfang	Haftzugfestigkeit in N/mm ²		
	Mittelwert	kleinster Einzelwert	größter Einzelwert
Gesamtanzahl = 16	> 3,68	> 2,48	4,50
präparierter Untergrund = 8	> 3,61	> 2,64	4,07
unpräparierter Untergrund = 8	> 3,76	> 2,48	4,50



Bild 119 Bruchstellen, exemplarisch für ein vollständiges Versagen in der Beschichtung (links) und im Betonuntergrund (rechts)

Beschichtungsdicke

Die Beschichtungsdicke betrug im Mittel 6,1 mm bei einer Bandbreite der einzelnen Messwerte von 4,0 mm bis 9,0 mm. Dabei variierte die Beschichtungsdicke über die gesamte Schachthöhe.

Fazit

In ungeschädigten Bereichen und an den Schadstellen „Flächige Undichtigkeit“ (FU) des Schachtes ließ das Beschichtungsmaterial - bis auf einzelne Pinholes - keine Auffälligkeiten erkennen und dichtete sicher ab.

Zwei festgestellte Undichtigkeiten mit messbarem Wassereindrang befanden sich ausschließlich an der planmäßig eingebauten, lokalen Schadstelle im Schachtunterteil (LS SU) und der untersten Schachtringfuge (SF 1, planmäßig nicht reprofiliert) im vor der Reinigung unpräparierten Bereich. Der Wassereindrang variierte hier geringfügig über die fünfmonatige Versuchszeit. An allen weiteren planmäßig eingebauten Schadstellen LS und SF war kein Wassereindrang vorhanden, die Beschichtung dichtete auch hier sicher ab. Der nicht messbare Wassereindrang an dem Steigbügel war zudem nicht abflusswirksam.

6.3 Abdichtungsmaßnahmen

6.3.1 Versuchsprogramm

An sieben Schächten im Großversuchsstand wurden unter Grundwasserzufluss allein Abdichtungsmaßnahmen ausgeführt. Ziel war es, sämtliche Undichtigkeiten im Schachtkörper bei maximalem Wasserstand (GW II, vgl. Abschnitt 6.1) an einem Termin zuverlässig abzudichten. Nacharbeiten wurden nur unmittelbar im Zusammenhang mit den eigentlichen Abdichtungsarbeiten zugelassen, um insbesondere die Situation einer vorbereitenden Abdichtung bei Beschichtungsmaßnahmen nachzuempfinden. Dort sind Nacharbeiten an der Abdichtung aufgrund der überdeckenden Beschichtung ebenfalls ausgeschlossen.

Am Markt werden zahlreiche Produkte zur Abdichtung von Abwasserbauwerken angeboten, die unterschiedlichen Materialgruppen zugeordnet werden können. Die in Tabelle 37 aufgeführten Materialien wurden in den Versuchen zur **Abdichtung des Schachtkörpers** ausgewählt, um einen möglichst breiten Überblick über das verfügbare Leistungsspektrum zu erhalten.

Tabelle 37 Abdichtung Schachtkörper – verwendete Materialien

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

Für die **Abdichtung der Rohreinbindungen** wurden die in Tabelle 38 aufgeführten Materialien eingesetzt. Um auch hier verschiedene Druckhöhen-Varianten während

der Sanierung zu berücksichtigen, erfolgte die Abdichtung bei zwei unterschiedlichen Grundwasserständen. Zunächst wurden die Rohreinbindungen DN 150 und DN 300 bei der Grundwasserstufe I (GW I) abgedichtet. Weitere Rohreinbindungen in den o. g. Nennweiten wurden nach dem Anheben auf Grundwasserstand GW II abgedichtet. Die in beiden Grundwasserstufen ausgeführten Abdichtungen wurden anschließend über die gesamte Versuchsdauer (GW II – Kurzzeit und GW II - Langzeit) weiter beobachtet.

Tabelle 38 Abdichtung Rohreinbindungen – verwendete Materialien

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

6.3.2 Abdichtungssysteme für den Schachtkörper

6.3.2.1 IPA Unimörtel Rapid, IPANEX Stopfmörtel, IPANEX Flächendicht WF

Zur Abdichtung des Schachtes 19 bei Grundwasserstand II wurden schnellabbindende Reparatur-, Stopf- und Flächenmörtel eingesetzt (vgl. Abschnitt 4.4.2.1). Dabei handelte es sich um Produkte des Herstellers IPA Bauchemische Produkte GmbH, Egling (IPA Unimörtel Rapid, IPANEX Stopfmörtel, IPANEX Flächendicht WF). Der Abdichtungserfolg wurde am Folgetag kontrolliert. Bei Undichtigkeiten an den Reparaturstellen erfolgte sodann die Abdichtung mittels Injektion eines 2-komponentigen Polyurethanharzes (Spesan WS, vgl. Abschnitt 6.3.2.5). In dem Schachtbauwerk befanden sich auch unplanmäßige Undichtigkeiten, die ebenfalls abgedichtet wurden (vertikaler Riss in Schachtring 2 und undichte Schachtringfuge SF 6).

Wesentliche Verfahrensschritte:

1. Verschließen von Schadstellen mit starkem Wassereindrang mittels Stopfmörtel (vgl. Bild 124, rechts) und ggf. auch mit Holzdübeln;
2. Verfüllen der Schachtringfugen mit Reparaturmörtel (vgl. Bild 124, links);
3. Trocknen des Schachtes zur Kontrolle der einzelnen Abdichtungen auf nachdrückende Feuchtigkeit;
4. Bei nachdrückendem Wasser im Bereich der Schadstellen großflächiges Verreiben des Flächenabdichtungsmörtels auf der Schachtwand;
5. Nochmalige Kontrolle des Abdichtungserfolgs;

6. Befeuchten der Schachtwand mit Wasser zur Förderung der Nachreaktion von noch nicht ausreagiertem Material auf der Wandungsoberfläche;
7. Erneute Kontrolle der Mörtelabdichtungen am Folgetag.
8. Bei Wassereindrang an den Reparaturstellen erfolgte eine nachträgliche Abdichtung mittels Injektion eines Polyurethanharzes, vgl. Abschnitt 6.3.2.5).



Bild 120 Mörtelabdichtung: Eindrücken des Reparaturmörtels von Hand in die Schachtringfuge (links); Eindrücken von Stopfmörtel in die Schadstelle (rechts)

Arbeitsaufwand und Materialverbrauch

Das Abdichten der Schadstellen dauerte etwa sechs Stunden. Dabei wurden insgesamt ca. 40 kg des Reparaturmörtels und jeweils etwa 15 kg des Stopf- und Flächenmörtels verarbeitet.

Ergebnisse der Nachkontrolle am Folgetag der Abdichtung

Deutlich erkennbar war der Wassereindrang (vgl. Bild 121, links) durch die Schachtringfuge SF 4. Auch an den Schachtringfugen SF 1 und SF 2 sowie an den Schadstellen FU 2 und FU 4 zeigte sich Feuchtigkeit (vgl. Bild 121, rechts). Eine Feuchtefahne befand sich zudem an der lokalen Schadstelle LS 5 und darüber an einer Stelle in der Schachtringfuge SF 6.



Bild 121 Abdichtungsergebnis: Feuchteindrang in den Schacht (links); Detailaufnahme der tiefer liegenden Undichtigkeiten (rechts)

An den o.g. Stellen wurde eine Nachabdichtung mittels Polyurethanharzinjektion durchgeführt (vgl. Abschnitt 6.3.2.5). Im Verlauf der Injektionsarbeiten konnten geringe Feuchtfahnen auch in der Schachtringfuge SF 7 festgestellt werden, sodass auch in diese Polyurethanharz injiziert wurde.

Inspektionsergebnisse GW II - Kurzzeit

In die Schachtringfugen 1, 3 und 5 sowie in Bereiche der lokalen Schädigung (LS) wurde nach der Abdichtung mit Mörteln kein Polyurethanharz injiziert, da sie zunächst dicht waren. Auch die Fehlstelle FU 6 bedurfte daher keiner Nacharbeiten. (Im Rahmen des Versuchsausbaus zeigte eine spätere Kontrolle der Injektionskörper auf der Außenseite des Schachtes, dass kein Injektionsmaterial diese Fehlstellen unbeabsichtigt bedeckte, vgl. Abschnitt 6.3.2.5.)

Im Beobachtungszeitraum jedoch bildeten sich Feuchtfahnen mit geringer Ausdehnung an den Schadstellen FU 2 und FU 4 sowie SF 1 aus. Die lokalen Schädigungen hingegen waren in dem unteren Bereich des Schachtes und an der obersten Schadstelle in Schachtring 7 (LS 7) dicht, jedoch zeigte sich eine Feuchtfahne an der Schadstelle LS 5 (vgl. Bild 122).



Bild 122 Abdichtungsergebnis mit Mörteln: Feuchtfahnen an den höher liegenden Reparaturstellen des Schachtes in SF 5 (links) und LS 5 (rechts)

Inspektionsergebnisse GW II - Langzeit

Im Ergebnis zeigten sich keine wesentlichen Zustandsveränderungen an den abgedichteten Schadstellen im Vergleich zu den Ergebnissen GW II - Kurzzeit. Vereinzelt waren Feuchtfahnen mit geringer Ausdehnung und weiße Ausblühungen auf dem Mörtel erkennbar, z.T. ist der Mörtel abgeplatzt.

Lediglich an den abgedichteten Schachtringfugen SF 3 und SF 5 waren nun auch Feuchtfahnen vorhanden, die im unteren Bereich des Schachtes jedoch erkennbar größer waren als im oberen Bereich (vgl. Bild 123).



Bild 123 Abdichtungsergebnis mit Mörteln: Feuchtfahnen in den unteren Bereichen des Schachtes an SF 3 (links) und LS 3 (rechts)

Fazit

Die Abdichtung der lokalen Schadstellen (LS) war im Vergleich zur Abdichtung der anderen Schadstellen erfolgreicher. 4 von 5 Reparaturstellen waren nach Abschluss der Arbeiten dicht, zum Ende des Beobachtungszeitraums zeigten noch 3 Abdichtungen keinen Feuchteindrang. Feuchtfahnen waren hingegen an den Schadstellen LS 5 und schließlich auch LS 3 zu sehen. Auch die Schadstelle FU 6 konnte über den gesamten Beobachtungszeitraum erfolgreich abgedichtet werden.

Die Abdichtung der Schachtringfugen war zwar zunächst erfolgreich, im Verlauf der Langzeit-Betrachtungen zeigten sich jedoch an sämtlichen Fugen Feuchtfahnen. Keine dieser geringfügigen Infiltrationen war jedoch abflusswirksam.

6.3.2.2 AUTO SIL RAPID und AUTO SIL WATER

Der Mitarbeiter der Sanierungsfirma dichtete die planmäßig eingebauten Fehlstellen bzw. Undichtigkeiten lokal mit AUTO SIL - Produkten ab (Materialhersteller und -verarbeiter: ASAG Umwelttechnik, Neukirchen-Vluyn). Ein starker Wassereintrich wurde zunächst mittels Blitzzement AUTO SIL RAPID gestoppt (vgl. Abschnitt 4.4.2.1). Auf diese Reparaturstellen strich er anschließend eine Dichtschlämme auf Silikatbasis (AUTO SIL WATER) auf und versiegelte sie mit einem Oberflächenschutz AUTO SIL VER. Bei einer flächigen Verarbeitung der Dichtschlämme grundierte er die Flächen zuvor mit AUTO SIL QP.

Wesentliche Verfahrensschritte:

1. Verschließen von Schadstellen mit starkem Wassereindrang mittels Blitzzement (vgl. Bild 124, links) und ggf. auch mit Holzdübeln;
2. Auftragen der Grundierung auf flächig abzudichtende Bereiche;
3. Anmischen und Auftragen der Dichtschlämme auf flächige Bereiche der Wandung, Hereindrücken der in steiferer Konsistenz hergestellten Schlämme in die abzudichtenden Bereiche der Ringfugen (vgl. Bild 124, rechts);
4. Aufstreichen des Oberflächenschutzes zur Versiegelung der abgedichteten Bereiche.



Bild 124 Lokale Abdichtung bei starkem Wassereindrang mittels „Trockenmörtel-Injektion“ (links); abgedichtete Fehlstellenbereiche (rechts)

Arbeitsaufwand und Materialverbrauch

Das Abdichten der Schadstellen dauerte etwa sechs Stunden und dreißig Minuten. Dabei wurden insgesamt ca. 7,5 kg des Schnellabdichtungsmörtels, 8 kg der Dichtschlämme und jeweils etwa ein Liter der Grundierung und des Oberflächenschutzes verarbeitet.

Inspektionsergebnisse GW II - Kurzzeit

Es waren keine Auffälligkeiten oder Undichtigkeiten an den sanierten Fehlstellen erkennbar.

Inspektionsergebnisse GW II - Langzeit

Innerhalb der ersten fünf Wochen zeigten sich weiter keine Auffälligkeiten an den Reparaturstellen.

Danach war an den unteren beiden Ringfugen des Schachtes SF 1 und 2 an den abgedichteten Schadstellen ein deutlicher Feuchte- und Schmutzeintrag (vgl. Bild 125, links) bis in das Gerinne vorhanden. Dieser Wassereindrang war jedoch so gering, dass sich keine Tropfen an der Schachtwand bildeten. Daher war er nicht messbar und offensichtlich auch nicht abflusswirksam.



Bild 125 Schmutzwasserfließspuren im Bereich der Reparaturstelle SF 1 (links), abgedichtete Fehlstelle LS SU mit blau-weißer Verfärbung (rechts)

Vereinzelt zeigten sich blau-weiße Verfärbungen an den abgedichteten Reparaturstellen (vgl. Bild 125, rechts). Ein Feuchteeintrag konnte hier nicht festgestellt werden. Im Gegensatz dazu zeigte sich zum Ende des Beobachtungszeitraums an zwei abgedichteten Ringfugen SF 5 und SF 7 jeweils am Rand der Reparaturstellen eindringende Feuchtigkeit in Form von Feuchtefahnen (vgl. Bild 126, links) unterschiedlicher Ausdehnung. Ein Blick in die Ringfugen (vgl. Bild 126, rechts) ließ erkennen, dass die Ursache für den Wassereindrang in Hinterläufigkeiten an den Reparaturstellen begründet war. Das Abdichtungsmaterial ist in den Spalt der Ringfuge so tief wie möglich (zurückliegende Schachtwand) eingebracht bzw. eingedrückt worden. Jedoch drang die Feuchtigkeit zwischen der zurückliegenden Schachtwand und dem eingebauten Abdichtungsmaterial in die neben der Reparaturstelle offene Ringfuge in den Schacht hinein.



Bild 126 Partielle Abdichtung einer Schachtringfuge: Beispiel für einen geringen Feuchteeintrag an einer Schadstelle bedingt durch Hinterläufigkeit (links), Feuchteindrang neben einer Reparaturstelle (rechts)

Fazit

Etwa sechs Wochen nach der Reparatur zeigten sich Feuchtefahnen an den partiell abgedichteten untersten Schachtringfugen SF 1 und SF 2, die bis in das Gerinne hinein reichten. Dieser Wassereindrang war jedoch so gering, dass sich keine Tropfen an der Schachtwand bildeten. Daher war er nicht mehr messbar und offensichtlich auch nicht abflusswirksam. An höher liegenden Reparaturstellen zeigten sich zum Ende des Beobachtungszeitraums z.T. ebenfalls lokal begrenzte Feuchtefahnen, die im Wesentlichen aufgrund von Hinterläufigkeiten (s.o.) an den partiellen Reparaturstellen auftraten.

6.3.2.3 Xypex Patch´n Plug und Xypex Concentrate

Bei beiden Produkten handelt es sich um kristallbildnerhaltige Mörtel. Zunächst wurde der Trockenmörtel Xypex Patch´n Plug, der einem Blitzmörtel vergleichbar ist (vgl. Abschnitt 4.4.2.1), entsprechend den Vorgaben des Herstellers (Bawax GmbH, Celle) mit Wasser angemischt. Mit diesem Mörtel wurden dann im Versuch die Wassereinbrüche gestoppt und die Schachtringfugen verschlossen. Der Trockenmörtel Xypex Concentrate wurde anschließend in schlämmfähiger Konsistenz hergestellt und flächig auf die gesamte Schachtwand aufgequastet. Er enthält den Kristallbildner in hoher Konzentration. Abschließend wurde auf diese Schlämme der Oberflächenschutz Gamma Cure aufgesprüht, der ebenfalls Kristallbildner enthält.

Der in diesem Fall abzudichtende Schacht entsprach in seinem Aufbau den zu beschichtenden Schächten, d.h. die Fehlstellen waren beidseitig vorhanden, allerdings ohne Präparierung mit einem Pflanzenfett. Darüber hinaus befanden sich weitere unplanmäßige Undichtigkeiten in dem Schacht, insbesondere in einzelnen Schachtringfugen sowie im untersten Schachtring. Dieser war im Bereich oberhalb des Zulaufs DN 300 gerissen.

Wesentliche Verfahrensschritte:

1. Stoppen von starkem Wassereintritt mittels Patch´n Plug und ggf. auch durch Einschlagen von Holzdübeln in die Schadstellen;
2. Reprofilieren von Ringfugen und Ausbrüchen in der Schachtwandung (vgl. Bild 127, links);
3. Aufbringen des Kristallbildners bzw. Mörtels in schlämmfähiger Konsistenz auf die Schachtwand von oben nach unten (vgl. Bild 127, rechts);
4. Aufsprühen des Oberflächenschutzes auf die Schlämme.



Bild 127 Abdichtung mit einem kristallbildnerhaltigen Mörtel: Verfüllte Ringfugen in der Schachtwand (links); Aufquasten der Schlämme (rechts)

Arbeitsaufwand und Materialverbrauch

Das Abdichten des Schachtes dauerte etwa zwölf Stunden und dreißig Minuten. Dabei wurden ca. 50 kg des Trockenmörtels Patch´n Plug, 10 kg des Trockenmörtels Xypex Concentrate und 2 Liter des Oberflächenschutzes verarbeitet.

Inspektionsergebnisse GW II - Kurzzeit

Es konnten keine Undichtigkeiten festgestellt werden.

Inspektionsergebnisse GW II - Langzeit

Im gesamten Beobachtungszeitraum konnten nachfolgend aufgeführte Auffälligkeiten dokumentiert werden:

In allen Bereichen mit Schadstellen zeigten sich dunkle Verfärbungen der aufgetragenen Mörtelschlämme in unterschiedlicher Ausdehnung und Intensität, die über die Versuchsstandzeit in ihrer farblichen Ausprägung und Größe variierten (vgl. Bild 128). Messungen der Oberflächenfeuchtigkeit an hellen und dunklen Bereichen der Schachtwand zeigten jedoch keine Unterschiede.



Bild 128 Änderung der farblichen Ausprägung und Ausdehnung derselben Schadstelle innerhalb von ca. 13 Wochen: Anfangs größere Ausdehnung sowie dunklere Verfärbung der Schadstelle (links) und geringere Ausdehnung und farblich hellere Ausprägung nach 13 Wochen (rechts)

Die aufgetragene Mörtelschlämme erwies sich als minderfest und konnte bspw. mit einem Zollstock abgeschabt werden (vgl. Bild 129, links). Darüber hinaus sah die Oberfläche der Mörtelschlämme vergleichsweise uneinheitlich aus.



Bild 129 Minderfeste Mörtelschlämme kann mit einem Zollstock abgeschabt werden (links); bereichsweise dunkle Verfärbungen der Mörtelschlämme ohne erkennbare Undichtigkeiten (rechts)

Fazit

Trotz des vergleichsweise auffälligen optischen Erscheinungsbildes der mit einem Kristallbildner versehenen Mörtelschlämme (uneinheitliche Oberflächenstruktur) zeigten sich über die gesamte Versuchsdauer keine Undichtigkeiten. Auch an den Schadstellen mit dunklen Verfärbungen zeigten sich kein Wassereindrang und auch keine Feuchtigkeit an der Oberfläche. Der Sanierer bzw. Hersteller führt die Verfärbungen auf den Kristallisationsprozess zurück.

6.3.2.4 Carbo Stop U und Carbo Crack Seal H

Das Abdichten der eingebauten Schäden im Schacht erfolgte mittels Vor- und Nachinjektion von Polyurethanharzen (vgl. Abschnitt 4.4.2.3) bei Grundwasserstand II (vgl. Bild 37). Dabei wurde zunächst der 1-komponentige Polyurethanschaum Carbo Stop U verpresst und nach einer Aushärtezeit von ca. 20 Minuten erfolgte die Nachinjektion des 2-komponentigen Polyurethanharzes Carbo Crack Seal H (Hersteller beider Injektionsmaterialien: Minova Carbo Tech GmbH, Essen). Die Schachtringfugen sind zuvor mit dem Blitzzement Cerinol Fix (Hersteller: Deitermann Weber) verdämmt worden.

Wesentliche Verfahrensschritte:

1. Verdämmen der Schachtringfugen mittels Hinterfüllschnüren aus Schaumstoff und Blitzmörtel;
2. Bohren von Löchern zur Aufnahme der Packer in den Schadstellen;
3. Einschlagen der Packer in die Bohrlöcher;
4. Verpressen des Injektionsmaterials von unten nach oben im Schacht (vgl. Bild 130, links);

5. Entfernen der Packer (um den Abdichtungserfolg auch an den Packerbohrungen sehen zu können, wurden diese im Rahmen der Versuche nicht mit einem Mörtel verschlossen, vgl. Bild 130, rechts);
6. Entfernen von überschüssigem und in den Schacht eingedrungenem Injektionsmaterial.



Bild 130 Injektion von Polyurethan durch Konuspacker an der Schadstelle FU 4 (links); abgedichtete Fehlstelle LS 3 nach Abschluss der Injektionsarbeiten (rechts)

Arbeitsaufwand und Materialverbrauch

Das Abdichten des Schachtes dauerte etwa acht Stunden und dreißig Minuten. Dabei wurden insgesamt ca. 17 Liter des 1-komponentigen Polyurethanschaums und 3 Liter des 2-komponentigen Polyurethanharzes verarbeitet. Die Verdämmung der Ringfugen erforderte ca. 50 kg Mörtel.

Inspektionsergebnisse GW II - Kurzzeit

Nach den Injektionsarbeiten waren im Beobachtungszeitraum keine Undichtigkeiten an den sanierten Schadstellen zu erkennen.

Inspektionsergebnisse GW II - Langzeit

In den nachfolgenden Untersuchungen waren Feuchtefahnen in Bereichen von planmäßigen Fehlstellen sowohl in drei Schachtringfugen (SF 3, SF 5 und SF 7), als auch in den Schachtringen in der unteren Hälfte des Schachtes zu erkennen (vgl. Bild 131). In diesen Fällen handelte es sich um die flächigen Undichtigkeiten FU 2 und FU 4 sowie um die lokalen Schädigungen LS SU und LS 3.



Bild 131 Feuchtestellen an sanierten Schadstellen: Bereich einer Schachtringfuge SF 5 (links); geringfügiger Wassereindrang bei LS 3 (rechts)

Die Feuchtestellen variierten in ihrer Ausdehnung über die gesamte Versuchslaufzeit (vgl. Bild 132).



Bild 132 Schadstelle „flächige Undichtigkeit“ FU 2 während der Beobachtungszeit: größere Ausdehnung der Feuchtestelle etwa 16 Wochen nach Sanierung (links) und geringere Ausdehnung nach etwa 19 Wochen (rechts)

Zwei der Fehlstellen, z.B. LS 3 (vgl. Bild 131, rechts), an denen zunächst Feuchtestellen vorhanden waren, trockneten zum Ende des Beobachtungszeitraums nahezu vollständig ab. Die Untersuchung der Injektionskörper auf der Außenseite des Schachtes ließen keine Risse oder offensichtliche Poren erkennen. Auch waren die injizierten Schadstellen weiträumig mit Material umgeben (vgl. Bild 133), so dass etwaige Fließwege des Wassers durch den Injektionskörper und die Schadstellen (vgl. Bild 134, Schnitt durch den Injektionskörper) nicht nachvollziehbar waren. Denkbar ist, dass Sedimente des Bodens zusammen mit Materialresten in den Schadstellen bzw. Bohrungen über den Zeitraum einen Pfropfen gebildet haben, der diese Schadstellen verschlossen hat (vgl. Untersuchung einer zugesetzten Fehlstelle in Abschnitt 6.2.3.5, Bild 111).

Bilder der Injektionskörper

Nachfolgend sind exemplarisch einzelne Injektionskörper dargestellt (vgl. Bild 133).



Bild 133 Polyurethan-Injektionskörper einer abgedichteten Fehlstelle FU 6 (links) und LS 7 (rechts)



Bild 134 Schnitt durch Betonfertigteiltring mit Polyurethan-Injektionskörper einer abgedichteten Fehlstelle FU 6 (links), Seitenansicht von Schachtring und Injektionskörper mit Injektionsmittel in der Schadstelle (rechts)

Fazit

Im Beobachtungszeitraum von GW II - Kurzzeit wurden keine Undichtigkeiten an den Abdichtungen festgestellt.

Zu Beginn des Beobachtungszeitraums GW II - Langzeit zeigte sich hingegen an nahezu allen sanierten Fehlstellen in der unteren Hälfte des Schachtes ein Wassereindring in Form von Feuchtefahnen unterschiedlicher Intensität und Größe. Jedoch konnte die infiltrierende Wassermenge aus diesen Feuchtefahnen messtechnisch nicht erfasst werden. Darüber hinaus war der Feuchteeintrag nicht abflusswirksam und vereinzelt konnte sogar ein vollständiges Abtrocknen der Feuchtefahnen beobachtet werden.

6.3.2.5 Spesan WS

In Schacht 19 wurden einen Tag nach der Abdichtung mit Stopf-, Flächen- und Reparaturmörtel (vgl. Abschnitt 6.3.2.1) diejenigen Schadstellen, die weiterhin Feuchtigkeit aufwiesen, mit einem Polyurethanharz (vgl. Abschnitt 4.4.2.3) bei Grundwasserstand II abgedichtet. Dieses hatte eine Reaktionszeit von etwa 20 Sekunden. Bei dem Material der Spesan Handels-GmbH, Linz, Österreich, handelt es sich um das 2-komponentige Polyurethanharz Spesan WS (in Kombination mit der Härterkomponente Spesan B). Injiziert wurde an planmäßigen Fehlstellen „flächige Undichtigkeiten im Schachtring 2 und 4 sowie um undichte Schachtringfugen 2, 4, 6 und 7. Des Weiteren wurde ein unplanmäßiger Riss in Schachtring 2 mittels Injektion abgedichtet.

Wesentliche Verfahrensschritte:

1. Verdämmen der Schachtringfugen mit einem Reparaturmörtel (entfällt hier);
2. Bohren von Löchern zur Aufnahme der Packer (vgl. Bild 135, links);
3. Setzen der Injektionspacker;
4. Verpressen des Injektionsharzes (vgl. Bild 135, rechts);
5. Kontrolle der Dichtwirkung und ggf. erneute Injektion;
6. Entfernen der Packer.



Bild 135 Bohren eines Packerlochs (links), ausgetretenes und ausreagiertes Polyurethanharz aus der verdämmten Schachtringfuge SF 2 (rechts)

Arbeitsaufwand und Materialverbrauch

Die Abdichtungsarbeiten an den Schadstellen dauerten etwa neun Stunden. Dabei wurden insgesamt ca. 100 kg des Polyurethanharzes verarbeitet. Angaben zur Menge des eingebauten Mörtels finden sich im Abschnitt 6.3.2.1.

Inspektionsergebnisse GW II - Kurzzeit

Es konnten keine Undichtigkeiten festgestellt werden.

Inspektionsergebnisse GW II - Langzeit

Im gesamten Beobachtungszeitraum war ein geringfügiger Feuchteindrang in Form von Feuchtfahnen in begrenzten Bereichen aller Schachtringfugen (vgl. Bild 137) und den abgedichteten Schadstellen FU 2 und FU 4 zu erkennen (vgl. Bild 136).



Bild 136 Abgedichtete Fehlstellen FU 2 mit Feuchtfahnen und bräunlichen Anhaftungen von eindringendem Injektionsmaterial (links) und FU 4 mit geringfügigen Feuchtfahnen (rechts)

Vereinzelt konnten rötliche Verfärbungen auf dem Mörtel festgestellt werden (vgl. Bild 137, rechts).



Bild 137 Abgedichtete Schachtringfugen SF 6 und 7: Geringfügiger Feuchteindrang (links) und rötliche Verfärbung des Mörtels (rechts)

Bilder der Injektionskörper

Nachfolgend sind exemplarisch einzelne Injektionskörper dargestellt (Bild 138).



Bild 138 Polyurethan-Injektionskörper an der sanierten Schadstelle FU 6 in seiner Ausdehnung (links) und Mächtigkeit (rechts)

Fazit

Im Beobachtungszeitraum von GW II - Kurzzeit wurden keine Undichtigkeiten an den Abdichtungen festgestellt.

Zu Beginn des Beobachtungszeitraums GW II - Langzeit zeigten sich an allen sanierten Schadstellen „flächige Undichtigkeit“ und in Bereichen von Schachtringfugen stellenweise geringfügige Feuchtefahnen. Dieser Wassereindrang war jedoch so gering, dass sich keine Tropfen an der Schachtwand bildeten. Daher war er nicht messbar und offensichtlich auch nicht abflusswirksam.

6.3.2.6 Cft-Harz

Das Abdichten der eingebauten Schäden im Schacht erfolgte durch Injektion eines Polyurethanharzes (vgl. Abschnitt 4.4.2.3) bei Grundwasserstand II (vgl. Bild 37). Das hier verwendete cft-Polyurethanharz (Hersteller: Minova Carbo Tech GmbH, Essen) hatte eine Reaktionszeit von 15 Sekunden. Die Ringfugen wurden zuvor mit dem Quellschlamm CEM 22 TP verdämmt (MH22 Systeme, Gesellschaft für Verfahrenstechnik mbH, Waldfischbach-Burgalben).

Wesentliche Verfahrensschritte:

1. Prüfen der vorhandenen Betonfestigkeit mittels Schmidt-Hammer;
2. Verdämmen der Schachtringfugen mittels Quellschlamm von unten nach oben im Schacht;
3. Setzen von Injektionspackern (vgl. Bild 139, links);
4. Verpressen des Injektionsharzes von unten nach oben im Schacht (vgl. Bild 139, rechts);
5. Entfernen von Überschussmaterial, das während der Injektion in den Schachttinnenraum eingedrungen war;
6. Entfernen der Packer und Verschließen der Packerlöcher mit einem Quellschlamm (um den Abdichtungserfolg auch an den Packerbohrungen sehen zu können, wurden diese im Rahmen der Versuche nicht mit einem Mörtel exemplarisch an den Schadstellen FU 2, 4 und 6 sowie LS SU verschlossen);

7. Dokumentation der durchgeführten Arbeiten an den sanierten Schadstellen;
8. Abschlusskontrolle.



Bild 139 Injektion von Polyurethanharz: Wassereindrang im Umfeld des Packers an noch nicht abgedichteten Stellen innerhalb der Schadstelle FU 2 (links); abgedichtete Schadstelle FU 2 nach der Injektion (rechts)

Arbeitsaufwand und Materialverbrauch

Das Abdichten des Schachtes dauerte ca. elf Stunden. Darüber hinaus fielen jeweils etwa 45 Minuten für Dokumentationsarbeiten und Kontrolltätigkeiten an. Insgesamt wurden 308 kg des Polyurethanharzes injiziert. Das Verdämmen der Ringfugen und einzelner Packerlöcher erforderte etwa 55 kg Mörtel.

Inspektionsergebnisse GW II - Kurzzeit

Nach Abschluss der Injektionsarbeiten waren im Beobachtungszeitraum keine Undichtigkeiten an den sanierten Schadstellen zu erkennen.

Inspektionsergebnisse GW II - Langzeit

In den nachfolgenden Untersuchungen waren Feuchtefahnen an nahezu allen Schachtringfugen vorhanden. Die Feuchtigkeit drang durch Risse in der Verdämmung ein (vgl. Bild 140). Lediglich die unterste Schachtringfuge SF 1 zeigte keine Auffälligkeiten.



Bild 140 Beispiel für einen Feuchteintrang an der abgedichteten Schachtringfuge SF 5: Nach Trocknen des Bereichs wurde eindringendes Wasser aus einem Riss in der Verdämmung sichtbar (links); vollständig ausgebildete Feuchtefahne an dieser Stelle (rechts)

Darüber hinaus waren Feuchtefahnen an allen sanierten Schadstellen „flächige Undichtigkeit“ FU 2, 4 und 6 vorhanden. Diese variierten geringfügig in ihrer Ausdehnung über die gesamte Versuchslaufzeit. An einzelnen sanierten Schadstellen konnte auch der Eintrag von bräunlichem, minderfesten Material beobachtet werden (vgl. Bild 141).



Bild 141 Feuchtefahnen und Eintrag von bräunlichem, minderfesten Material an der sanierten Schadstelle FU 6 etwa sieben Wochen nach der Abdichtung (links) und nach etwa dreizehn Wochen (rechts)

Eine weitere geringfügige und nur temporär auftretende Undichtigkeit war an der Schadstelle LS SU zu erkennen (vgl. Bild 142). Auch in diesem Fall wurde auf den üblichen Verschluss des Packerlochs mit einem Mörtel verzichtet, um den Abdichtungserfolg des Polyurethanharzes erkennen zu können. Die einzelnen Wassertropfen gelangten hier nicht zum Abfluss.



Bild 142 Sanierte Schadstelle LS SU: Nachdrückendes Wasser nach Trocknen dieses Bereichs als Tropfen aus dem Packerloch erkennbar

Bilder der Injektionskörper

Nachfolgend ist die nahezu vollständig mit Injektionskörpern bedeckte obere Schachthälfte dargestellt (Bild 143).



Bild 143 Polyurethan-Injektionskörper an der Schachtaußenseite (links), Detailaufnahme (rechts)

Die optische Inspektion der Injektionskörper gab keine Hinweise auf mögliche Fließwege des eingedrungenen Wassers. Alle Schadstellen waren auf der Außenseite des Schachtes großflächig durch die Injektionskörper bedeckt.

Fazit

Im Beobachtungszeitraum von GW II - Kurzzeit wurden keine Undichtigkeiten an den Abdichtungen festgestellt.

Während des Beobachtungszeitraums GW II - Langzeit hingegen zeigte sich an allen sanierten Schadstellen FU ein Wassereindrang in Form von Feuchtefahnen unterschiedlicher Intensität und Größe. Die unterste Feuchtefahne erreichte auch die Berme, jedoch war die infiltrierende Wassermenge aus diesen Feuchtefahnen so gering, dass sich keine Tropfen an der Schachtwand bildeten. Daher war sie nicht messbar und offensichtlich auch nicht abflusswirksam.

Mit Ausnahme der untersten Schachtringfuge SF 1 wiesen alle weiteren Ringfugen Feuchtefahnen mit geringer Ausdehnung auf. An der nicht mit einem Mörtel verschlossenen Schadstelle LS SU konnte ebenfalls ein geringfügiger, nicht messbarer sowie abflusswirksamer Wassereindrang festgestellt werden, der zudem am Ende des Beobachtungszeitraums nicht mehr vorhanden war.

6.3.2.7 Carbo Cryl Wv

Das Abdichten der eingebauten Schäden im Schacht erfolgte durch Injektion eines Acrylatgels (vgl. Abschnitt 4.4.2.3) bei Grundwasserstand II (vgl. Bild 37). Die Reaktionszeit des hier verwendeten Carbo Cryl Wv-Gels (Hersteller: Minova Carbo Tech GmbH, Essen) stellten die Mitarbeiter der Sanierungsfirma auf etwa 11 Minuten ein. Zum Verpressen wurde eine 2-Komponenten-Pumpe mit einem Mischungsverhältnis von 1:1 eingesetzt. Die Schachtringfugen sind zuvor mit dem Blitzzement Cerinol Fix (Hersteller: Deitermann Weber) verdämmt worden.

Wesentliche Verfahrensschritte:

1. Verdämmen der Schachtringfugen mittels Hinterfüllschnüren aus Schaumstoff und Blitzmörtel (vgl. Bild 144, links);
2. Bohren von Löchern zur Aufnahme der Packer im Bereich der Schadstellen (vgl. Bild 144, rechts);
3. Einschlagen der Packer in die Bohrlöcher;
4. Verpressen des Injektionsmaterials, beginnend im Schachtunterteil;
5. Entfernen der Packer (um den Abdichtungserfolg auch an den Packerbohrungen sehen zu können, wurden diese im Rahmen der Versuche nicht mit einem Mörtel verschlossen).



Bild 144 Einlegen einer Hinterfüllschnur in die Schachtringfuge (links); Verpressen einer einzelnen Schadstelle (rechts)

Arbeitsaufwand und Materialverbrauch

Das Abdichten des Schachtes dauerte etwa sieben Stunden und dreißig Minuten. Dabei wurden insgesamt etwa 41 kg Acrylatgel zzgl. des gleichen Volumens Wasser und etwa 50 kg Mörtel verarbeitet.

Inspektionsergebnisse GW II - Kurzzeit

Nach den Injektionsarbeiten waren im Beobachtungszeitraum keine Undichtigkeiten an den sanierten Schadstellen zu erkennen.

Inspektionsergebnisse GW II - Langzeit

In den nachfolgenden Untersuchungen waren z. T. weiße Ausblühungen auf dem Mörtel der verdämmten Schachtringfugen sichtbar. Die oberen drei abgedichteten Ringfugen SF 5, 6 und 7 zeigten darüber hinaus Undichtigkeiten in Form von Feuchtefahnen (vgl. Bild 145, links).



Bild 145 Feuchtefahnen an den abgedichteten Schachtringfugen SF 5 und 6 (links); Feuchtefahnen im Bereich einer sanierten Schadstelle FU 2 (rechts)

Weitere Feuchtefahnen waren an zwei sanierten Fehlstellen FU 2 und 4 zu erkennen. Während des Beobachtungszeitraums veränderten sich diese Feuchtefahnen in

ihrer Ausdehnung. In der ersten Hälfte des Beobachtungszeitraums waren sie geringfügig größer als in der zweiten Hälfte, jedoch zu keiner Zeit abflusswirksam. Darüber hinaus konnte beobachtet werden, wie einhergehend mit der Verkleinerung dieser Feuchtefahnen das injizierte und ausreagierte Gel teilweise durch die Schadstellen (Bohrungen) in den Schachtinnenraum zapfenartig „hineinwanderte“ (vgl. Bild 146, links).

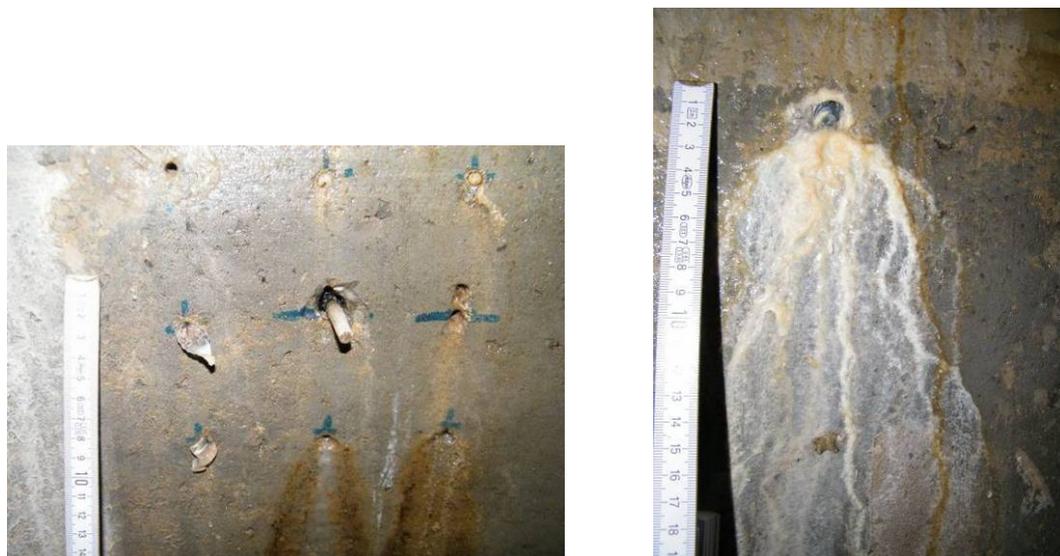


Bild 146 Acrylatgel-Abdichtung im unteren Bereich des Schachtes: Zapfenartig in den Schacht einragendes Abdichtungsmaterial von härterer Konsistenz (links); in den Schacht durch die Schadstelle eingedrungenes Abdichtungsmaterial von weicher Konsistenz (rechts)

Am Ende des Beobachtungszeitraums drang an insgesamt vier Packerbohrungen im unteren Bereich des Schachtes Verpressmaterial in den Schachtinnenraum, das sowohl von härterer (s.o.), als auch von weicher Konsistenz war (vgl. Bild 146, rechts).

Alle sanierten lokalen Fehlstellen LS waren bis zum Versuchsende dicht.

Bilder der Injektionskörper

Nachfolgend sind exemplarisch einzelne Injektionskörper dargestellt (vgl. Bild 147).



Bild 147 Acrylatgel-Injektionskörper, nur noch im linken Bereich als Teil des Ursprungskörpers anhaftend, Packerloch im unteren Bereich sichtbar (links); weiterer Injektionskörper, noch im unteren Bereich eingerdet und mit deutlichen Ablösungen im oberen Bereich (rechts)

Fazit

Im Beobachtungszeitraum von GW II - Kurzzeit wurden keine Undichtigkeiten an den Abdichtungen festgestellt.

Innerhalb des Beobachtungszeitraums GW II - Langzeit waren alle Fehlstellen „lokale Schädigung“ (LS) dicht. Auch die unteren Schachtringfugen wurden über den gesamten Beobachtungszeitraum erfolgreich abgedichtet, lediglich die drei oberen Schachtringfugen SF 5, 6 und 7 zeigten hier geringfügige Feuchtefahnen. Die beiden unteren Schachtringfugen „flächige Undichtigkeit“ FU 2 und 4 ließen ebenfalls Feuchtefahnen erkennen, die jedoch zum Ende des Beobachtungszeitraums in ihrer Ausdehnung kleiner wurden. Zur gleichen Zeit konnte festgestellt werden, dass z.T. ausreagiertes Injektionsmaterial durch die Schachtringfugen in den Schacht eindrang. Zu keiner Zeit war die infiltrierende Wassermenge aus diesen Feuchtefahnen messtechnisch erfassbar bzw. abflusswirksam.

Alle während des Ausbaus frei gelegten Injektionskörper lösten von der Schachtwand ab oder verblieben lediglich partiell an der Schachtwand.

6.3.2.8 E 2 F

Im Vorfeld der Injektion dieses Zementleims äußerten sowohl Sanierer, als auch Materialhersteller ihre Bedenken mit Blick auf die Anwendbarkeit des Materials zur Reparatur von vergleichsweise kleinräumigen Schadensbildern ohne Hohlraumverpressung im Boden (vgl. Abschnitt 4.4.2.2). So wurden insbesondere die in den Schachtringfugen zu verpressenden Mengen für dieses Verfahren als unüblich gering bewertet. Üblicherweise wird Zementleim in größeren Mengen in Hohlräume u.ä. verpresst.

Sofern ein hoher Materialdurchsatz nicht gewährleistet ist, besteht die Gefahr, dass sich die Förderpumpe aufgrund beginnender Materialerhärtung zusetzt. Mit dem hier verwendeten Zementleim E 2 F (Hersteller: Pagel Spezial-Beton GmbH & Co. KG, Essen) wurden exemplarisch die zwei obersten Schachtringfugen SF 6 und SF 7 sowie die Schadstelle FU 6 verpresst. Zur Verdämmung der Ringfugen wurde der Blitzzement Cerinol Fix (Deitermann Weber) verwendet.

Wesentliche Verfahrensschritte:

1. Verdämmen der Schachtringfugen mittels Hinterfüllschnüren aus Schaumstoff und Blitzmörtel und Verschluss von starken Undichtigkeiten an den Fehlstellen mittels Holzdübeln;
2. Bohren von Löchern zur Aufnahme der Packer;
3. Einschlagen der Packer;
4. Verpressen des Zementleims (vgl. Bild 148);
5. Entfernen der Packer (um den Abdichtungserfolg auch an den Packern sehen zu können, wurden diese hier jedoch nicht entfernt).



Bild 148 Befüllen der Förderpumpe mit Zementleim (links); Injektion in Fehlstelle (rechts)

Arbeitsaufwand und Materialverbrauch

Die exemplarisch durchgeführte Abdichtung von zwei Schachtringfugen SF 6 und SF 7 sowie der Schadstelle „flächige Undichtigkeit“ FU 6 dauerte etwa vier Stunden und dreißig Minuten. Dabei wurden insgesamt etwa 100 kg des Trockenmörtels verpresst.

Inspektionsergebnisse GW II - Kurzzeit

Nach den Injektionsarbeiten waren im Beobachtungszeitraum keine Undichtigkeiten an den sanierten Schadstellen zu erkennen.

Inspektionsergebnisse GW II - Langzeit

Im weiteren Beobachtungszeitraum waren keine Undichtigkeiten an den sanierten Schadstellen zu erkennen.

Lediglich an zwei Packern bildeten sich geringfügige Undichtigkeiten in Form von Feuchtfahnen (vgl. Bild 149, rechts).



Bild 149 Erfolgreiche Abdichtung des Schadens FU 6 (links); Wassereindrang durch einen Packer im Bereich der Schachtringfuge 6 (rechts)

Weitere Auffälligkeiten wurden im Beobachtungszeitraum nicht festgestellt.

Bilder des Injektionskörpers

Nachfolgend ist der Injektionskörper an der Fehlstelle FU 6 dargestellt (Bild 150).

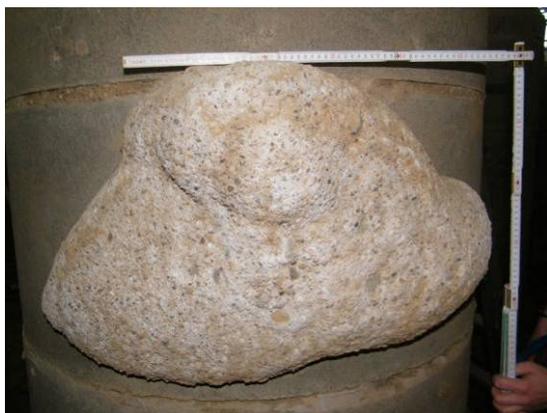


Bild 150 Zementleim-Injektionskörper an der sanierten Schadstelle FU 6 in der Ansicht (links) und in der Seitenansicht (rechts)

Fazit

Die exemplarisch durchgeführte Injektion von Zementleim war erfolgreich. Lediglich an zwei Packern war ein kaum abflusswirksamer Wassereindrang zu erkennen. Während der Abdichtungsarbeiten musste die Förderpumpe wegen Zusetzens zweimal instandgesetzt werden.

6.3.3 Abdichtungssysteme für Rohranbindungen

6.3.3.1 Carbo Stop U und Carbo Crack Seal H

Das Abdichten der Rohranbindungen erfolgte mittels Vor- und Nachinjektion von Polyurethanharzen (vgl. Abschnitt 4.4.2.3) bei Grundwasserstufe I und II (vgl. Bild 37). Dabei wurde zunächst der 1-komponentige Polyurethanschaum Carbo Stop U verpresst und nach einer Aushärtezeit von ca. 20 Minuten erfolgte die Nachinjektion des 2-komponentigen Polyurethanharzes Carbo Crack Seal H (Hersteller beider Injektionsmaterialien: Minova Carbo Tech GmbH, Essen). Sofern die Ringspalte verdämmt wurden, kam der Blitzzement Cerinol Fix (Hersteller: Deitermann Weber) zum Einsatz.

Wesentliche Verfahrensschritte:

1. Verdämmen der Ringspalte DN 150 mit einem Blitzzement; im Schachtunterteil war der Wasserdruck an den Rohreinbindungen DN 300 jedoch zu hoch, um eine Verdämmung herzustellen, daher wurde eine temporäre Abdichtung mittels gummiummantelter Absperrblase hergestellt (vgl. Bild 151 links);
2. Bohren von Löchern zur Aufnahme der Packer;
3. Einschlagen der Packer;
4. Verpressen des Injektionsmaterials (vgl. Bild 151, rechts);
5. Entfernen der Packer (um den Abdichtungserfolg auch an Packern sehen zu können, wurden diese z.T. jedoch nicht entfernt);
6. Entfernen von Injektionsmaterial, das in den Schacht eingedrungen ist;
7. Entfernen der temporären Abdichtung (ummantelte Absperrblasen).



Bild 151 Herstellen einer temporären Abdichtung aus Absperrblase und Gummimantel einer Manschette DN 300 (links), Injektion eines Polyurethanharzes an einem Seitenzulauf DN 150 (rechts)

Im Rahmen der Versuche wurden undichte Rohranbindungen bei Grundwasserstufe I und II saniert. Im Folgenden sind die Versuchs- und Inspektionsergebnisse diesen beiden Fällen zugeordnet und dargestellt.

Sanierung bei Grundwasserstufe I

Arbeitsaufwand und Materialverbrauch

Das Abdichten der vier Rohranbindungen dauerte etwa fünf Stunden und dreißig Minuten. Dabei wurden insgesamt etwa 18 Liter des 1-komponentigen Polyurethanschaums und ca. 4,5 Liter des 2-komponentigen Polyurethanharzes verarbeitet. Die Verdämmung der Ringspalte erforderte ca. 2 kg Mörtel.

Inspektionsergebnisse GW I - Kurzzeit

Die Kontrolle der abgedichteten Rohranbindungen nach einer Woche bei konstantem Außenwasserdruck zeigte Undichtigkeiten an beiden Seitenzuläufen DN 150, die messtechnisch nicht erfasst wurden. In beiden Fällen waren Risse in der Verdämmung vorhanden, durch die das Wasser eindrang (vgl. Bild 152, links, roter Pfeil). Die Rohranbindungen DN 300 zeigten hingegen keine Auffälligkeiten, hier war kein Wassereindrang zu erkennen (vgl. Bild 152, rechts).



Bild 152 Ergebnis der Abdichtungsarbeiten an Kunststoffrohren: Beispiel für eine undichte Rohranbindung DN 150 mit nachdrückendem Wasser aus einem radialen Riss in der Verdämmung (vgl. roter Pfeil, links), erfolgreiche Abdichtung der Rohranbindung DN 300 (rechts)

Inspektionsergebnisse GW II - Kurzzeit und GW II - Langzeit

Bei allen Nachuntersuchungen zeigten sich keine Zustandsveränderungen (im Vergleich zur ersten Untersuchung nach einer Woche) an den Undichtigkeiten der beiden Seitenzuläufe DN 150 aus Steinzeug und Kunststoff.

Ebenso verhält es sich für die abgedichteten Rohranbindungen DN 300. Hier konnte zu keiner Zeit ein Wassereindrang beobachtet werden.

Bilder der Injektionskörper

Nachfolgend sind exemplarisch einzelne Injektionskörper dargestellt.



Bild 153 Polyurethan-Injektionskörper, bei Grundwasserstufe I hergestellt, an PVC-Rohr DN 150 (links) und Steinzeugrohr DN 150 (rechts)

Sanierung bei Grundwasserstufe II

Arbeitsaufwand und Materialverbrauch

Das Abdichten der vier Rohranbindungen dauerte etwa zwei Stunden und dreißig Minuten. Dabei wurden insgesamt etwa 17 Liter des 1-komponentigen Polyurethanschaums und ca. 10 Liter des 2-komponentigen Polyurethanharzes verarbeitet. Es wurde kein Blitzzement für die Verdämmung der Ringräume eingesetzt, sondern gummiummantelte Absperrblasen.

Inspektionsergebnisse GW II - Kurzzeit

An allen sanierten Rohranbindungen waren keine Auffälligkeiten oder Undichtigkeiten zu erkennen.

Inspektionsergebnisse GW II - Langzeit

Nach ca. vier Wochen waren Undichtigkeiten an beiden Seitenzuläufen DN 150 zu erkennen (vgl. Bild 154). Eine Zustandsveränderung über die weitere Beobachtungszeit stellte sich nicht ein.

An den abgedichteten Rohranbindungen der Nennweite DN 300 zeigten sich während des gesamten Beobachtungszeitraums keine Undichtigkeiten.



Bild 154 Ergebnis der Abdichtungsarbeiten an Rohranbindungen DN 150: Undichte Anbindung des Steinzeug- (links) und des Kunststoffrohres (rechts)

Bilder der Injektionskörper

Nachfolgend sind exemplarisch einzelne Injektionskörper dargestellt.



Bild 155 Polyurethan-Injektionskörper hergestellt bei Grundwasserstufe II an einem PVC-Rohr DN 150 (links) und Steinzeugrohr DN 150 (rechts)

Fazit

Bereits eine Woche nach der **Abdichtung** der beiden Seitenzuläufe DN 150 **bei Grundwasserstufe I** zeigten sich Risse in der Mörtelverdämmung und ein Feuchteintrag. Es kann somit unterstellt werden, dass die Injektion ebenfalls nicht ausreichend für eine dauerhafte Abdichtung dieser Rohranbindungen war. Die infiltrierende Wassermenge wurde messtechnisch nicht erfasst, jedoch war sie erkennbar abflusswirksam. Die abgedichteten Rohranbindungen DN 300 waren über den gesamten Beobachtungszeitraum unauffällig.

Die bei **Grundwasserstufe II abgedichteten Rohranbindungen** der Nennweite DN 300 aus Steinzeug und Kunststoff waren über den gesamten Beobachtungszeitraum dicht. Lediglich die sanierten Seitenzuläufe DN 150 wurden nach etwa vier Wochen undicht. Die eindringende Wassermenge konnte jedoch messtechnisch nicht erfasst werden und war darüber hinaus nicht abflusswirksam.

6.3.3.2 Carbo Cryl Wv

Die Rohranbindungen sind mit dem Acrylatgel Carbo Cryl Wv (Hersteller: Minova Carbo Tech GmbH, Essen) abgedichtet worden (vgl. Abschnitt 4.4.2.3). Das Material wurde mittels einer 2-Komponenten-Pumpe in einem Mischungsverhältnis von 1:1 bei Grundwasserstufe I und II injiziert (vgl. Bild 37). Bei den hier durchgeführten Sanierungen stellten die Mitarbeiter der Sanierungsfirma die Reaktionszeit des Gels auf etwa 150 Sekunden ein. Sofern die Ringspalte verdämmt wurden, kam der Blitzzement Cerinol Fix (Deitermann Weber) zum Einsatz.

Wesentliche Verfahrensschritte:

1. Verdämmen der Ringspalte DN 150 mit einem Blitzmörtel; im Schachtunterteil war der Wasserdruck jedoch zu hoch, um eine Verdämmung herzustellen, daher wurde diese als temporäre Maßnahme mittels ummantelter Absperrblase hergestellt;
2. Bohren von Löchern zur Aufnahme der Packer;

3. Einschlagen der Packer in die Bohrlöcher (vgl. Bild 156, links);
4. Verpressen des Injektionsmaterials (vgl. Bild 156, rechts);
5. Entfernen der Packer (um den Abdichtungserfolg auch an den Packern sehen zu können, wurden diese z.T. hier jedoch nicht entfernt);
6. Entfernen der temporären Abdichtung (ummantelte Absperrblasen).



Bild 156 Einschlagen eines Injektionspackers (links), Verpressen des Acrylatgels an einem Seitenzulauf DN 150 (rechts)

Im Rahmen der Versuche wurden undichte Rohranbindungen bei Grundwasserstufe I und II saniert. Im Folgenden sind die Versuchs- und Inspektionsergebnisse diesen beiden Fällen zugeordnet und dargestellt.

Sanierung bei Grundwasserstufe I

Arbeitsaufwand und Materialverbrauch

Das Abdichten der vier Rohranbindungen dauerte etwa drei Stunden. Dabei wurden insgesamt etwa 20 Liter Acrylatgel zzgl. des gleichen Volumens Wasser und etwa 3 kg Blitzzement verarbeitet.

Inspektionsergebnisse GW I - Kurzzeit und GW II - Kurzzeit

Die Kontrolle der vier abgedichteten Rohranbindungen nach einer Woche bei konstantem Außenwasserdruck zeigte keine Undichtigkeiten.

Inspektionsergebnisse GW II - Langzeit

Erst bei der Abschlusskontrolle nach etwa 18 Wochen bei maximalem Grundwasserstand zeigte sich ein geringfügiger, messtechnisch nicht erfassbarer Wassereindrang an beiden sanierten Rohranbindungen DN 150 in Form von Wassertropfen am in das Rohr einragenden Injektionsgut (vgl. Bild 157, links) und einer Feuchtefahne in der Rohrsohle (vgl. Bild 157, rechts).

Die sanierten Rohranbindungen der Nennweite DN 300 zeigten hingegen bis zuletzt keine Undichtigkeiten.



Bild 157 Ergebnisse der Abdichtungsarbeiten an den Seitenzuläufen DN 150: Wassertropfen hängt an einragendem Injektionsmaterial (vgl. roter Pfeil, links), Wasser dringt durch einen Riss zwischen Mörtelverdämmung und Rohrspiegel ein (vgl. roter Pfeil, rechts)

Bilder der Injektionskörper

Nachfolgend sind exemplarisch einzelne Injektionskörper dargestellt.



Bild 158 Acrylatgel-Injektionskörper an sanierten Rohranbindungsbereichen der Nennweite DN 150 aus Steinzeug (links) und PVC (rechts)

Sanierung bei Grundwasserstufe II

Arbeitsaufwand und Materialverbrauch

Das Abdichten der vier Rohranbindungen dauerte etwa drei Stunden. Dabei wurden insgesamt etwa 20 Liter Acrylatgel zzgl. des gleichen Volumens Wasser verarbeitet. Es wurde kein Blitzzement für die Verdämmung der Ringräume eingesetzt, sondern gummiummantelte Absperrblasen.

Inspektionsergebnisse GW II - Kurzzeit

An allen sanierten Rohranbindungen waren keine Auffälligkeiten oder Undichtigkeiten zu erkennen.

Inspektionsergebnisse GW II - Langzeit

Bei der abschließenden Inspektion zeigte sich eine Undichtigkeit an dem Seitenzu-
lauf DN 150 Steinzeug. Hier war ein geringfügiger Wassereindrang vorhanden, be-
ginnend an der linken Rohrkämpferseite bis hin zur Sohle (vgl. Bild 159, links). Die
bräunlichen Verfärbungen zeigen den Fließweg des eindringenden Wassers. Dar-

über hinaus ließ sich das Acrylatgel aus dem Ringraum herausziehen und zeigte dementsprechend keinen Verbund zu den umgebenden Materialien - Betonschacht, Steinzeugrohr und Schachtfutter aus Kunststoff (vgl. Bild 159, rechts). Die abgedichtete Kunststoffrohranbindung DN 150 hingegen war bis zuletzt ohne Auffälligkeiten und dicht.

Die abgedichteten Rohranbindungen der Nennweite DN 300 ließen während des gesamten Beobachtungszeitraums keine Undichtigkeiten erkennen.



Bild 159 Undichte Steinzeug-Rohranbindung DN 150: Feuchtefahne und Fließspur mit Verfärbung beginnend im Sohlbereich (links), vollständig losgelöstes Acrylatgel im Ringraum, auf der Rohraußenseite schwarz verfärbt (rechts)

Bilder der Injektionskörper

Nachfolgend sind exemplarisch einzelne Injektionskörper dargestellt.



Bild 160 Acrylatgel-Injektionskörper hergestellt bei Grundwasserstufe II an Steinzeug- (links) und PVC-Rohranbindung DN 150 (rechts): Partielle Ablösung des Injektionskörpers von der Rohr- und Schachtwand

Fazit

Die bei **Grundwasserstufe I abgedichteten Rohranbindungen** der Nennweite DN 300 aus Kunststoff und Steinzeug waren bis zur Abschlusskontrolle dicht. Demgegenüber zeigten die Seitenzuläufe der Nennweite DN 150 geringfügige Undichtigkeiten, die messtechnisch jedoch nicht erfasst werden konnten.

Die **Abdichtung bei Grundwasserstufe II** hatte zum Ergebnis, dass beide sanierten Rohranbindungen der Nennweite DN 300 und die Kunststoffrohranbindung DN 150 über den gesamten Beobachtungszeitraum dicht waren. Lediglich die Abdichtung des Seitenzulaufs DN 150 aus Steinzeug ließ am Ende des Beobachtungszeitraums geringfügige Undichtigkeiten erkennen. Darüber hinaus konnte das Injektionsmaterial hier aus dem Ringraum von Hand ohne nennenswerten Kraftaufwand entfernt werden.

Nachdem der Boden aus dem Versuchsstand ausgebaut worden war und Bereiche der Injektionskörper freigelegt wurden, konnte beobachtet werden, dass sich die Injektionskörper teilweise von den Rohren und Schachtwandungen ablösten. Inwieweit dies z.B. auf Schrumpfungsprozesse oder allein auf die veränderte Lastverteilung zurückzuführen war, ist offen.

6.3.3.3 E 1 F

Die Abdichtung der Rohranbindungen mittels Injektion von Zementleim Pagel E 1 F (vgl. Abschnitt 4.4.2.3) erfolgte lediglich an einem Schacht bei Grundwasserstufe I (vgl. Bild 37). Hintergrund waren versuchstechnische Einschränkungen (Flutung angrenzender Schächte) sowie die grundsätzliche Empfehlung der Sanierungsfirma, auf einen Einsatz von Zementleim bei hohem Wasserandrang und Grundwasserdruck zu verzichten.

Wesentliche Verfahrensschritte:

1. Verdämmen der Ringspalte DN 150 mit einem Blitzzement; im Schachtunterteil war der Wasserdruck jedoch zu hoch, um eine Verdämmung herzustellen, daher wurde eine temporäre Abdichtung mittels gummiummantelter Absperrblase hergestellt;
2. Bohren von Löchern zur Aufnahme der Packer;
3. Einschlagen der Packer;
4. Verpressen des Zementleims;
5. Entfernen der Packer (um den Abdichtungserfolg auch an den Packern sehen zu können, wurden diese hier jedoch nicht entfernt);
6. Entfernen der temporären Abdichtung (auf Empfehlung der Sanierungsfirma erst nach 3 Tagen).



Bild 161 Abdichtung der Rohranbindungen mittels Zementleiminjektion: Wassereindrang durch offenen Packer (links), Befüllen der Injektionspumpe mit Zementleim (rechts)

Arbeitsaufwand und Materialverbrauch

Das Abdichten der vier Rohranbindungen dauerte etwa drei Stunden und dreißig Minuten. Dabei wurden insgesamt etwa 80 kg des Trockenmörtels verpresst.

Inspektionsergebnisse GW I - Kurzzeit

Die unmittelbar nach Abschluss der Sanierungsarbeiten dichten Rohranbindungen DN 150 zeigten nach wenigen Tagen bei konstantem Außenwasserdruck abflusswirksame Undichtigkeiten, welche messtechnisch jedoch nicht erfasst wurden. An beiden Anbindungen waren Risse in der Mörtelverdümmung vorhanden, durch die das Wasser eindrang (vgl. Bild 162). Die Injektion war somit ebenfalls nicht erfolgreich. Die Rohranbindungen DN 300 zeigten hingegen keine Auffälligkeiten, hier war kein Wassereindrang feststellbar.



Bild 162 Undichte Rohranbindungen DN 150 mit nachdrückendem Wasser aus einem radialen Riss in der Verdämmung des Kunststoff- (vgl. roter Pfeil, links) und Steinzeugrohres (vgl. roter Pfeil, rechts)

Inspektionsergebnisse GW II - Kurzzeit und GW II - Langzeit

Bei allen Nachuntersuchungen zeigten sich keine wesentlichen Zustandsveränderungen an den Undichtigkeiten der beiden Seitenzuläufe DN 150 aus Steinzeug und Kunststoff im Vergleich zur ersten Untersuchung. Lediglich die Infiltrationsmenge an der Rohranbindung für das Steinzeugrohr war erkennbar höher und wurde zu ca.

3,5 Liter pro Stunde bestimmt. Die sanierten Rohranbindungen der Nennweite DN 300 waren weiterhin dicht.

Bilder der Injektionskörper

Nachfolgend sind exemplarisch Detailaufnahmen der äußeren, freigelegten Rohranschlussbereiche mit nur teilweise vorhandenen Injektionskörpern dargestellt.



Bild 163 Zementleim-Injektionskörper am Anschlussbereich des Kunststoffrohres DN 150 mit erkennbarem Spalt zwischen Rohr und Injektionskörper (links), linke Kämpferseite des Steinzeugrohrs DN 150 ohne umgebendes Injektionsmaterial (rechts)

Fazit

Bereits innerhalb der ersten Woche nach der Abdichtung der beiden Seitenzuläufe DN 150 (GW I - Kurzzeit) zeigten sich Risse in der Mörtelverdümmung und ein Feuchteeintrag. Somit reichte auch die Zementleiminjektion nicht aus, um die Rohranbindung dauerhaft abzudichten. Die infiltrierende Wassermenge wurde zu Beginn messtechnisch nicht erfasst, jedoch war sie erkennbar abflusswirksam. Zum Ende des Beobachtungszeitraums in GW II - Langzeit betrug die Infiltrationsmenge ca. 3,5 Liter pro Stunde. Nach der Aufgrabung war zu erkennen, dass sich kaum Injektionsmaterial im Umfeld der Rohranbindung befand und der Ringspalt zwischen Rohr und Schachtfutter offensichtlich nicht oder nicht ausreichend mit Zementleim verfüllt werden konnte. Die sanierten Rohranbindungen der Nennweite DN 300 waren über die gesamte Versuchsdauer unauffällig.

6.3.4 Umweltverträglichkeit

Mit Blick auf eine potenzielle Umweltgefährdung durch Injektionsarbeiten, insbesondere die Verschmutzung des Bodens und/oder des anstehenden Grundwassers, haben alle Materialhersteller die Ergebnisse entsprechender Untersuchungen, z.B. die Prüfberichte zu „Säulenversuchen nach dem DIBt-Merkblatt“ [44] oder Prüfzeugnisse der Untersuchungen nach den KTW-Empfehlungen des DVGW [45] vorgelegt. Die im Rahmen der Großversuche eingesetzten Materialien haben somit in speziellen Prüfungen ihre Umweltverträglichkeit nachgewiesen.

Grundsätzlich ist jedoch z.B. bei unsachgemäßer Anwendung denkbar, dass teilweise nicht ausreagiertes Injektionsmaterial im Boden und/oder Grundwasser verbleibt. Gerade unter den beengten räumlichen Randbedingungen im Großversuchsstand

bot es sich nun an zu überprüfen, inwieweit auch eine Vielfalt der eingesetzten Injektionsmaterialien sich in Summe überhaupt nachteilig auf das Wasser und den Boden auswirken kann. So wurden fünf Injektionsmaterialien auf Kunststoffbasis und zwei auf Zementbasis im selben Versuchsstand eingesetzt.

Wasserproben wurden direkt aus dem Wasserstrom gewonnen, der in die Schächte des Großversuchsstandes infiltrierte. Beim Hygiene-Institut des Ruhrgebiets in Gelsenkirchen wurden die Proben auf mögliche schädliche Auswirkungen der Injektionsmaterialien auf das Wasser untersucht. Das zu Beginn in den Versuchsstand eingefüllte Wasser wurde während der gesamten Dauer weitgehend nicht ausgetauscht, lediglich Verdunstungsverluste o.ä. wurden ausgeglichen. Das in die Schächte eindringende Wasser wurde im Kreislauf gepumpt und wieder versickert. Eine Bodenprobe wurde mittig aus etwa 0,5 Meter Tiefe unter Versuchsstands-GOK gewonnen und ebenfalls analysiert. Tabelle 39 enthält die wesentlichen Randbedingungen und Ergebnisse der Prüfungen.

Tabelle 39 Materialproben zur Umweltverträglichkeit, Entnahmestellen und Ergebnisse

Art der Materialprobe	Entnahmestelle der Materialprobe	Untersuchungsergebnisse des Hygiene-Instituts [46]
Wasserprobe	Pumpensumpf Großversuchsstand	Bei den genannten Proben handelt es sich in allen Fällen um leicht alkalisch reagierende Wässer mit mäßigem Elektrolyt-(Salz-)Gehalt, der vornehmlich auf gelöste Alkali- und Erdalkaliverbindungen, denen als Anionen Chloride, Sulfate und Hydrogencarbonate zuzuordnen sind, zurückzuführen ist. Organische Belastungen sind, wie die Analysendaten für den organischen Stickstoff sowie der Summenparameter „CSB“ belegen, lediglich den Proben „Pumpensumpf“ und „Schacht 2“ zuzuschreiben. Die gaschromatografisch/massenspektrometrischen Untersuchungen ergaben keine weiteren Auffälligkeiten.
Wasserprobe	Schacht 1 (Gerinne)	
Wasserprobe	Schacht 2 (Gerinne)	
Wasserprobe	Schacht 4 (vollgefüllt)	
Wasserprobe	Schacht 7 (Schadstelle FU 2)	
Bodenprobe (Kies-Sand-Gemisch)	Großversuchsstand, mittig aus ca. 0,5 m Tiefe	Es sind geringe Mengen an Alkali- und Erdalkalhydrogencarbonaten eluierbar. Organische Belastungen sind dem Sand nicht zuzuschreiben.

Darüber hinaus konnten einzelne Proben von möglicherweise nicht ausreagiertem Injektionsmaterial aus Schächten des Großversuchsstands gewonnen werden, die ebenfalls auf ihr mögliches Gefährdungspotenzial hin untersucht worden sind. Im Einzelnen handelt es sich dabei um weiches Material eines injizierten Polyurethanharzes (vgl. Bild 164, links) und um Acrylatgel (vgl. Bild 164, rechts).



Bild 164 In Schächte eingedrungenes, weiches Injektionsmaterial aus Polyurethan (links) und Acrylat (rechts) entnommen für umwelthygienische Untersuchungen

Im Ergebnis zeigten die Analysen, dass die Materialien durchaus ausreagiert sind und als ungefährlich mit Blick auf eine mögliche Belastung des Grundwassers zu charakterisieren sind [46].

Ergänzend wurden Injektions-Probekörper von abgedichteten Rohranbindungen untersucht, die ohne anstehendes Grundwasser in mit Kies-Sand gefüllten Containern hergestellt worden waren (vgl. Bild 165 und Abschnitt 7.6). Untersucht wurden Injektionskörper aus Polyurethan und Acrylatgel (vgl. Bild 165).



Bild 165 Injektionskörper aus Polyurethan (links) und aus Acrylatgel (rechts) entnommen für Elutionsversuche

Die Dreifachelution der Injektionskörper zeigte unterschiedliche Ergebnisse. Für den Polyurethan-Injektions-Probekörper konnte eine deutliche Belastung durch wasserlösliche, organische Stoffe festgestellt werden, die jedoch im Verlauf des mehrfachen Kontakts mit Wasser um mehr als 90 % abnahm [46]. Vermutlich reagierte eine Komponente (Polyol) infolge unzureichender Vermischung der einzelnen Komponenten nicht vollständig aus. Eine Verunreinigung ggf. noch ansteigenden Grundwassers wäre somit nicht auszuschließen.

Die Untersuchung des Acrylatgel-Injektions-Probekörpers ergab, dass organische Belastungen den untersuchten Wässern nicht oder nur in geringem Umfang zuzuschreiben waren. Jedoch konnten mittels gaschromatografischen Untersuchungen an diesem Probekörper Weichmacher (Phtalate) identifiziert werden [46].

Fazit

Die hygienischen Untersuchungen von Wasser- und Bodenproben aus dem Großversuchsstand waren weitgehend unauffällig. Obwohl eine Vielzahl von Materialien zum Einsatz kam, konnten schädliche Auswirkungen auf das Wasser nicht festgestellt werden.

Jedoch zeigten die ohne anstehendes bzw. drückendes Wasser hergestellten Injektionskörper durchaus Auffälligkeiten, welche u. a. auf eine unzureichende Vermischung der Einzelkomponenten hinwiesen. Darüber hinaus konnten in geringem Umfang Weichmacher (Phtalate) nachgewiesen werden. Mit Blick auf die Anwendung in Wasserschutzgebieten sind somit geeignete Materialien auszuwählen. Grundsätzlich ist auf eine vollständige Vermischung der Komponenten insbesondere bei Injektionsbeginn und -ende zu achten.

6.4 Ergebnisse der Großversuche

6.4.1 Bautechnische Umsetzung

Im Folgenden werden Aspekte der bautechnischen Umsetzung bei Abdichtung, Untergrundvorbereitung und Beschichtung im Rahmen der Großversuche erörtert.

Abdichtungen

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

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

Bei der Abdichtung der Schachtkörper wurden Stopf- und Flächenmörtel für die händische Verarbeitung und Gele, Harze bzw. Zementleim zur Injektion eingesetzt. Die Vorgehensweise bei den Injektionsverfahren war vergleichbar mit der bei den Abdichtungen der Rohreinbindungen. Lediglich die gegebenenfalls erforderlichen Vorabdichtungen erfolgten hier ausschließlich mit Blitzmörtel. Für die Anwendung der

Stopf- und Flächenmörtel wurde der Untergrund im Vorfeld gereinigt. Anschließend wurden die Materialien so lange händisch auf die Schadstellen aufgetragen, bis eine Dichtwirkung erzielt werden konnte.

Die ausführenden Firmen waren mit den anfallenden Arbeiten vertraut und kamen auch mit den beengten Arbeitsbedingungen im Schachtbauwerk gut zurecht.

Untergrundvorbereitung für Beschichtungen

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

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

Da eine Schachtseite vor der Untergrundvorbereitung mit Pflanzenfett präpariert worden war, wurden von den ausführenden Firmen teilweise Fettlöser eingesetzt. Im Vergleich zur Vorbereitung mit Heißwasser ohne Fettlöser konnten jedoch keine Unterschiede festgestellt werden.

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

Mörtelbeschichtungen

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

schichtung war hier im Mittel etwa doppelt so hoch wie der zeitliche Aufwand für die Untergrundvorbereitung.

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

Polymere Beschichtungen

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

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

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

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

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

6.4.2 Kurzzeit-Wirkung

6.4.2.1 Abdichtung der Rohreinbindungen

Im Folgenden werden die Ergebnisse der Abdichtungsmaßnahmen an den Rohreinbindungen zusammengefasst. Direkt nach der Injektion konnte bei allen Verfahren ein Abdichtungserfolg verzeichnet werden. Die zeitabhängigen Abdichtungsergebnisse mit den zugehörigen Wasserdrücken sind in Tabelle 40 dargestellt.

Tabelle 40 Abdichtung Rohreinbindungen: GW I und GW II - Kurzzeit

Material	Schädigung Rohreinbindung	GW I - Kurzzeit		GW II - Kurzzeit		
		Wasserdruck	Prüfergebnis	Wasserdruck	Prüfergebnis	
Zementleiminjektion (Saniert bei GW I)	DN 150, Steinzeug	0,3 mWs	Undicht	2,1 mWs	Undicht	
	DN 150, PVC		Undicht		Undicht	
	DN 300, Steinzeug	2,9 mWs	Dicht	4,7 mWs	Dicht	
	DN 300, PVC		Dicht		Dicht	
Gelinjektion (Saniert bei GW I)	DN 150, Steinzeug	0,3 mWs	Dicht	2,1 mWs	Dicht	
	DN 150, PVC		Dicht		Dicht	
	DN 300, Steinzeug	2,9 mWs	Dicht	4,7 mWs	Dicht	
	DN 300, PVC		Dicht		Dicht	
Harzinjektion (Saniert bei GW I)	DN 150, Steinzeug	0,3 mWs	Feuchtefahnen	2,1 mWs	Feuchtefahnen	
	DN 150, PVC		Feuchtefahnen		Feuchtefahnen	
	DN 300, Steinzeug	2,9 mWs	Dicht	4,7 mWs	Dicht	
	DN 300, PVC		Dicht		Dicht	
Gelinjektion (Saniert bei GW II)	DN 150, Steinzeug	entfällt		2,1 mWs	Dicht	
	DN 150, PVC				Dicht	
	DN 300, Steinzeug			4,7 mWs	Dicht	
	DN 300, PVC				Dicht	
Harzinjektion (Saniert bei GW II)	DN 150, Steinzeug			2,1 mWs		Dicht
	DN 150, PVC					Dicht
	DN 300, Steinzeug			4,7 mWs		Dicht
	DN 300, PVC					Dicht

Es ist zu erkennen, dass die Zementleiminjektion an der Einbindung DN 150 bereits nach kurzer Zeit undicht wurde und auch bei GW II undicht blieb. Bei DN 300 waren auch nach dem Anstieg des Grundwasserstandes auf GW II keine Undichtigkeiten zu erkennen. Die Gelinjektionen zeigten durchweg kein eindringendes Wasser und waren somit durchweg als dicht zu bezeichnen. Die bei GW I durchgeführten Harzinjektionen zeigten recht kurzfristig nach der Sanierung Feuchtefahnen, welche jedoch nicht zu einer abflusswirksamen Infiltration führten. Auch die Erhöhung des Grundwasserstandes brachte keine Verschlechterung dieses Zustandes. Die bei Grundwasserstand II durchgeführten Harzinjektionen zeigten im Beobachtungszeitraum keinerlei Auffälligkeiten und waren dicht.

6.4.2.2 Abdichtung der Schachtkörper

Im Folgenden werden die Versuchsergebnisse der Abdichtungsmaßnahmen für den Schachtkörper dargestellt. Direkt nach der Maßnahme waren alle Fehlstellen erfolgreich abgedichtet. Im Beobachtungszeitraum GW II – Kurzzeit zeigten sich dann jedoch unterschiedliche Dichtwirkungen.

Die Ergebnisse für Zementleiminjektionen sowie Stopf- und Flächenmörtel, auch auf Silikatbasis, sind in Tabelle 41 dargestellt. Die Zementleiminjektionen wurden nur an drei Schadstellen bei einem Außenwasserdruck zwischen 0,5 und 1,0 mWs eingesetzt (vgl. Abschnitt 6.3.2.8). Unter diesen Randbedingungen konnten gute Ergebnisse erzielt werden.

Bei den zementgebundenen Stopf- und Flächenmörteln traten unabhängig von der Art der Fehlstelle und vom anstehenden Wasserdruck feuchte Stellen auf. Dies muss im Zusammenhang mit anschließenden Beschichtungsmaßnahmen kritisch bewertet werden. Auch wenn der Wassereindrang an diesen Feuchtefahnen nicht messbar bzw. abflusswirksam ist, so liegt dann dennoch drückendes Wasser vor, welches den Abbinde- bzw. Aushärtvorgang der Beschichtung stören kann. Im Falle des Silikatmörtels wurden unabhängig von der Fehlstellenart und dem Wasserdruck keine Undichtigkeiten festgestellt. Inwieweit dies allein auf die Materialeigenschaften zurückzuführen ist, bleibt offen.

Tabelle 41 Abdichtung Schachtkörper: Zementleiminjektionen, Stopf- und Flächenmörtel (GW II – Kurzzeit)

Schadstelle		Wasserdruck	Zementleim-Injektion	Stopf- und Flächenmörtel	Stopf- und Flächenmörtel auf Schadstelle begrenzt (silikatisch)
			GW II - Kurzzeit	GW II - Kurzzeit	GW II - Kurzzeit
„Lokale Schädigung“ (LS)	LS 7	0,2 mWs	Nicht saniert	Dicht	Dicht
	LS 5	1,2 mWs		Feuchtefahnen	Dicht
	LS 3	2,7 mWs		Dicht	Dicht
	LS 1	3,7 mWs		Dicht	Dicht
	LS SU	4,2 mWs		Dicht	Dicht
„Schädigung Schachtringfuge“ (SF)	SF 7	0,5 mWs	Dicht	Feuchtefahnen	Dicht
	SF 5	1,5 mWs	Nicht saniert	Dicht	Dicht
	SF 4	2,5 mWs		Feuchtefahnen	Dicht
	SF 3	3,0 mWs		Dicht	Dicht
	SF 2	3,5 mWs		Feuchtefahnen	Dicht
	SF 1	4,0 mWs		Feuchtefahnen	Dicht
„Flächige Undichtigkeit“ (FU)	FU 6	0,8 mWs	Dicht	Dicht	Dicht
	FU 4	2,0 mWs	Nicht saniert	Feuchtefahnen	Dicht
	FU 2	3,3 mWs		Feuchtefahnen	Dicht
Undichte Schachtringfuge (SF 6)	1,0 mWs	Dicht	Feuchtefahnen	entfällt	

Die Ergebnisse für Harz- und Gelinjektionen sowie Mörtel mit Kristallbildnern, sind in Tabelle 42 zusammengefasst. Bei den Harzinjektionen wurden drei Varianten der

Vorabdichtung ausgeführt: ohne, mit Mörtel oder mit PU-Schaum. Die Harz- und die Gelinjektionen waren bei allen Fehlstellen und Wasserdrücken dicht. Es zeigten sich im Beobachtungszeitraum GW II - Kurzzeit keinerlei Auffälligkeiten. Diese Verfahren scheinen damit zur unmittelbaren Vorbereitung von Beschichtungsmaßnahmen mit Blick auf die Abdichtungswirkung sehr gut geeignet zu sein. Hier bleibt jedoch zu berücksichtigen, dass auf der Schachtwandung anhaftende Materialreste von z.B. injizierten Harzen und Gelen entfernt werden sollten, um den Haftverbund der nachfolgend aufzutragenden Beschichtung nicht negativ zu beeinflussen. Der Mörtel mit Kristallbildnern zeigte ebenfalls ein sehr gutes Abdichtungsergebnis. Es waren keine undichten Bereiche zu erkennen. Jedoch wies die Oberfläche optisch eine sehr unregelmäßige Struktur mit stellenweiser Verfärbung auf. Feuchtemessungen zeigten hier jedoch keine erhöhten Messwerte.

Tabelle 42 Abdichtung Schachtkörper: Harz- und Gelinjektionen, Mörtel mit Kristallbildnern (GW II – Kurzzeit)

			Harzinjektion Vorabdichtung: ohne / mit Mörtel / mit PU-Schaum	Gelinjektion	Mörtel mit Kristallbildner
Schadstelle	Druck [mWs]		GW II - Kurzzeit	GW II -Kurzzeit	GW II - Kurzzeit
„Lokale Schädigung“ (LS)	LS 7	0,2	Dicht / Dicht / Dicht	Dicht	Dicht
	LS 5	1,2	Dicht / Dicht / Dicht	Dicht	Dicht
	LS 3	2,7	Dicht / Dicht / Dicht	Dicht	Dicht
	LS 1	3,7	Dicht / Dicht / Dicht	Dicht	Dicht
	LS SU	4,2	Dicht / Dicht / Dicht	Dicht	Dicht
„Schädigung Schachtringfuge“ (SF)	SF 7	0,5	Dicht / Dicht / Dicht	Dicht	Dicht
	SF 5	1,5	Dicht / Dicht / Dicht	Dicht	Dicht
	SF 4	2,5	Dicht / Dicht / Dicht	Dicht	Dicht
	SF 3	3,0	Dicht / Dicht / Dicht	Dicht	Dicht
	SF 2	3,5	Dicht / Dicht / Dicht	Dicht	Dicht
	SF 1	4,0	Dicht / Dicht / Dicht	Dicht	Dicht
„Flächige Undichtigkeit“ (FU)	FU 6	0,8	Dicht / Dicht / Dicht	Dicht	Dicht
	FU 4	2,0	Dicht / Dicht / Dicht	Dicht	Dicht
	FU 2	3,3	Dicht / Dicht / Dicht	Dicht	Dicht
Undichte Schachtringfuge (SF 6)	1,0	Dicht / Dicht / Dicht	Dicht	Ungleichmäßige Optik (helle und dunkle Stellen)	
Packer an SF 4	2,5	entfällt	Dicht		

6.4.2.3 Mörtelbeschichtungen

Im Folgenden werden die Versuchsergebnisse zu den Mörtelbeschichtungen für die Betrachtungszeiträume GW I und GW II – Kurzzeit dargestellt. Vor dem Anheben des Grundwasserstandes im Großversuchsstand wurden die Beschichtungen optisch inspiziert und auf Hohlstellen abgeklopft. Die Hälfte der sechs Mörtelbeschichtungen neigte, unabhängig von der Art der Nachbehandlung, zu einem Verbundverlust in Verbindung mit Rissbildungen. Dabei handelte es sich um bereits länger am Markt verfügbare Mörtel, welche in der Regel auch schneller erhärten. Die Rissbildungen hatten ihren Ursprung im Wesentlichen an den Schadstellen „flächige Undichtigkeit“ (FU), d.h. Stellen mit planmäßiger Verbundschwächung durch Trennmittel, oder an Schachtringfugen. Von dort breiteten sich die Risse bzw. Hohlstellen i.d.R. über mehrere Quadratmeter der Schachtoberfläche aus.

Die Stellen aus planmäßiger Verbundschwächung durch Trennmittel (flächige Undichtigkeit, FU) konnten teilweise durch Abklopfen nicht lokalisiert werden. Dies deutet darauf hin, dass sich in diesen Bereichen noch keine Hohlstellen gebildet hatten und das Beschichtungsmaterial zumindest noch flächig an der Schachtwand anlag. Bereits identifizierte Hohlstellen konnten nach dem Anheben des Grundwasserstandes allerdings durch Abklopfen nicht mehr erkannt werden.

Die Ergebnisse für den Beobachtungszeitraum GW I – Kurzzeit sind Tabelle 43 zu entnehmen. An den drei Beschichtungen ohne Rissbildung konnten keinerlei Schäden oder Auffälligkeiten festgestellt werden. Demgegenüber waren an den anderen drei Beschichtungen Feuchtefahnen an allen Schädigungen „Schachtringfuge“ (SF) und „flächige Undichtigkeit“ (FU) aufgetreten, welche unterhalb des Grundwasserspiegels lagen. An diesen war der Wassereindrang jedoch nicht messbar bzw. nicht abflusswirksam.

Tabelle 43 Mörtelbeschichtungen: GW I - Kurzzeit

Schadstelle		Druck [mWs]	Ergelit KS 1 (händisch)	Ergelit KS 1 (KS-ASS)	KA 20	Kanament	ombran MHP	SD 1 -W
„Lokale Schädigung“ (LS)	LS 7	entfällt	entfällt	entfällt	entfällt	entfällt	entfällt	entfällt
	LS 5	entfällt	entfällt	entfällt	entfällt	entfällt	entfällt	entfällt
	LS 3	0,9	Dp - D	Dp - D	Dp - D	Dp - D	Dp - D	Dp - D
	LS 1	1,9	Dp - D	Dp - D	Dp - D	Dp - D	Dp - D	Dp - D
	LS SU	2,4	Dp - D	Dp - D	Dp - D	Dp - D	Dp - D	Dp - D
„Schädigung Schachtringfuge“ (SF)	SF 7	entfällt	entfällt	entfällt	entfällt	entfällt	entfällt	entfällt
	SF 5	entfällt	entfällt	entfällt	entfällt	entfällt	entfällt	entfällt
	SF 4	0,7	Fp - F	Fp - F	Fp - F	Dp - D	Dp - D	Dp* - D*
	SF 3	1,2	Fp - F	Fp - F	Fp - F	Dp - D	Dp - D	Dp* - D*
	SF 2	1,7	Fp - F	Fp - F	Fp - F	Dp - D	Dp - D	Dp* - D*
	SF 1	2,2	Fp - F	Fp - F	Fp - F	Dp - D	Dp - D	Dp* - D*
„Flächige Undichtigkeit“ (FU)	FU 6	entfällt	entfällt	entfällt	entfällt	entfällt	entfällt	entfällt
	FU 4	0,2	Fp - F	Fp - F	Fp - F	Dp - D	Dp - D	Dp - D
	FU 2	1,5	Fp - F	Fp - F	Fp - F	Dp - D	Dp - D	Dp - D
Sonstiges:			Zusätzliche Hohlstellen mit Rissen und Feuchtfahnen			entfällt	entfällt	entfällt

Index „p“: Schachtseite vor der Untergrundvorbereitung mit Pflanzenfett präpariert

kein Index: Schachtseite vor der Untergrundvorbereitung nicht präpariert

U = Undicht; D = Dicht; F = Feuchtfahne; * etwa 5 mm tief reprofiliert

Die Ergebnisse für den Beobachtungszeitraum GW II – Kurzzeit sind Tabelle 44 zu entnehmen. Wiederum konnten an den drei Beschichtungen ohne Rissbildung keinerlei Schäden oder Auffälligkeiten festgestellt werden. An den anderen drei Beschichtungen wurde lediglich ein nicht messbarer bzw. nicht abflusswirksamer Wassereindrang beobachtet werden. Allerdings betraf dies alle „Schädigungen Schachtringfuge“ (SF) und „Flächige Undichtigkeit“ (FU), die unterhalb des Grundwasserspiegels lagen. Hohlstellen waren hier durch Abklopfen nicht mehr identifizierbar.

Tabelle 44 Mörtelbeschichtungen: GW II - Kurzzeit

Schadstelle		Druck [mWs]	Ergelit KS 1 (händisch)	Ergelit KS 1 (KS-ASS)	KA 20	Kanament	ombran MHP	SD 1 -W
„Lokale Schädigung“ (LS)	LS 7	0,2	Dp - D	Dp - D	Dp - D	Dp - D	Dp - D	Dp - D
	LS 5	1,2	Dp - D	Dp - D	Dp - D	Dp - D	Dp - D	Dp - D
	LS 3	2,7	Dp - D	Dp - D	Dp - D	Dp - D	Dp - D	Dp - D
	LS 1	3,7	Dp - D	Dp - D	Dp - D	Dp - D	Dp - D	Dp - D
	LS SU	4,2	Dp - D	Dp - D	Dp - D	Dp - D	Dp - D	Dp - D
„Schädigung Schachtringfuge“ (SF)	SF 7	0,5	Fp - F	Fp - F	Fp - F	Dp - D	Dp - D	Dp* - D*
	SF 5	1,5	Fp - F	Fp - F	Fp - F	Dp - D	Dp - D	Dp* - D*
	SF 4	2,5	Fp - F	Fp - F	Fp - F	Dp - D	Dp - D	Dp* - D*
	SF 3	3,0	Fp - F	Fp - F	Fp - F	Dp - D	Dp - D	Dp* - D*
	SF 2	3,5	Fp - F	Fp - F	Fp - F	Dp - D	Dp - D	Dp* - D*
	SF 1	4,0	Fp - F	Fp - F	Fp - F	Dp - D	Dp - D	Dp* - D*
„Flächige Undichtigkeit“ (FU)	FU 6	0,8	Fp - F	Fp - F	Fp - F	Dp - D	Dp - D	Dp - D
	FU 4	2,0	Fp - F	Fp - F	Fp - F	Dp - D	Dp - D	Dp - D
	FU 2	3,3	Fp - F	Fp - F	Fp - F	Dp - D	Dp - D	Dp - D
Sonstiges:			Zusätzliche Hohlstellen mit Rissen und Feuchtefahnen			entfällt	entfällt	entfällt

Index „p“: Schachtseite vor der Untergrundvorbereitung mit Pflanzenfett präpariert

kein Index: Schachtseite vor der Untergrundvorbereitung nicht präpariert

U = Undicht; D = Dicht; F = Feuchtefahne; * etwa 5 mm tief reprofiliert

6.4.2.4 Polymere Beschichtungen

Im Folgenden werden die Versuchsergebnisse zu den polymeren Beschichtungen für die Betrachtungszeiträume GW I und GW II – Kurzzeit dargestellt. Vor dem Anheben des Grundwasserstandes im Großversuchsstand wurden die Beschichtungen optisch inspiziert und auf Hohlstellen abgeklopft. Vereinzelt ließen sich sogenannte Pinholes und auch lokal fehlendes Material feststellen. Die Stellen mit planmäßiger Verbundschwächung durch Trennmittel konnten teilweise durch Abklopfen nicht lokalisiert werden. Dies deutet darauf hin, dass sich in diesen Bereichen noch keine Hohlstelle gebildet hatte und das Beschichtungsmaterial zumindest noch flächig an der Schachtwand anlag. Nach dem Anheben des Grundwasserstandes konnten zudem zahlreiche Hohlstellen unterhalb des Wasserstandes nicht mehr lokalisiert werden.

Die Ergebnisse für den Beobachtungszeitraum GW I – Kurzzeit sind Tabelle 45 zu entnehmen. An der Kombination aus Beschichtung mit dem Material Autoschicht und dem eingebauten Handlaminat stellte sich direkt ein erheblicher Wassereindrang an den Ringfugen über die gesamte Höhe ein. Da aus versuchstechnischer Sicht (provozierte Undichtigkeit) auf eine Reprofilierung verzichtet werden sollte, hatte der Hersteller hier einen unüblichen Aufbau der Beschichtung gewählt. Zur Überbrückung der Ringfugen wurde ein Handlaminat eingesetzt. Bis auf diese undichten Ringfugen zeigte die Beschichtung keinerlei Auffälligkeiten.

Die Beschichtung Ultracoat zeigte bei Wasserdrücken über etwa 2 mWs Undichtigkeiten an der lokalen Schädigung (LS SU) und an der geschädigten Schachtringfuge 1 (SF 1, planmäßig nicht reprofilert). Blasen zeigten sich im unteren Schachtbereich bei einer weiteren Beschichtung (Eprocoat) in horizontaler und vertikaler Richtung. Die vertikale Blase führte hier unmittelbar zu Undichtigkeiten im Anschluss zum Gerinne. Die Beschichtungen mit Polyfill und Oldodur wiesen bei diesem Grundwasserstand nur geringe Auffälligkeiten bzw. Undichtigkeiten an einzelnen Steigbügel auf.

Tabelle 45 Polymere Beschichtungen: GW I - Kurzzeit

Schadstelle		Druck [mWs]	Autoschicht	Eprocoat	Oldodur	Polyfill	Ultracoat
„Lokale Schädigung“ (LS)	LS 7	entfällt	entfällt	entfällt	entfällt	entfällt	entfällt
	LS 5	entfällt	entfällt	entfällt	entfällt	entfällt	entfällt
	LS 3	0,9	Dp - D	Dp - D	Dp - D	Dp - D	Dp - D
	LS 1	1,9	Dp - D	Dp - D	Dp - D	Dp - D	Dp - D
	LS SU	2,4	Dp - D	Dp - D	Dp - D	Dp - D	Dp - U = 1 ml/s
„Schädigung Schachtringfuge“ (SF)	SF 7	entfällt	entfällt	entfällt	entfällt	entfällt	entfällt
	SF 5	entfällt	entfällt	entfällt	entfällt	entfällt	entfällt
	SF 4	0,7	Up ¹ - U ¹	Dp - D	Dp - D	Dp* - D*	Dp - D
	SF 3	1,2	Up ¹ - U ¹	Dp - D	Dp - D	Dp* - D*	Dp - D
	SF 2	1,7	Up ¹ - U ¹	Dp - D	Dp - D	Dp* - D*	Dp - D
	SF 1	2,2	Up ¹ - U ¹	Dp - D	Dp - D	Dp* - D*	Dp - U = 1 ml/s
„Flächige Undichtigkeit“ (FU)	FU 6	entfällt	entfällt	entfällt	entfällt	entfällt	entfällt
	FU 4	0,2	Dp - D	Dp - D	Dp - D	Dp - D	Dp - D
	FU 2	1,5	Dp - D	Up ² - D (beidseitige Blasenbildung)	Dp - D	Dp - F	Dp - D
Sonstiges:			1 = deutlicher Wassereindrang, nicht gemessen	2 = deutlicher Wassereindrang, nicht gemessen	Steigbügel SR3 undicht	entfällt	entfällt

Index „p“: Schachtseite vor der Untergrundvorbereitung mit Pflanzenfett präpariert

kein Index: Schachtseite vor der Untergrundvorbereitung nicht präpariert

U = Undicht; D = Dicht; F = Feuchtefahne; * etwa 5 mm tief reprofilert

Das Anheben des Grundwasserstandes im Rahmen des Beobachtungszeitraumes GW II – Kurzzeit ergab bei nahezu allen Beschichtungen eine Verschlechterung des Zustandes. So nahmen beispielsweise die gemessenen Infiltrationsmengen zu, Blasen vergrößerten sich und auch bis dahin unauffällige Beschichtungen wurden undicht oder weitere Feuchtefahnen traten auf (vgl. Tabelle 46).

Grundsätzlich gingen alle Undichtigkeiten von den provozierten Schadstellen aus. An Stellen ohne Vorschädigung konnten an nahezu keiner der Beschichtungen Undich-

tigkeiten oder Auffälligkeiten festgestellt werden. Eine Ausnahme bildete lediglich eine Undichtigkeit an einer Steigbügleinbindung.

Tabelle 46 Polymere Beschichtungen: GW II - Kurzzeit

Schadstelle		Druck [mWs]	Autoschicht	Eprocoat	Oldodur	Polyfill	Ultracoat
„Lokale Schädigung“ (LS)	LS 7	0,2	Dp - D	Dp - D	Dp - D	Dp - D	Dp - D
	LS 5	1,2	Dp - D	Dp - D	Dp - D	Dp - D	Dp - D
	LS 3	2,7	Dp - D	Dp - D	Dp - D	Dp - D	Dp - D
	LS 1	3,7	Dp - D	Dp - D	Dp - D	Dp - D	Dp - D
	LS SU	4,2	Dp - D	Dp - D	Dp - D	Dp - D	Dp - U = 2 ml/s
„Schädigung Schachtringfuge“ (SF)	SF 7	0,5	Up ¹ - U ¹	Dp - D	Up = 11 ml/s - D	Dp* - D*	Dp - D
	SF 5	1,5	Up ¹ - U ¹	Dp - D	Dp - D	Dp* - D*	Dp - D
	SF 4	2,5	Up ¹ - U ¹	Dp - D	Dp - D	Dp* - D*	Dp - D
	SF 3	3,0	Up ¹ - U ¹	Dp - D	Dp - D	Dp* - D*	Dp - D
	SF 2	3,5	Up ¹ - U ¹	Dp - D	Dp - D	Dp* - D*	Dp - D
	SF 1	4,0	Up ¹ - U ¹	Dp - D	Dp - D	Dp* - D*	Dp - U = 2 ml/s
„Flächige Undichtigkeit“ (FU)	FU 6	0,8	Dp - D	Dp - D	Dp - D	Dp - D	Dp - D
	FU 4	2,0	Dp - D	Dp - D	Dp - D	Dp - F	Dp - D
	FU 2	3,3	Dp - D	Up = 1800 ml/s - D	Dp - D	Dp - F	Dp - D
Sonstiges:			1 = deutlicher Wassereindrang, nicht gemessen	Vergrößerung der Blasen mit wachsendem Wassereindrang	Steigbügel SR3 undicht	entfällt	entfällt

Index „p“: Schachtseite vor der Untergrundvorbereitung mit Pflanzenfett präpariert
 kein Index: Schachtseite vor der Untergrundvorbereitung nicht präpariert
 U = Undicht; D = Dicht; F = Feuchtefahne; * etwa 5 mm tief reprofiliert

6.4.3 Langzeit-Wirkung

6.4.3.1 Rohranbindungen

Die abgedichteten Rohranbindungen wurden im Anschluss an die Kurzzeitbelastung für ca. 5 Monate mit der Grundwasserstufe II (GW II) beaufschlagt. Im Ergebnis blieben alle Rohranbindungen DN 300 dicht. Demgegenüber konnten an fast allen Rohreinbindungen DN 150 – egal ob für Kunststoff- oder Steinzeugrohr – Feuchtefahnen mit nicht abflussrelevanten Infiltrationen verzeichnet werden, so dass diese Abdichtungsmaßnahmen durchaus als erfolgreich angesehen werden können. Auffällig ist das durchgängig schlechtere Ergebnis bei der kleineren Nennweite DN 150. Eine mögliche Erklärung wird im Abschnitt 6.4.4 diskutiert. Die Ergebnisse der Abdichtungen und die zugehörigen Wasserdrücke sind Tabelle 47 zu entnehmen.

Tabelle 47 Abdichtung Rohreinbindungen: GW II - Langzeit

Material	Schädigung Rohreinbindung	GW II - Langzeit	
		Wasserdruck	Prüfergebnis
Zementleiminjektion (Saniert bei GW I)	DN 150, Steinzeug	2,1 mWs	Undicht
	DN 150, PVC		Undicht
	DN 300, Steinzeug	4,7 mWs	Dicht
	DN 300, PVC		Dicht
Gelinjektion (Saniert bei GW I)	DN 150, Steinzeug	2,1 mWs	Feuchtefahnen
	DN 150, PVC		Feuchtefahnen
	DN 300, Steinzeug	4,7 mWs	Dicht
	DN 300, PVC		Dicht
Harzinjektion (Saniert bei GW I)	DN 150, Steinzeug	2,1 mWs	Feuchtefahnen
	DN 150, PVC		Feuchtefahnen
	DN 300, Steinzeug	4,7 mWs	Dicht
	DN 300, PVC		Dicht
Gelinjektion (Saniert bei GW II)	DN 150, Steinzeug	2,1 mWs	Feuchtefahnen
	DN 150, PVC		Dicht
	DN 300, Steinzeug	4,7 mWs	Dicht
	DN 300, PVC		Dicht
Harzinjektion (Saniert bei GW II)	DN 150, Steinzeug	2,1 mWs	Feuchtefahnen
	DN 150, PVC		Feuchtefahnen
	DN 300, Steinzeug	4,7 mWs	Dicht
	DN 300, PVC		Dicht

6.4.3.2 Schachtkörper

Die Abdichtungen am Schachtkörper wurden im Anschluss an die Kurzzeitbelastung für ca. 5 Monate mit der Grundwasserstufe II (GW II) beaufschlagt. Die Ergebnisse für Zementleiminjektionen sowie Stopf- und Flächenmörtel, auch auf Silikatbasis, sind für die Beobachtungsphase GW II – Langzeit in Tabelle 48 dargestellt. Bei den exemplarisch mit Zementleiminjektion abgedichteten Stellen kam es lediglich an einem Packer zu Feuchtefahnen, welche jedoch keine abflusswirksame Infiltration zur Folge hatten. Ähnliche Feuchtefahnen stellten sich unabhängig von Fehlstellenart und Wasserdruck auch bei den Stopf- und Flächenmörteln ein. Hier war nun im Bereich der vorgeschädigten Schachtringfugen auch der Silikatmörtel betroffen, der hier im Zeitraum GW II – Kurzzeit noch keine Auffälligkeiten zeigte. Grund hierfür war vermutlich die nicht vollständig umlaufende Verfüllung der Schachtringfuge. So konnte es dort zu Hinterläufigkeiten kommen.

Tabelle 48 Abdichtung Schachtkörper – Teil 1: GW II - Langzeit

Schadstelle		Druck [mWs]	Zementleiminjektion	Stopf- und Flächenmörtel (mineralisch)	Stopf- und Flächenmörtel auf Schadstelle begrenzt (silikatisch)
			GW II - Langzeit	GW II - Langzeit	GW II - Langzeit
„Lokale Schädigung“ (LS)	LS 7	0,2	Nicht saniert	Dicht	Dicht
	LS 5	1,2		Feuchtefahren	Dicht
	LS 3	2,7		Feuchtefahren	Dicht
	LS 1	3,7		Dicht	Dicht
	LS SU	4,2		Dicht	Dicht
„Schädigung Schachtringfuge“ (SF)	SF 7	0,5	Dicht	entfällt	Feuchtefahren
	SF 5	1,5	Nicht saniert	Feuchtefahren	Feuchtefahren
	SF 4	2,5		entfällt	Dicht
	SF 3	3,0		Feuchtefahren	Dicht
	SF 2	3,5		entfällt	Feuchtefahren
	SF 1	4,0		Feuchtefahren	Feuchtefahren
„Flächige Undichtigkeit“ (FU)	FU 6	0,8		Dicht	Dicht
	FU 4	2,0	Nicht saniert	entfällt	Dicht
	FU 2	3,3		entfällt	Dicht
Undichte Schachtringfuge (SF 6)		1,0	Feuchtefahren am Packer	entfällt	entfällt

Die Ergebnisse für Harz- und Gelinjektionen sowie Mörtel mit Kristallbildnern, sind in Tabelle 49 dargestellt. Bei den Harzinjektionen wurden drei Varianten bezüglich der Vorabdichtung betrachtet. Sie wurden ohne und mit Vorabdichtungen mit Mörtel und PU-Schaum ausgeführt. Bei allen Varianten traten weitgehend unabhängig von Fehlstellenart und Wasserdruck Feuchtefahren mit nicht abflussrelevantem Wassereindrang auf, welche teilweise im Laufe des Beobachtungszeitraumes wieder abtrockneten. Bei den Gelinjektionen zeigten sich nur beim Schadensbild „lokale Schädigung“ keine Feuchtefahren. An allen anderen Schadstellen zeigten sich hingegen Feuchtefahren mit nicht abflussrelevantem Wassereindrang.

Tabelle 49 Abdichtung Schachtkörper – Teil 2: GW II - Langzeit

Schadstelle		Druck [mWs]	Harzinjektion			Gelinjektion	Mörtel mit Kristallbildner
			GW II - Langzeit			GW II - Langzeit	GW II - Langzeit
Vorabdichtung:			Ohne	Mörtel	PU-Schaum	-	Mörtel
„Lokale Schädigung“ (LS)	LS 7	0,2	D	entfällt	D	D	D
	LS 5	1,2	D	entfällt	D	D	D
	LS 3	2,7	D	entfällt	F => D	D	D
	LS 1	3,7	D	entfällt	D	D	D
	LS SU	4,2	F => D	entfällt	F => D	D	D
„Schädigung Schachtringfuge“ (SF)	SF 7	0,5	F	F	F => D	F	D
	SF 5	1,5	F	entfällt	F	F	D
	SF 4	2,5	F	F	D	D	D
	SF 3	3,0	F	entfällt	F	D	D
	SF 2	3,5	F	F	D	D	D
	SF 1	4,0	D	entfällt	D	D	D
„Flächige Undichtigkeit“ (FU)	FU 6	0,8	F	entfällt	D	D	D
	FU 4	2,0	F	F	F	F	D
	FU 2	3,3	F	F	F	F	D
Undichte Schachtringfuge (SF 6)	1,0	F	F	D	F	Ungleichmäßige Optik (helle und dunkle Stellen)	
Packer an SF 4	2,5	entfällt			U		

F = Feuchtfahnen; D = Dicht; U = Undicht

Der Mörtel mit Kristallbildnern zeigte auch im Beobachtungszeitraum GW II - Langzeit ein sehr gutes Abdichtungsergebnis. Jedoch ließ sich eine optisch recht ungleichmäßige Oberfläche erkennen. Hier bildeten sich dunkle Bereiche aus, wo zunächst feuchte Stellen vermutet wurden (Bild 166). Feuchtemessungen ergaben jedoch keine erhöhten Messwerte gegenüber den restlichen Bereichen.



Bild 166 Dunkle Stellen am Mörtel mit Kristallbildner: größere Ausdehnung sowie dunklere Verfärbung zu Beginn der Untersuchungen (links) und geringere Ausdehnung und farblich hellere Ausprägung nach 13 Wochen (rechts)

Abgesehen von den durch eine umlaufende Sanierung vermeidbaren Feuchtefahnen an den Schachtringverbindungen beim Silikatmörtel, waren dieser und der Mörtel mit Kristallbildnern auch im Betrachtungszeitraum GW II – Langzeit dicht. Bei allen anderen Materialien liegen jedoch Feuchtefahnen mit nicht messbarem bzw. nicht abflusswirksamem Wasserandrang vor.

6.4.3.3 Mörtelbeschichtungen

Die Ergebnisse für den Beobachtungszeitraum GW II – Langzeit sind Tabelle 50 zu entnehmen. Wie bei den Kurzzeitbetrachtungen konnten an den drei Beschichtungen mit Hohlstellen und Rissbildung an allen Schädigungen „Schachtringfuge“ und „flächige Undichtigkeit“ im Wesentlichen gleichbleibende Feuchtefahnen vermerkt werden. Bei den in der Kurzzeitbetrachtung mängelfreien Beschichtungen mit ombran MHP (ab 3,3 mWs) und SD 1 – W (ab 0,8 mWs) stellten sich Risse und Feuchtefahnen bei der Schädigung „flächige Undichtigkeit“ (FU) aus planmäßiger Verbundschwächung durch Trennmittel ein. Der Wassereindrang an diesen Feuchtefahnen war jedoch wiederum nicht messbar bzw. abflusswirksam. Zahlreiche Hohlstellen unterhalb des Wasserstandes konnten durch Abkopfen nicht lokalisiert werden. Vereinzelt konnten undichte Steigbügleinbindungen festgestellt werden.

An der Beschichtung mit Kanament konnten auch in diesem Betrachtungszeitraum keine Risse, Mängel oder Feuchtefahnen festgestellt werden.

Tabelle 50 Mörtelbeschichtungen: GW II - Langzeit

Schadstelle		Druck [mWs]	Ergelit KS 1 (händisch)	Ergelit KS 1 (KS-ASS)	KA 20	Kanament	ombran MHP	SD 1 - W
„Lokale Schädigung“ (LS)	LS 7	0,2	Dp - D	Dp - D	Dp - D	Dp - D	Dp - D	Dp - D
	LS 5	1,2	Dp - D	Dp - D	Dp - D	Dp - D	Dp - D	Dp - D
	LS 3	2,7	Dp - D	Dp - D	Dp - D	Dp - D	Dp - D	Dp - D
	LS 1	3,7	Dp - D	Dp - D	Dp - D	Dp - D	Dp - D	Dp - D
	LS SU	4,2	Dp - D	Dp - D	Dp - D	Dp - D	Dp - D	Dp - D
„Schädigung Schachtringfuge“ (SF)	SF 7	0,5	Fp - F	Fp - F	Fp - F	Dp - D	Dp - D	Dp* - D*
	SF 5	1,5	Fp - F	Fp - F	Fp - F	Dp - D	Dp - D	Dp* - D*
	SF 4	2,5	Fp - F	Fp - F	Fp - F	Dp - D	Dp - D	Dp* - D*
	SF 3	3,0	Fp - F	Fp - F	Fp - F	Dp - D	Dp - D	Dp* - D*
	SF 2	3,5	Fp - F	Fp - F	Fp - F	Dp - D	Dp - D	Dp* - D*
	SF 1	4,0	Fp - F	Fp - F	Fp - F	Dp - D	Dp - D	Dp* - D*
„Flächige Undichtigkeit“ (FU)	FU 6	0,8	Fp - F	Fp - F	Fp - F	Dp - D	Dp - D	Fp - F
	FU 4	2,0	Fp - F	Fp - F	Fp - F	Dp - D	Dp - D	Fp - F
	FU 2	3,3	Fp - F	Fp - F	Fp - F	Dp - D	Dp - F	Fp - F
Sonstiges:			entfällt	Feuchtefahnen an mehreren Steigbügeln	Feuchtefahnen an mehreren Steigbügeln	entfällt	Steigbügel in SR2 undicht	Steigbügel in SR2 undicht
			Zusätzliche Hohlstellen mit Rissen und Feuchtefahnen			entfällt	Rissbildung an den Feuchtefahnen	

Index „p“: Schachtseite vor der Untergrundvorbereitung mit Pflanzenfett präpariert
 kein Index: Schachtseite vor der Untergrundvorbereitung nicht präpariert
 U = Undicht; D = Dicht; F = Feuchtefahne; * etwa 5 mm tief reprofiliert

Insgesamt traten in dieser Beobachtungsphase kleinere Mängel in den Einbindungsbereichen von Steigbügeln auf. Die hier bei zwei weiteren Beschichtungen aufgetretenen Feuchtefahnen bewirkten lediglich einen Wasserandrang, welcher nicht messbar bzw. nicht abflusswirksam war. Eine Beschichtung blieb über den gesamten Beobachtungszeitraum ohne offensichtliche Mängel oder Fehlstellen, selbst an Stellen mit planmäßiger Verbundschwächung durch Trennmittel. In keinem Fall konnte der dauerhaft hohe Wasserdruck die Beschichtungen im Bereich von Hohlstellen zerstören. Hier wirkt sich vermutlich die besondere Tragwirkung der zylindrischen Schachtgeometrie positiv aus (s. a. Abschnitt 6.4.4). Die Haftzugfestigkeiten der Beschichtungen lagen im Mittel bei 0,88 N/mm². Die Auffälligkeiten entstanden relativ zeitnah nach der Beschichtung und weiteten sich dann nur noch geringfügig aus. Maßgebliche Veränderungen waren über die Versuchszeit nicht zu beobachten.

6.4.3.4 Polymere Beschichtungen

Tabelle 51 zeigt die Ergebnisse der Großversuche für den Beobachtungszeitraum GW II – Langzeit. Die Beschichtung mit Ultracoat zeigte hier die besten Ergebnisse mit dem geringsten Wassereindrang. Dieser trat an tiefliegenden Schadstellen „lokale

Schädigung“ LS 1 und „Schädigung Schachtringfuge“ SF 1 auf. Offensichtlich waren die Undichtigkeiten in diesen Bereichen auf einen ungleichmäßigen Materialauftrag zurückzuführen. Des Weiteren zeigte sich noch eine geringfügige Undichtigkeit an einer Steigbügleinbindung im Schachtring SR 5.

Die Kombination aus Beschichtung mit dem Material Autoschicht und dem Handlaminat zeigte im Beobachtungszeitraum GW II – Langzeit keine Verschlechterung des Zustandes. Allerdings waren alle „Schädigungen Schachtringfuge“ (SF) undicht. Inwieweit eine in situ üblicherweise eingesetzte Reprofilierung der Schachtringfugen derartige Undichtheiten ausschließt, konnte hier nicht geklärt werden. Im Übrigen waren keine Auffälligkeiten zu erkennen.

Die Beschichtung mit Oldodur zeigte auch in der Langzeitbetrachtung zunächst die Undichtigkeiten an der „Schädigung Schachtringfuge“ SF 7 und an einer Steigbügleinbindung im Schachtring SR 3. Inwieweit eine in situ üblicherweise eingesetzte Reprofilierung der Schachtringfugen derartige Undichtheiten ausschließt, konnte hier nicht geklärt werden. Nach acht Wochen im Beobachtungszeitraum GW II – Langzeit versagte die Beschichtung dann jedoch auch am Schaden „flächige Undichtigkeit“ FU 2 (planmäßige Verbundschwächung durch Trennmittel, Wasserdruck 3 mWs) schlagartig mit erheblichen Wassereinbrüchen. Im Übrigen waren keine Auffälligkeiten zu erkennen.

Bei der Beschichtung mit Polyfill traten im Beobachtungszeitraum GW II – Langzeit nach ca. 3 Wochen deutliche Undichtigkeiten und Ablösungen an den Schadstellen „flächige Undichtigkeit“ (FU) aus planmäßiger Verbundschwächung durch Trennmittel auf. Hier kam es zu Rissen in der Beschichtung mit Infiltrationsmengen von bis zu 120 ml/s.

Die Beschichtung mit Eprocoat zeigte bereits in den Kurzeitbetrachtungen deutliche Schwächen ausgehend von den beiden flächigen Undichtigkeiten FU 2 (planmäßige Verbundschwächung durch Trennmittel). Bereits nach einem Tag im Beobachtungszeitraum GW II – Langzeit musste der Schacht daher geflutet werden. Diese Beschichtung wies eine vergleichsweise geringe mittlere Haftzugfestigkeit von $0,78 \text{ N/mm}^2$ auf.

Tabelle 51 Polymere Beschichtungen: GW II - Langzeit

Schadstelle		Druck [mWs]	Autoschicht	Eprocoat	Oldodur	Polyfill	Ultracoat
„Lokale Schädigung“ (LS)	LS 7	0,2	Dp - D	Flutung des Schachtes nach 1 Tag	Dp - D	Dp - D	Dp - D
	LS 5	1,2	Dp - D		Dp - D	Dp - D	Dp - D
	LS 3	2,7	Dp - D		Dp - D	Dp - D	Dp - D
	LS 1	3,7	Dp - D		Dp - D	Dp - D	Dp - D
	LS SU	4,2	Dp - D		Dp - D	Dp - D	Dp - U = 3,6 ml/s
„Schädigung Schachtringfuge“ (SF)	SF 7	0,5	Up - U = Σ 30 ml/s		Up = 40 ml/s - D	Dp* - D*	Dp - D
	SF 5	1,5	Up - U = Σ 30 ml/s		Dp - D	Fp* - D*	Dp - D
	SF 4	2,5	Up ¹ - U ¹		Dp - D	Fp* - D*	Dp - D
	SF 3	3,0	Up ¹ - U ¹		Dp - D	Dp* - D*	Dp - D
	SF 2	3,5	Up ¹ - U ¹		Dp - D	Dp* - D*	Dp - D
	SF 1	4,0	Up ¹ - U ¹		Dp - D	Fp* - D*	Dp - U = 2,5 ml/s
„Flächige Undichtigkeit“ (FU)	FU 6	0,8	Dp - D		Dp - D	Dp - D	Dp - D
	FU 4	2,0	Dp - D		Dp - D	Fp - U = max. 120 ml/s	Dp - D
	FU 2	3,3	Dp - D	Dp - U = 800 ml/s	Fp - U = max. 86 ml/s => F => D	Dp - D	
Sonstiges:			1 = deutlicher Wassereindring, nicht gemessen	entfällt	Ablösung, Riss in der Beschichtung; Flutung nach 8 Wochen!	Steigbügel SR5 undicht; Ablösungen und Risse in der Beschichtung	Steigbügel SR5 undicht

Index „p“: Schachtseite vor der Untergrundvorbereitung mit Pflanzenfett präpariert
 kein Index: Schachtseite vor der Untergrundvorbereitung nicht präpariert
 U = Undicht; D = Dicht; F = Feuchtefahne; * etwa 5 mm tief reprofiliert

Der dauerhaft hohe Wasserdruck bewirkte im Bereich der Schadstellen „Flächige Undichtigkeit“ (FU) aus planmäßiger Verbundschwächung durch Trennmittel zum Teil fortschreitende Blasenbildungen und Materialablösungen. Hier wirkt sich vermutlich die geringe Eigensteifigkeit einiger polymerer Beschichtungssysteme negativ aus. Die Haftzugfestigkeiten der Beschichtungen lagen im Mittel bei 2,16 N/mm². Selbst hohe Haftzugfestigkeiten in Nachbarbereichen von Stellen mit planmäßiger Verbundschwächung durch Trennmittel konnten ein Ablösen der Beschichtung nicht unbedingt verhindern. Zahlreiche Auffälligkeiten entstanden erst mit großer Zeitverzögerung und breiteten sich dann recht zügig aus. Offensichtlich ist die Schadensentwicklung bei den polymeren Beschichtungen maßgeblich von der Dauer der Belastung abhängig. Bereiche ohne Verbund, insbesondere unter Grundwassereinfluss, ließen sich durch Abklopfen im Übrigen nur selten lokalisieren.

Abschließend ist zu betonen, dass Undichtigkeiten vornehmlich nur an den nicht reprofilierten Schachtringfugen SF und planmäßigen Verbundschwächungen durch Trennmittel (flächige Undichtigkeit, FU) auftraten. An den lokalen Schadstellen (LS) wurden nur in einem Fall Undichtigkeiten festgestellt. Allerdings zeigten zwei Beschichtungen Undichtigkeiten an Steigbügleinbindungen.

6.4.4 Gesamtergebnis

Abdichtung von Rohreinbindungen

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

Das schlechtere Ergebnis bei der kleineren Nennweite DN 150 ist vermutlich auf die im Vergleich zu den Einbindungen DN 300 deutlich kleineren zu injizierenden Ringräume zurückzuführen. Die Injektionspacker müssen hier in die Schachtwand gesetzt werden. Bild 167 verdeutlicht die Situation bei den unterschiedlichen Nennweiten. Während bei den Zuläufen mit kleineren Nennweiten (DN 150) einfach zylindrische Durchgänge vorlagen, fanden sich beim Anschluss der größeren Nennweite auch größere Ringräume mit abgestuften Durchgängen. Hier wäre zu hinterfragen, ob durch Erhöhung der Packer-Anzahl bei kleinerer Nennweite ggf. bessere Ergebnisse erzielt werden können.



Bild 167 Unterschiedliche Rohreinbindungen: Kleine Ringräume bei DN 150 (links) und größere Ringräume bei DN 300 (rechts)

Eine Zusammenfassung der Ergebnisse der Großversuche unter Außenwasserdruck ist Tabelle 52 zu entnehmen.

Tabelle 52 Großversuche unter Außenwasserdruck - Abdichtung Rohreinbindungen

Material	Schadstelle	GW I - Kurzzeit		GW II - Kurzzeit		GW II - Langzeit		
		Druck [mWs]	Prüfergebnis	Druck [mWs]	Prüfergebnis	Druck [mWs]	Prüfergebnis	
Zementleim-injektion (Saniert bei GW I)	DN 150, Steinzeug	0,3	Undicht	2,1	Undicht	2,1	Undicht	
	DN 150, PVC		Undicht		Undicht		Undicht	
	DN 300, Steinzeug	2,9	Dicht	4,7	Dicht	4,7	Dicht	
	DN 300, PVC		Dicht		Dicht		Dicht	
Gelinjektion (Saniert bei GW I)	DN 150, Steinzeug	0,3	Dicht	2,1	Dicht	2,1	Feuchtefahnen	
	DN 150, PVC		Dicht		Dicht		Feuchtefahnen	
	DN 300, Steinzeug	2,9	Dicht	4,7	Dicht	4,7	Dicht	
	DN 300, PVC		Dicht		Dicht		Dicht	
Harzinjektion (Saniert bei GW I)	DN 150, Steinzeug	0,3	Feuchtefahnen	2,1	Feuchtefahnen	2,1	Feuchtefahnen	
	DN 150, PVC		Feuchtefahnen		Feuchtefahnen		Feuchtefahnen	
	DN 300, Steinzeug	2,9	Dicht	4,7	Dicht	4,7	Dicht	
	DN 300, PVC		Dicht		Dicht		Dicht	
Gelinjektion (Saniert bei GW II)	DN 150, Steinzeug	entfällt		2,1	Dicht	2,1	Feuchtefahnen	
	DN 150, PVC				Dicht		Dicht	
	DN 300, Steinzeug			4,7	Dicht	4,7	Dicht	
	DN 300, PVC				Dicht		Dicht	
Harzinjektion (Saniert bei GW II)	DN 150, Steinzeug			2,1		Dicht	2,1	Feuchtefahnen
	DN 150, PVC					Dicht		Feuchtefahnen
	DN 300, Steinzeug			4,7		Dicht	4,7	Dicht
	DN 300, PVC					Dicht		Dicht

Abdichtung des Schachtkörpers

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

Harze und Gele zeigten im Großversuch unter mehrtägigem Außenwasserdruck eine gute Abdichtung der schadhaften Schächte. Sie eignen sich daher auch zur Vorbereitung von Beschichtungsmaßnahmen. Im Laufe der längeren Belastung mit Außenwasserdruck (ca. 5 Monate) zeigten sich jedoch bei fast allen Harzen und Gelen Feuchtefahnen (vgl. Tabelle 53).

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

Tabelle 53 Großversuche unter Außenwasserdruck - Abdichtung Schachtkörper (1)

Schadstelle		Druck [mWs]	Harzinjektion				Gelinjektion		Mörtel mit Kristallbildner	
			GW II - Kurzzeit	GW II - Langzeit			GW II - Kurzzeit	GW II - Langzeit	GW II - Kurzzeit	GW II - Langzeit
Vorabdichtung:			Alle	Ohne	Mörtel	PU-Schaum	keine	keine	keine	
„Lokale Schädigung“ (LS)	LS 7	0,2	D	D	entfällt	D	D	D	D	D
	LS 5	1,2	D	D	entfällt	D	D	D	D	D
	LS 3	2,7	D	D	entfällt	F => D	D	D	D	D
	LS 1	3,7	D	D	entfällt	D	D	D	D	D
	LS SU	4,2	D	F => D	entfällt	F => D	D	D	D	D
„Schädigung Schachtringfuge“ (SF)	SF 7	0,5	D	F	F	F => D	D	F	D	D
	SF 5	1,5	D	F	entfällt	F	D	F	D	D
	SF 4	2,5	D	F	F	D	D	D	D	D
	SF 3	3,0	D	F	entfällt	F	D	D	D	D
	SF 2	3,5	D	F	F	D	D	D	D	D
	SF 1	4,0	D	D	entfällt	D	D	D	D	D
„Flächige Undichtigkeit“ (FU)	FU 6	0,8	D	F	entfällt	D	D	D	D	D
	FU 4	2,0	D	F	F	F	D	F	D	D
	FU 2	3,3	D	F	F	F	D	F	D	D
Undichte Schachtringfuge (SF 6)		1,0	D	F	F	D	D	F	Ungleichmäßige Optik (helle und dunkle Stellen)	
Packer an SF 4		2,5						U		

F = Feuchtefahnen; D = Dicht; U = Undicht

Bei den Stopf- und Flächenmörteln traten unabhängig von der Art der Fehlstelle und vom anstehenden Wasserdruck Feuchtefahnen auf (vgl. Tabelle 54). Diese müssen insbesondere bei im Anschluss aufgebrauchten Beschichtungen kritisch bewertet werden. Auch wenn der Wassereindrang an diesen Feuchtefahnen nicht messbar bzw. abflusswirksam ist, so liegt doch drückendes Wasser hinter der Beschichtung, welches den Abbinde- bzw. Aushärtvorgang beeinflussen und somit auch den Haftverbund stören kann. Der Einsatz von Stopf- und Flächenmörteln empfiehlt sich demnach vorwiegend für eine Erstabdichtung gegenüber starkem Wasserzustrom, z.B. zur Vorbereitung einer weiterführenden Injektionsmaßnahme.

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

Tabelle 54 Großversuche unter Außenwasserdruck - Abdichtung Schachtkörper (2)

Schadstelle		Druck [mWs]	Zementleiminjektion		Stopf- und Flächenmörtel (mineralisch)		Stopf- und Flächenmörtel auf Schadstelle begrenzt (silikatisch)	
			GW II - Kurzzeit	GW II - Langzeit	GW II - Kurzzeit	GW II - Langzeit	GW II - Kurzzeit	GW II - Langzeit
„Lokale Schädigung“ (LS)	LS 7	0,2	Nicht saniert		Dicht	Dicht	Dicht	Dicht
	LS 5	1,2			Feuchtefahnen	Feuchtefahnen	Dicht	Dicht
	LS 3	2,7			Dicht	Feuchtefahnen	Dicht	Dicht
	LS 1	3,7			Dicht	Dicht	Dicht	Dicht
	LS SU	4,2			Dicht	Dicht	Dicht	Dicht
„Schädigung Schachtringfuge“ (SF)	SF 7	0,5	Dicht	Dicht	Feuchtefahnen	entfällt	Dicht	Feuchtefahnen
	SF 5	1,5	Nicht saniert		Dicht	Feuchtefahnen	Dicht	Feuchtefahnen
	SF 4	2,5			Feuchtefahnen	entfällt	Dicht	Dicht
	SF 3	3,0			Dicht	Feuchtefahnen	Dicht	Dicht
	SF 2	3,5			Feuchtefahnen	entfällt	Dicht	Feuchtefahnen
	SF 1	4,0			Feuchtefahnen	Feuchtefahnen	Dicht	Feuchtefahnen
„Flächige Undichtigkeit“ (FU)	FU 6	0,8	Dicht	Dicht	Dicht	Dicht	Dicht	Dicht
	FU 4	2,0	Nicht saniert		Feuchtefahnen	entfällt	Dicht	Dicht
	FU 2	3,3			Feuchtefahnen	entfällt	Dicht	Dicht
Unplanmäßig Undichte Schachtringfuge (SF 6)		1,0	Dicht	Feuchtefahnen am Packer	Feuchtefahnen	Dicht	entfällt	

Mörtelbeschichtungen

Insgesamt lieferten die eingesetzten Mörtelbeschichtungen in den durchgeführten Großversuchen ein durchaus zufriedenstellendes Ergebnis. Sie zeigten zwar vielfach optische Mängel, jedoch bestand auch an Hohlstellen oder im Bereich von Rissen kaum Infiltrationsgefahr. Bei etwa der Hälfte der mineralischen Beschichtungen zeigten sich, unabhängig von der Art der Nachbehandlung, Risse und Feuchtefahnen an der Schachtwand, allerdings keine Undichtigkeiten mit messbarem Wasserzufluss. Dies galt auch für die Stellen, an denen der Verbund mit Trennmittel planmäßig geschwächt wurde (Bild 168). Das Trennmittel wurde durch das IKT an diesen Stellen vor der Beschichtung aufgetragen, um erste Hinweise zur „Robustheit“ des Sanierungssystems gegenüber unplanmäßigen Verbundschwächen zu erfassen, wie sie in der Praxis bei fehlender Untergrundvorbehandlung auftreten können.



Bild 168 Mineralische Beschichtung im Bereich, an dem der Verbund mit Trennmittel planmäßig geschwächt wurde: Rissbildung in Verbindung mit Feuchtefahren

Eine Beschichtung blieb über den gesamten Beobachtungszeitraum ohne offensichtliche Mängel oder Fehlstellen. Selbst der dauerhaft hohe Wasserdruck konnte keine der Beschichtungen im Bereich von Hohlstellen mit planmäßiger Verbundschwächung durch Trennmittel zerstören. Dies wurde auf die geometrischen Verhältnisse zurückgeführt, d.h. die große Wanddicke und damit Steifigkeit sowie die stabilisierende zylindrische Form der Beschichtung. In Anlehnung an die Kesselformel (vgl. [47]), welche mechanische Spannungen in durch Innendruck belasteten rotations-symmetrischen Körpern unabhängig von Materialeigenschaften angibt, wurden überschlägige Berechnungen zur Druckspannungsbelastung der Beschichtungen infolge Außenwasserdruck durchgeführt (Tabelle 55).

Tabelle 55 Druckspannung im Beschichtungsmörtel infolge Wasserdruck

Schacht-durchmesser	Beschichtungs-dicke	Wasserdruck		Resultierende
		[mWs]	[N/mm ²]	Druckspannung
[mm]	[mm]			[N/mm ²]
1000	15	1	0,01	0,33
		2	0,02	0,67
		3	0,03	1,00
		4	0,04	1,33
		5	0,05	1,67

Grundlage für die Berechnungen war ein Schachtdurchmesser von einem Meter und eine Beschichtungsdicke von 15 mm. Aufgrund des hohen Elastizitätsmoduls in Verbindung mit den vorherrschenden Wanddicken kann ein Einbeulen der Beschichtung ausgeschlossen werden. Unter diesen Randbedingungen erzeugt selbst ein Wasserstand von fünf Metern über der Schadstelle lediglich Druckspannungen im Beschichtungsmörtel von etwa 1,7 N/mm². Dieser Wert liegt deutlich unterhalb der tatsächlichen Druckfestigkeit der Mörtel, welche in der Regel über 20 N/mm² liegen.

Die in den Großversuchen im Maßstab 1:1 untersuchten Mörtelbeschichtungen wiesen mittlere Haftzugfestigkeiten im Bereich von 0,5 bis 1,3 N/mm² auf. Bei ver-

gleichsweise geringen Werten wurden zwar verstärkt Rissbildungen und Feuchtefahnen beobachtet, jedoch mit geringen Auswirkungen auf die Dichtwirkung – selbst an Hohlstellen. Grundsätzlich ist auch bei Mörtelbeschichtungen ein vollflächiger Verbund anzustreben, da Hohlstellen Risikopotenziale bezüglich Korrosionsbeständigkeit und auch Schlagfestigkeit bergen. Eine begrenzte Anzahl kleinerer Hohlstellen im Bereich der in den Großversuchen provozierten Größe von etwa 25 x 25 cm können jedoch in Abhängigkeit des Sanierungsziels und der vorliegenden Randbedingungen möglicherweise toleriert werden.

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

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

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

Polymere Beschichtungen

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

Der dauerhaft hohe Wasserdruck bewirkte jedoch in den Bereichen, an denen der Verbund mit Trennmittel planmäßig geschwächt wurde (vgl. Abschnitt 6.1), zum Teil fortschreitende Blasenbildungen mit Materialablösungen (vgl. Bild 169, links) bzw. ein Aufreißen der Beschichtung (Bild 169, rechts). Hier wirkt sich vermutlich die geringe Eigensteifigkeit einiger polymerer Beschichtungssysteme negativ aus.

Die Haftzugfestigkeiten der Beschichtungen lagen im Mittel bei 2,16 N/mm². Selbst hohe Haftzugfestigkeiten in Nachbarbereichen von Stellen mit planmäßiger Verbundschwächung durch Trennmittel konnten allerdings ein Ablösen der Beschichtung nicht

unbedingt verhindern. Demgegenüber konnten die planmäßig eingebauten lokalen Schadstellen (LS) auch von den polymeren Beschichtungen problemlos überbrückt werden. Offensichtlich spielt die Hohlstellengröße eine wesentliche Rolle.



Bild 169 Polymere Beschichtungen in Bereichen, an denen der Verbund mit Trennmittel planmäßig geschwächt wurde: Blasenbildung mit fortschreitender Ablösung (links) und Aufreißen der Beschichtung (rechts)

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

Bild 170 zeigt den Belastungszustand einer wassergefüllten Blase in der Ebene nach [31]. Im Randbereich dieser Blase treten Schälspannungen auf, deren Größe offensichtlich von der Größe der Blase abhängt. Weiteren Einfluss auf diese Spannungen hat jedoch auch deren Verteilung im Ablösebereich, welche wesentlich von den Verbundeigenschaften und den Materialkennwerten der Beschichtung abhängt. Aufgrund der Vielfalt der material- und haftungsbezogenen Einflussparameter wird hier lediglich ein möglicher Berechnungsweg aufgezeigt und exemplarisch verfolgt.

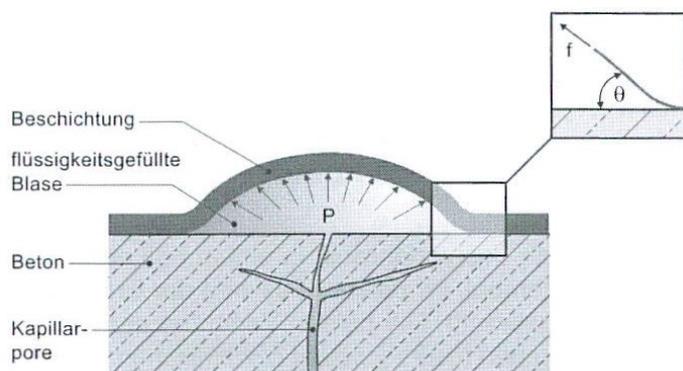


Bild 170 Schematische Darstellung der Schälspannung am Rand einer Blase in einer Beschichtung auf Beton [31]

In [31] wurden für eine 2 mm dicke Kunststoffbeschichtung Berechnungen durchgeführt, um die Bedingungen am Rand einer Blase näher zu spezifizieren. In diesem

Beispiel fiel die Spannung vom Maximalwert über einen Bereich von etwa 1,5 mm auf Null ab. Dieser Wert und die qualitative Verteilung der Spannung im Randbereich sind von zahlreichen Faktoren und Materialeigenschaften abhängig.

Zur Verdeutlichung wesentlicher Zusammenhänge wird hier exemplarisch für die nun folgenden Betrachtungen eine dreiecksförmige Spannungsverteilung bei einer Ausdehnung des Randbereiches von 2 mm angenommen. Des Weiteren wird eine Blase mit einem Durchmesser von 200 mm gewählt, welche beispielsweise durch unzureichende Untergrundvorbereitung entstanden sein könnte. Der Wasserstand wird zwischen 1 und 5 Metern variiert. Tabelle 56 zeigt die Ergebnisse dieser Berechnungen.

Tabelle 56 Maximale Randspannung in Abhängigkeit vom Wasserdruck

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

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

- **Überschreiten der vorhandenen Haftzugfestigkeit:**
Ab einem bestimmten Wasserstand kann die tatsächlich vorhandene Haftzugfestigkeit im Randbereich der Blase überschritten werden. Dies hat wiederum eine Kettenreaktion zur Folge, da durch die Vergrößerung der Blase auch die maximalen Randspannungen ansteigen (vgl. Bild 169, links). Darüber hinaus verliert das System in Kreisringrichtung an Stabilität (Durchschlagproblem).
- **Überschreiten der Materialzugfestigkeit:**
Sofern die vorhandenen Haftzugfestigkeiten ausreichen, die maximalen Randspannungen zu übertragen, so kann es im Beschichtungsmaterial selbst zu einem Versagen infolge des Überschreitens der Zugfestigkeit kommen.
- **Zeitabhängiges Versagen infolge Dauerbelastung:**
Die vorgenannten Effekte können sich bei polymeren Beschichtungen überlagern und zudem aufgrund des viskoelastischen Verhaltens der eingesetzten Werkstoffe auch zeitverzögert eintreten. Beispielsweise löste sich in den Großversuchen eine Beschichtung erst nach mehrwöchiger Außenwasserdruckbelastung ausgehend von der vorhandenen Hohlstelle weiter ab, um dann schließlich bei Überschreiten der Zugfestigkeit einzureißen (vgl. Bild 169, rechts).

Für den Fall des Überschreitens der vorhandenen Haftzugfestigkeit lassen sich weiterführende Berechnungen unter den oben genannten Annahmen durchführen. Ziel dieser Berechnungen war die Ermittlung des qualitativen Verlaufs des maximalen

Hohlstellendurchmessers in Abhängigkeit des Wasserdruckes unter Berücksichtigung der vorhandenen Haftzugfestigkeit. Im Ergebnis konnten exemplarisch mithilfe einer Grenzwertbetrachtung zulässige Hohlstellendurchmesser ermittelt werden (vgl. Bild 171). Wenn die zugehörigen Parameter, wie z. B. Materialkennwerte, Ablöseigenschaften und geometrische Eckdaten bekannt sind, könnte die Bewertung von vorhandenen Hohlstellen anhand solcher materialabhängiger Diagramme deutlich vereinfacht werden.

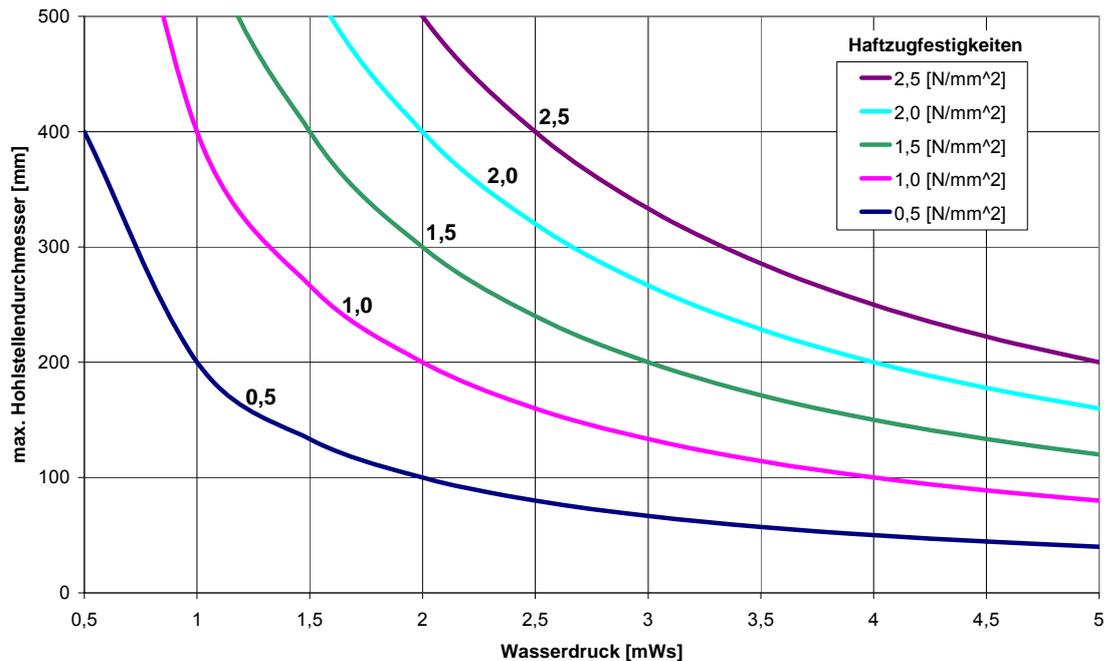


Bild 171 Beispiel: Entwicklung des maximalen Hohlstellendurchmessers in Abhängigkeit des Wasserdruckes unter Berücksichtigung der vorhandenen Haftzugfestigkeit;
 Voraussetzung/Annahme: Ablösebereich 2 mm, dreiecksförmige Schälspannung, kein Stabilitätsversagen

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

Grundsätzlich ist aufgrund der zeitabhängigen Belastungen und Materialeigenschaften eine verstärkte Untersuchung dieser Beschichtungen im Zuge der Gewährleistungsabnahme zu empfehlen. Auch ist ein vollflächiger Verbund mindestens ebenso wichtig wie hohe Haftzugwerte. Auch Werte von mehr als 1,5 N/mm² schützten nicht vor einer Ausweitung bereits vorhandener Blasen bzw. Ablösungen. Bei vollflächigem Verbund hingegen wurden in den Großversuchen keine Schäden beobachtet.

7 Spezielle Fragestellungen

7.1 Untersuchungsprogramm

Begleitend zu den Großversuchen sollten ergänzende Laboruntersuchungen Antworten auf spezielle Fragestellungen geben (vgl. Abschnitt 3).

Auf Baustellen kann man häufig beobachten, dass die **Wasserzugabe bei mineralischen Beschichtungen** nicht immer den Herstellervorgaben entspricht. Daher wurde an Beschichtungsmörteln die Robustheit der Materialien bei unterschiedlich eingestellten Wasser-Feststoffwerten bezüglich der Haftzugfestigkeiten untersucht.

Weitgehend unerforscht sind die Auswirkungen von **Hohlstellen bei mineralischen Beschichtungen** in Abwasserschächten bezüglich Rissbildung und Dichtheit. Daher wurden Untersuchungen an planmäßig eingebauten Hohlstellen unter Wasseraußendruck durchgeführt.

Mit Blick auf die Mörtelhydratation wurden verschiedene **Nachbehandlungsmittel bei mineralischen Beschichtungen** in einer Klimakammer auf ihre Wirksamkeit hin untersucht.

Die **Hohlstellenortung an Mörtelbeschichtungen** in Abwasserschächten bereitet immer wieder Probleme. Sie erfordert viel Erfahrung und Fingerspitzengefühl. Daher wurde im Rahmen des Projektes untersucht, ob Größe und Ausdehnung von Hohlstellen auch mit zerstörungsfreien Prüfungsverfahren wie der lokalen Resonanzspektroskopie ermittelt werden können.

Eine weitere offene Fragestellung war die Ermittlung des Einflusses von **Betriebsbelastungen an sanierten Rohreinbindungen**. Geprüft wurden hier die Auswirkungen von Abwinkelungen und Kanalreinigungsmaßnahmen auf die Dichtheit von sanierten Rohreinbindungen.

Schließlich wurden in **Wirtschaftlichkeitsbetrachtungen** die Kosteneinflüsse bei Schachtbeschichtungs- und -erneuerungsmaßnahmen einander gegenübergestellt.

7.2 Wasserzugabe bei mineralischen Beschichtungen

7.2.1 Veranlassung

Bei der Abwasserschachtsanierung liegen für den festen Beschichtungsmörtel Anforderungen bezüglich der Haftzugfestigkeit vor (vgl. Abschnitt 4.3.2.1). In-situ-Prüfungen des IKT haben jedoch gezeigt, dass diese Anforderungen in deutlich über 50 % der Fälle nicht erfüllt werden [48]. Darüber hinaus konnte im Rahmen der Sanierungen im Vorfeld dieser Prüfungen festgestellt werden, dass beim Anmischen des Mörtels durch die jeweilige Sanierungsfirma nur selten der vom Mörtelhersteller vorgegebene Wasser-Feststoff-Wert (W/F-Wert) eingehalten wird. Die Wasserzugabe beim Anmischen des Beschichtungsmörtels erfolgt überwiegend durch Augenmaß. Diese in der Praxis offensichtlich gängige Vorgehensweise konnte durch Bau-

stellenbegleitungen häufig bestätigt werden. Die zulässige Wassermenge zur Herstellung des Frischmörtels ist in den Technischen Merkblättern der Beschichtungsmörtel angegeben. Bei Nichtbeachtung des Technischen Merkblatts und Verzicht auf technische Hilfsmittel wie z.B. einer Waage kann auf der Baustelle das Anmischen des Mörtels mit zulässigem W/F-Wert nicht garantiert werden.

Dieser Wert ist jedoch vom Mörtelhersteller optimiert und besitzt nur einen geringen Spielraum. So kann die zulässige Spanne des W/F-Wertes gerade einmal ein Prozent betragen. Bei einem auf der Baustelle üblicherweise verwendeten 25 kg Gebinde Trockenmörtel kann eine abweichende Wasserzugabe von nur 250 ml bereits den W/F-Wert deutlich verändern. Im Ergebnis kann dieser sodann außerhalb des vom Hersteller vorgegebenen Bereichs liegen (vgl. Tabelle 57). Somit ist anzunehmen, dass der auf der Baustelle produzierte Frischmörtel in vielen Fällen nicht dem vom Hersteller geforderten W/F-Wert entspricht.

Gemäß dem DWA Merkblatt M 143-17 [29] ist die Einhaltung des W/F-Wertes nach Herstellerangaben eine grundlegende Anforderung an den Frischmörtel zur Abwasserschachtsanierung. Zudem ist bekannt, dass ein zu hoher bzw. zu geringer W/F-Wert die physikalischen Eigenschaften von zementgebundenen Werkstoffen erheblich beeinflussen kann (siehe Abschnitt 4.3.2.4).

Das Ziel einer diesbezüglich durchgeführten Untersuchung [49] war es, den Zusammenhang zwischen Haftzugfestigkeit und W/F-Wert des erhärteten Beschichtungsmörtels darzustellen. Das Untersuchungsergebnis sollte aufzeigen, ob und in welchem Ausmaß die Haftzugfestigkeit von Beschichtungsmörteln, die üblicherweise im Abwasserbereich eingesetzt werden, auf genormten Betongrundkörpern durch den W/F-Wert beeinflusst wird.

7.2.2 Versuchsprogramm

Es wurden Mörtel von drei verschiedenen Herstellern verwendet. Von jedem Mörtel wurden jeweils fünf Normbetonplatten mit unterschiedlich eingestellten W/F-Werten beschichtet, so dass insgesamt 15 Probekörper untersucht wurden. Im gesamten Beschichtungsprozess stellte die Wasserzugabemasse die einzige variable Größe dar. Die Normplattenbeschichtung wurde von Hand unter Laborbedingungen in der Versuchshalle des IKT durchgeführt. Der Applikationsvorgang war bei allen Platten identisch und die Beschichtungsdicke betrug etwa 10 mm (vgl. [10]). Nach 28 Tagen wurden Haftzugprüfungen durchgeführt, um den Einfluss des W/F-Wertes auf diese zu ermitteln. Es wurden sowohl mit den technischen Merkblättern konforme wie auch abweichende W/F-Werte geprüft. Tabelle 57 zeigt die W/F-Werte aus den technischen Merkblättern der untersuchten Mörtel, die nachfolgend als Mörtel A, Mörtel B und Mörtel C bezeichnet werden.

Tabelle 57 Zulässige W/F-Werte aus den technischen Merkblättern der untersuchten Beschichtungsmörtel

Beschichtungsmörtel	[-]	A	B	C
Zulässiger W/F-Wert	[%]	10,0 - 11,0	13,6 - 14,4	12,0 - 17,0

Zur Prüfung wurden zunächst die minimalen, mittleren und maximalen W/F-Werte der jeweiligen technischen Merkblätter ausgewählt. Darüber hinaus wurden von diesen Merkblättern abweichende W/F-Werte eingestellt. Diese sollten zum einen den Praxisfall mit einer Wasserzugabe durch Augenmaß simulieren, durch welche der Beschichtungsmörtel auf der Baustelle eine plastisch-steife Konsistenz erhält [48]. Zum anderen soll - ausgehend von dieser Konsistenz - der W/Z-Wert weiter erhöht werden, um die Auswirkungen auf die Konsistenz infolge weiterer Wasserzugabe zu verdeutlichen. Zur Festlegung dieser W/F-Werte wurden die Konsistenzen der Versuchsmörtel durch die Bestimmung des Ausbreitmaßes untersucht. Diese Voruntersuchungen zeigten, dass sich die Konsistenzen der einzelnen Mörtel bei Wasserzugabemengen gemäß den technischen Merkblättern erkennbar unterscheiden. So weisen Mörtel A und Mörtel B bei einer Wasserzugabemenge gemäß Herstellervorgaben eine steife und schwer zu verarbeitende Konsistenz auf. Bei einer zusätzlichen Wasserzugabe von einem Prozent erreichen sie den plastischen bzw. steifplastischen Konsistenzbereich, welcher eine gute Verarbeitbarkeit zur Beschichtung gewährleistet. Schon bei zwei Prozent überschüssiger Wassermenge wechseln diese Mörtel in den plastisch-weichen Bereich.

Mörtel C deckt durch seine im technischen Merkblatt vorgegebenen W/F-Werte den gesamten Konsistenzbereich von weich bis steif ab. Ein vom technischen Merkblatt abweichender W/F-Wert ist hier, aufgrund zu steifer bzw. zu weicher Konsistenzen, nicht mehr verarbeitbar. Somit wurden hier ausschließlich mit den Herstellervorgaben konforme Werte geprüft. Es wurden jedoch Abweichungen von einem Prozent zum Mittelwert des Technischen Merkblatts nach oben bzw. nach unten eingestellt. Dabei hat der Mörtel bei einem Prozent weniger Wasser eine steife, und bei einem Prozent zusätzlicher Wassermenge eine plastisch-weiche Konsistenz.

Aus diesen Untersuchungen ergaben sich für jeden der drei Beschichtungsmörtel fünf unterschiedliche Wassergehalte. Die W/F-Werte sowie zugehörige Ausbreitmaße und Mörtelkonsistenzen sind Tabelle 58 zu entnehmen.

Tabelle 58 Ausbreitmaß [42] und Konsistenz [43] in Abhängigkeit der eingestellten W/F-Werte der Beschichtungsmörtel

Probekörper	W/F-Wert		Ausbreitmaß	Mörtelkonsistenz	
	[-]	[%]			Wasserzugabe
A1		10,0	Minimalwert TM ¹	9,8	steif
A2		10,5	Mittelwert TM ¹	11,3	steif
A3		11,0	Maximalwert TM ¹	12,5	steif
A4		12,0	Maximalwert TM ¹ + 1 % Wasser ²	15,8	plastisch
A5		13,0	Maximalwert TM ¹ + 2 % Wasser ³	18,8	plastisch
B1		13,6	Minimalwert TM ¹	14,8	plastisch
B2		14,0	Mittelwert TM ¹	15,0	plastisch
B3		14,4	Maximalwert TM ¹	18,3	plastisch
B4		15,4	Maximalwert TM ¹ + 1 % Wasser ²	21,3	weich
B5		16,4	Maximalwert TM ¹ + 2 % Wasser ³	24,5	weich
C1		12,0	Minimalwert TM ¹	9,4	steif
C2		14,5	Mittelwert TM ¹	15,5	plastisch
C3		17,0	Maximalwert TM ¹	23,2	weich
C4		13,5	Mittelwert TM ¹ - 1 % Wasser ²	13,1	steif
C5		15,5	Mittelwert TM ¹ + 1 % Wasser ³	19,8	plastisch

¹ TM: Technisches Merkblatt ² Praxisnahe Mörtelkonsistenz, gut verarbeitbarer Mörtel

³ Konsistenzwechsel in den plastisch-weichen Bereich

Die Anfertigung der Probekörper erfolgte in Abstimmung mit den Mörtelherstellern. Das Anmischen und Auftragen der Beschichtungsmörtel wurde nach den Vorgaben der jeweiligen technischen Merkblätter durchgeführt. Die materialgleichen Beschichtungen auf den Probekörper unterschieden sich somit nur im W/F-Wert.

Es kamen Betongrundkörper gemäß DIN EN 1766 [50] mit einer Breite und Länge von jeweils 300 mm und einer Höhe von 100 mm zum Einsatz (vgl. Bild 172).



Bild 172 Betongrundkörper gemäß DIN EN 1766 [50]

Die Normbetonplatte wurde vor der Beschichtung für mindestens 24 Stunden in Wasser gelagert. Unter Berücksichtigung der technischen Merkblätter wurde gegebenenfalls eine Haftbrücke in den Untergrund eingearbeitet. Sodann erfolgte die Mörtelbeschichtung der Normbetonplatten mittels Kelle und Stahlglätter. Zur Nachbehandlung wurden die Probekörper bis zu ihrer Prüfung in verschlossenen Kunststoffsäcken unter Zugabe eines feuchten Stofflappens eingelagert.

7.2.3 Prüfergebnisse

Die Haftzugfestigkeit wurde 28 Tage nach der Beschichtung der Platten geprüft. Vor dieser Prüfung wurden die Probekörper nach optischen Auffälligkeiten wie z. B. Rissen untersucht. An jedem Probekörper wurden fünf Einzelprüfungen durchgeführt. Die Anordnung der Prüfstellen auf dem Probekörper gemäß [51] verdeutlicht (vgl. Bild 173).

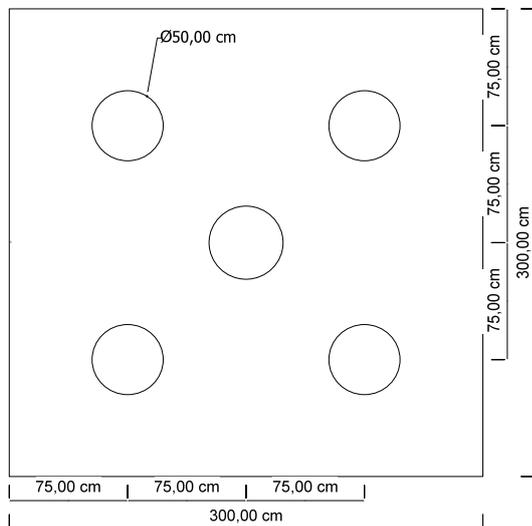


Bild 173 Probekörper für die Haftzugprüfung: Lage der Prüfstellen gemäß [51] (links) und Probekörper A1 nach der Prüfung (rechts)

Bei Mörtel A wurden die Anforderungen an die Haftzugfestigkeit durch die Probekörper mit W/F-Werten gemäß dem technischen Merkblatt erfüllt. Lagen die W/F-Werte über den zulässigen Werten nach Herstellerangabe, so erfüllten sie diese Anforderungen teilweise nicht (vgl. Bild 174).

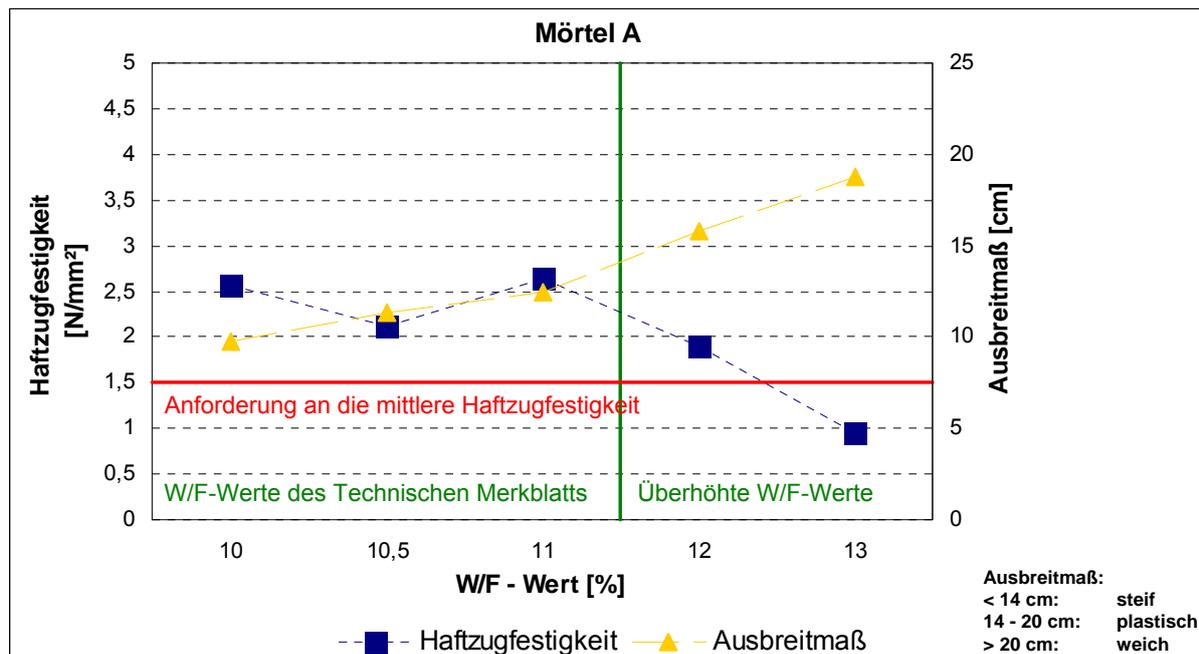


Bild 174 Mörtel A: Mittelwerte der Haftzugfestigkeit und Ausbreitmaße in Abhängigkeit zum W/F-Wert

Es ist deutlich zu erkennen, dass die Haftzugfestigkeit mit steigendem Wasseranteil und Ausbreitmaß des Frischmörtels abfällt. Diese Minderung der Haftzugfestigkeit setzt ein, wenn die Wasserzugabe den W/F-Bereich des technischen Merkblatts überschreitet. Während das Ausbreitmaß des Frischmörtels steigt, sinkt die Haftzugfestigkeit des erhärteten Mörtels bis unter den geforderten Mittelwert. Innerhalb des zulässigen Wasserzugabebereichs weist die Haftzugfestigkeit ein vergleichsweise konstantes Niveau im Bereich von 2,1 bis 2,6 N/mm² im Mittel auf und erfüllt somit die Anforderungen, auch hinsichtlich der kleinsten Einzelwerte.

Bei Mörtel B erfüllten sowohl die Probekörper mit W/F-Werten gemäß dem technischen Merkblatt, als auch die Probekörper mit überhöhten W/F-Werten die Anforderungen an die Haftzugfestigkeit von im Mittel 1,5 N/mm² und mit kleinsten Einzelwerten von 1,0 N/mm² (vgl. Bild 175).

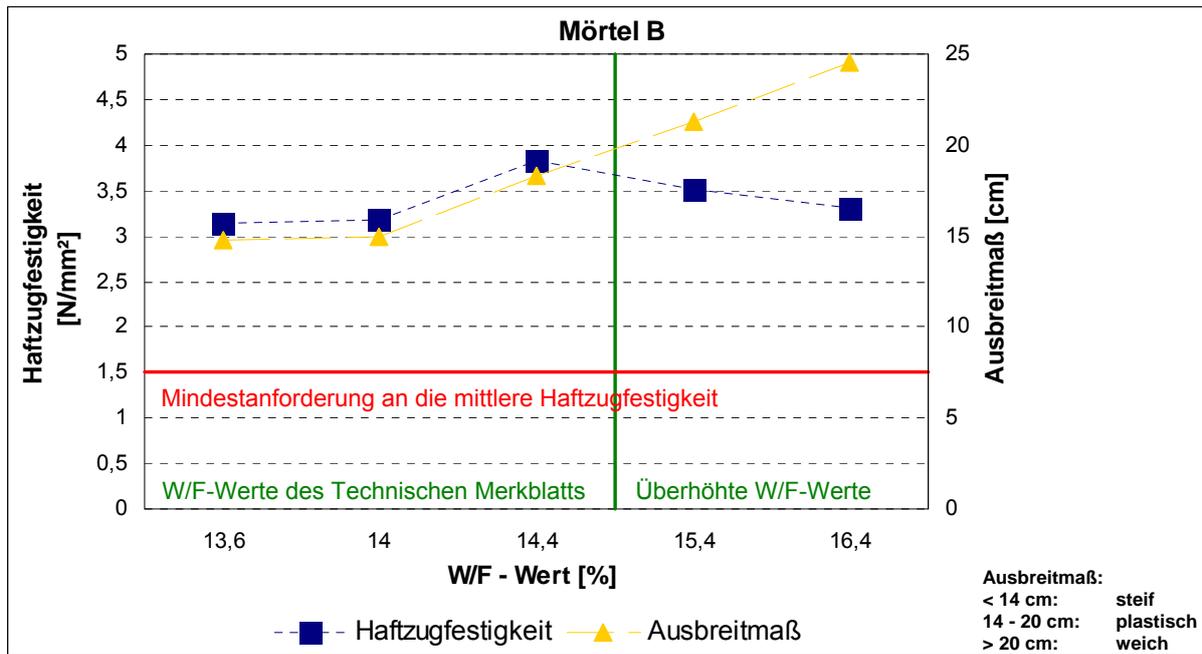


Bild 175 Mörtel B: Mittelwerte der Haftzugfestigkeit und Ausbreitmaße in Abhängigkeit zum W/F-Wert

Es ist zu erkennen, dass die Haftzugfestigkeit im zulässigen W/F-Bereich des technischen Merkblatts mit zunehmender Wasserzugabemenge nahezu parallel zum Ausbreitmaß ansteigt. Sobald die Wasserzugabemenge diesen Bereich überschreitet, fällt die Haftzugfestigkeit geringfügig ab. Die überhöhte Wasserzugabemenge mindert die Haftzugfestigkeit des Beschichtungsmörtels nur gegenüber dem maximalen W/F-Wert des Technischen Merkblatts. Die Haftzugfestigkeit ist bei zwei Prozent überschüssiger Wassermenge mit 3,3 N/mm² immer noch größer als bei minimaler und mittlerer Wasserzugabemenge gemäß technischem Merkblatt.

Aufgrund der großen Spanne der zulässigen Wasserzugabe wurden bei Mörtel C ausschließlich Probekörper mit W/F-Werten geprüft, welche dem technischen Merkblatt entsprachen. Die fünf Probekörper erfüllten die Anforderungen an die Haftzugfestigkeit von 1,5 N/mm² im Mittel und mit kleinsten Einzelwerten von 1,0 N/mm² (vgl. Bild 176).

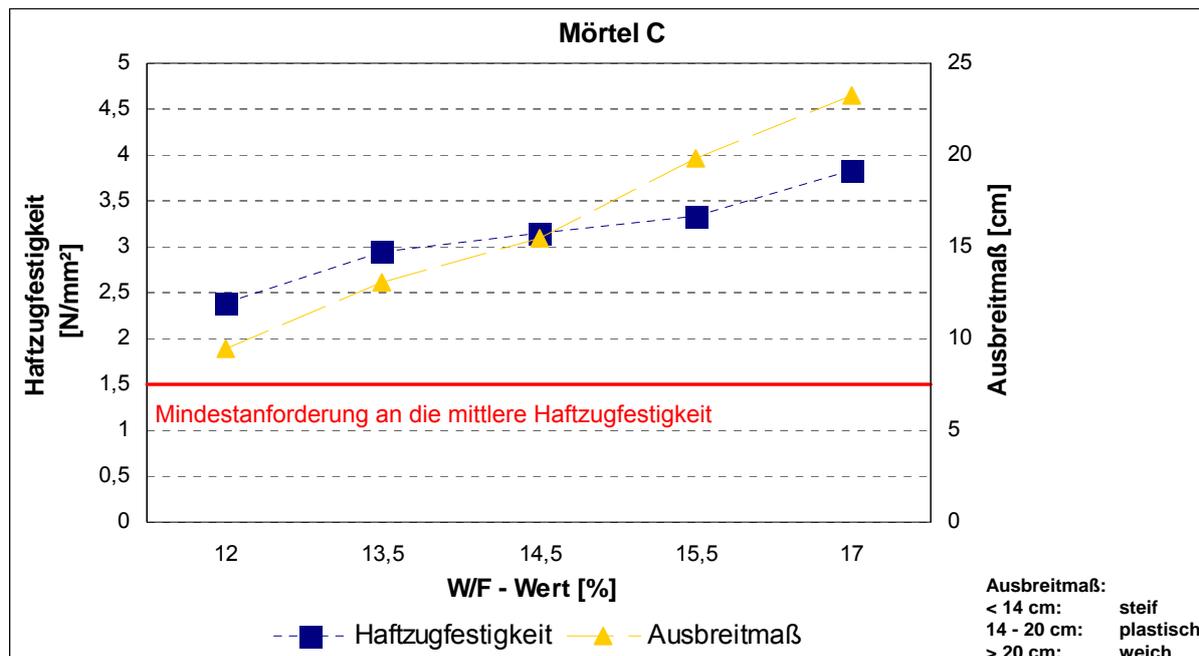


Bild 176 Mörtel C: Mittelwerte der Haftzugfestigkeit und Ausbreitmaße in Abhängigkeit zum W/F-Wert

Es zeigt sich die eindeutige Tendenz, dass die Haftzugfestigkeit dieses Beschichtungsmörtels mit zunehmender Wassermenge und infolgedessen steigendem Ausbreitmaß erhöht wird. Die Haftzugfestigkeit des Mörtels C überschreitet bei allen eingestellten W/F-Werten die Mindestanforderungen. Dazu steigert sie sich kontinuierlich vom minimalen bis zum maximalen W/F-Wert des technischen Merkblatts.

7.2.4 Zusammenfassung

Die Untersuchungsergebnisse zeigten, dass die Haftzugfestigkeiten von Beschichtungsmörteln durch den W/F-Wert beeinflusst werden. Dabei sind die Auswirkungen der Wasserzugabemenge auf die Haftzugfestigkeit je nach Mörtel unterschiedlich. Die drei Beschichtungsmörtel dieser Versuchsreihe erreichten durch einen W/F-Wert im Bereich der technischen Merkblätter alle die in [10] geforderten Haftzugfestigkeiten. Ein überhöhter W/F-Wert und die damit verbundene weiche Mörtelkonsistenz führte bei Mörtel A zu einem Abfall der Haftzugfestigkeit. Die Haftzugfestigkeit von Mörtel B wurde durch einen wechselnden W/F-Wert und eine veränderte Mörtelkonsistenz nur geringfügig beeinflusst. Dagegen erhöhte sich bei Mörtel C die Haftzugfestigkeit mit steigendem Wassergehalt im Frischmörtel.

Grundsätzlich sollte der W/F-Wert in der Praxis folgendermaßen kontrolliert und dokumentiert werden:

- Verwenden von technischen Hilfsmitteln (z.B. einer Waage) zur genauen Messung der Wasserzugabemenge beim Anmischen des Beschichtungsmörtels,
- Einstellen des W/F-Wertes gemäß Technischem Merkblatt einschließlich Dokumentation,
- Kontrolle der Frischmörtelkonsistenz durch Messung des Ausbreitmaßes.

Darüber hinaus haben die Laborversuche gezeigt, dass die Schwachstelle des mineralischen Verbundsystems aus Mörtel und Betonuntergrund überwiegend in der Verbundfuge liegt. Daher ist es nötig, dass vor dem Beschichtungsauftrag eine sorgfältige Untergrundvorbehandlung erfolgt, um eine möglichst starke Haftwirkung in der Verbundfuge zu erzeugen. Sofern der Beschichtungsmörtel in Kombination mit einer Haftbrücke aufzutragen ist, muss diese ebenfalls nach den Herstellervorgaben verarbeitet werden.

7.3 Hohlstellen bei mineralischen Beschichtungen

7.3.1 Veranlassung

In Untersuchungen von mittels Mörtelbeschichtung sanierten Abwasserschächten durch die IKT-Prüfstelle sind Hohlstellen vergleichsweise häufig dokumentierte Mängel [48]. In einem Forschungsprojekt konnten in etwa jedem vierten untersuchten Schacht Hohlstellen zwischen Mörtelbeschichtung und Schachtwand festgestellt werden [18]. Die Auswirkungen von Hohlstellen auf die Funktionalität einer Mörtelbeschichtung sind allerdings noch nicht hinreichend untersucht. Unter den Kanalnetzbetreibern besteht insbesondere Unsicherheit, inwiefern die Wasserdichtheit eines Abwasserschachtes bei anstehendem Grundwasser in dem Bereich einer Hohlstelle gefährdet ist.

Untersuchungsziel war zunächst die Bewertung und Charakterisierung von Hohlstellen in Abhängigkeit zu definierten Randbedingungen. Mit Hilfe eines eigens konzipierten Versuchsablaufs sollte dann die Belastbarkeit von Hohlstellen bei anliegendem Außenwasserdruck getestet werden. Der Belastungseinfluss auf die umliegende Beschichtung wurde ebenfalls untersucht.

7.3.2 Versuchsprogramm

Zur Untersuchung von Hohlstellen bei anstehendem Außenwasserdruck wurde ein Versuchsaufbau mit eigens angefertigten Probekörpern entwickelt. Bei diesen Probekörpern handelte es sich um mit Mörtel beschichtete Betonschachtringe mit integriertem Hohlstellenbereich. Die Hohlstellenbereiche der Probekörper wurden einer Außenwasserdruckbelastung unterzogen. Während dieses Versuchs sind die Probekörper beobachtet und Auffälligkeiten dokumentiert worden. Anschließend erfolgte eine Haftzugfestigkeitsprüfung der umliegenden Mörtelbeschichtung.

Bei der Festlegung des Untersuchungsumfangs wurden folgende Randbedingungen berücksichtigt und variiert:

- Hohlstellengröße,
- Höhe des Außenwasserdrucks und
- Beschichtungsdicke des Mörtels.

Hohlstellengröße

Die Größe der Hohlstellen sollte sich nach Möglichkeit an den in situ festgestellten Ausdehnungen orientieren. Zu diesem Zweck wurden Prüf- und Forschungsberichte

des IKT zur Abwasserschachtsanierung durch Mörtelbeschichtung analysiert ([18], [48]). In diesen Berichten sind Hohlstellen in unterschiedlichen Ausdehnungen dokumentiert, welche in drei Gruppen eingeteilt werden können:

1. kleine Hohlstellen (ca. 10%): 40 cm² - 60 cm²
2. mittlere Hohlstellen (ca. 60%): 200 cm² - 600 cm²
3. große Hohlstellen(ca. 30%): 900 cm² - 3200 cm²

Ca. ein Drittel der Hohlstellen (50% von Gruppe 2) hatte eine Größenordnung von etwa 400 cm². Aufgrund der Häufigkeit wurde diese Hohlstellengröße für die Untersuchungen ausgewählt. Zudem sind Hohlstellen der Gruppe 3 untersucht worden, um auch hier mögliche Auswirkungen der Außenwasserdruckbelastungen aufzeigen zu können. Als repräsentative Größe wurden hier 1600 cm² gewählt. Dies entspricht dem vierfachen Ausmaß der am häufigsten festgestellten Hohlstellengröße.

Höhe des Außenwasserdrucks

Zur Festlegung eines möglichst praxisnahen Außenwasserdrucks bei der Langzeitprüfung ist eine mittlere Höhe der mineralisch beschichteten Abwasserschächte aus IKT - Prüfberichten berechnet [48] worden. Diese Höhe beträgt 3,46 m und entspricht einem maximal denkbaren Außenwasserdruck von 0,346 bar am Auftritt eines Schachtbauwerks.

In der Versuchsdurchführung wurde die Wasserdruckbelastung einer Hohlstelle zwischen Schachtwand und Beschichtung simuliert. Deshalb ist mit 0,3 bar ein geringerer Prüfdruck ausgewählt worden, der z.B. auf eine Hohlstelle, die sich in etwa 0,5 m Höhe über dem Auftritt eines Schachtes mittlerer Höhe befindet, einwirken kann. Während der Langzeitprüfung wurde der Prüfdruck für 14 Tage aufrecht erhalten.

Bei einer abschließenden Kurzzeitprüfung wurde der Außenwasserdruck dann in Schritten von 0,1 bar bis zum Versagen der Beschichtung gesteigert. Diese Drucksteigerung erfolgte stufenweise in einem zeitlichen Abstand von wenigen Minuten.

Beschichtungsdicke des Mörtels

Als maßgebliche Beschichtungsdicke wurden 10 mm festgelegt. Dies ist die vorgeschlagene Mindestbeschichtungsdicke für kunststoffvergüteten Schachtbeschichtungsmörtel (siehe Abschnitt 4.3.1). Zur Untersuchung des Einflusses unterschiedlicher Beschichtungsdicken bei der Außenwasserdruckbelastung von Hohlstellen wurden ebenfalls Schichtdicken von 5 mm und 15 mm geprüft. Geringe Abweichungen von ca. ± 2 mm waren herstellungsbedingt möglich.

Unter Berücksichtigung der Randbedingungen wurden die Außenwasserdruckprüfungen an sechs verschiedenen Probekörpern durchgeführt. In Tabelle 59 sind die verschiedenen Probekörper mit Kennzeichnung, Hohlstellengröße und Beschichtungsdicke des Mörtels aufgelistet.

Tabelle 59 Probekörper zur Hohlstellenuntersuchung

Probekörperkennzeichnung	Hohlstellengröße	Beschichtungsmörteldicke
[-]	[cm ²]	[mm]
H1	400	5
H2	400	10
H3	400	15
H4	1600	5
H5	1600	10
H6	1600	15

7.3.3 Versuchsdurchführung

Die Hohlstellen der Probekörper wurden durch Auftragen eines Trennmittels erzeugt. Dieses Trennmittel verhinderte den Verbund zwischen Mörtel und Schachtwand im späteren Hohlstellenbereich der Beschichtung (vgl. Bild 177, links).

Der Beschichtungsmörtel wurde auf dieses Trennmittel appliziert unter Berücksichtigung der Vorgaben des Technischen Merkblatts des Herstellers. Als W/F-Wert wurde der Maximalwert des Technischen Merkblatts eingestellt. Mit dieser Wasserzugabemasse besaß der Mörtel eine plastische Konsistenz. Der Mörtel wurde mittels Kelle und Glätter aufgetragen (vgl. Bild 177, rechts).



Bild 177 Anfertigung der Probekörper: Mit Trennmittel vorbereiteter Hohlstellenbereich am Probekörper (links) und Auftragen des Beschichtungsmörtels (rechts)

Bei der Probekörperherstellung kamen Betonschachtringe mit einem Durchmesser und einer Höhe von einem Meter zum Einsatz. Je Schachtring entstanden auf diese Weise drei Probeflächen. Die Mörtelbeschichtung einer Probefläche hatte dabei eine Höhe von 1,0 m und eine Breite von 0,8 m

Bild 178 zeigt einen fertig beschichteten Probekörper. Der Hohlstellenbereich des Probekörpers wurde über Schlauchverbindungen mit dem Außenwasserdruck belastet. Zur Installierung der Schlauchverbindungen ist die Schachtwand vor dem Auftragen von Trennmittel und Beschichtungsmörtel durchgebohrt worden. Somit war

gewährleistet, dass der Wasserdruck die zu belastende Hohlstelle direkt erreicht. Zur Entlüftung und Druckverteilung wurde der Hohlstellenbereich an der Außenseite des Probekörpers mit Schlauchanschlüssen versehen.

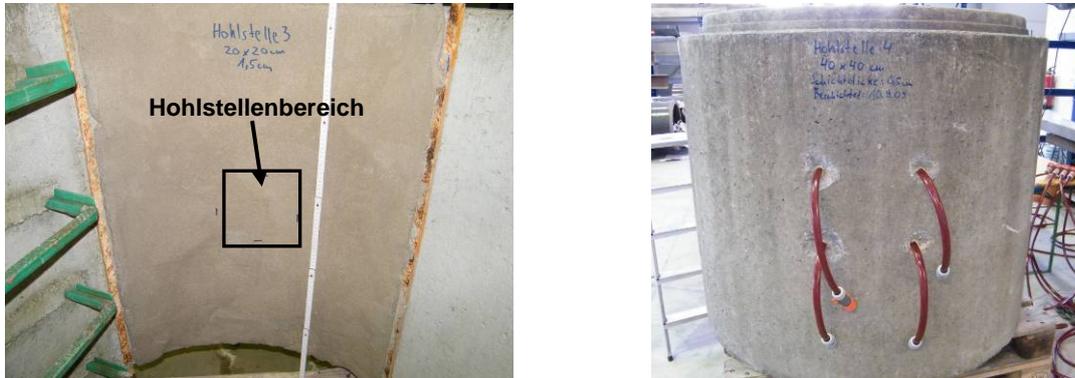


Bild 178 Fertiggestellter Probekörper: Innenseite (links) und Außenseite mit Schlauchanschlüssen zur Wasserdruckbelastung (rechts)

Der Wasserdruck wurde während der Langzeitprüfung hydrostatisch erzeugt. Zur Aufbringung des hydrostatischen Wasserdrucks wurden die Schlauchanschlüsse mit einem mit Wasser gefüllten Kanister in 3 m Höhe über dem Hohlstellenbereich des Probekörpers verbunden. Bei der Kurzzeitprüfung ist die Drucksteigerung hingegen durch einen Druckregler eingestellt worden.

Nachdem der Beschichtungsmörtel nach Herstellerangaben eine grundlegende Festigkeit und damit Prüffähigkeit erreicht hatte, wurden die Probekörper der Außenwasserdruckprüfung unterzogen. Zuvor wurde die Ausdehnung der Hohlstellen durch ein Abklopfen der Probeflächen festgestellt. Darüber hinaus wurden sie dabei optischen inspiziert. Bei Prüfbeginn mit Wasserbeaufschlagung wurden die Hohlstellenbereiche durch einen Schlauchanschluss entlüftet.

Die Druckmessung erfolgte über einen Drucksensor. Dieser war mit einem PC zur Aufzeichnung und Anzeige des anliegenden Außenwasserdrucks verbunden. Während der Prüfungen sind Auffälligkeiten und Veränderungen an den Probekörpern dokumentiert worden. Im Anschluss an die Außenwasserdruckbelastung wurden die an die Hohlstellenbereiche angrenzenden Mörtelbeschichtungen Haftzugfestigkeitsprüfungen unterzogen. Diese sind in Abständen von 5 cm, 10 cm und 15 cm neben den Hohlstellenbereichen durchgeführt worden.

7.3.4 Versuchsergebnisse

Die Ergebnisse der Versuchsdurchführung werden im Folgenden dargestellt. Dabei werden die Resultate der Langzeitprüfung, der Kurzzeitprüfung und der Haftzugfestigkeitsprüfung der angrenzenden Beschichtung beschrieben.

Langzeitprüfung

Die optische Vorinspektion der Probekörper ließ zunächst bis auf Probekörper H6 keine Auffälligkeiten erkennen. Hier fiel ein ca. 70 cm langer und 0,2 mm breiter Riss im oberen Grenzbereich der Hohlstelle auf (vgl. Bild 179).



Bild 179 Riss im oberen Hohlstellengrenzbereich von Probekörper H6

Bei Beginn der Druckbelastung mit 0,3 bar jedoch drang auch bei den Probekörpern H1 und H4 Wasser aus feinen Rissen durch den Beschichtungsmörtel (vgl. Bild 180). Die Rissbreite war jeweils kleiner als 0,1 mm und darüber hinaus waren die Risse bei der optischen Vorinspektion nicht sichtbar.



Bild 180 Wassereintritt bei 0,3 bar Außenwasserdruck: Probekörper H1 (links) und Probekörper H4 (rechts)

Bevor nun die weiteren Probekörper der Prüfung unterzogen wurden, erfolgte eine zusätzliche Inspektion der Hohlstellenbereiche. Dazu wurden diese vorher mit Wasser vorgeätzt und mit einem Gebläse getrocknet. Hierdurch konnten auch mit dem Auge nicht sichtbare Risse erkannt werden. In den Hohlstellenbereichen aller Probekörper konnten so Risse erkannt werden. Dabei handelte es sich zumeist um horizontale Risse am Übergang vom Hohlstellenbereich auf die umliegende Beschichtung mit Haftung zum Untergrund. Die Breite dieser Risse war grundsätzlich kleiner als 0,1 mm. Bild 181 zeigt exemplarisch Probekörper H3 nach dieser erweiterten Vorinspektion.



Bild 181 Probekörper H3 nach dem Vornässen und Trocknen: Gesamter Probekörper (links) und Detailansicht Hohlstellenbereich mit erkennbaren Rissen (rechts)

Während der gesamten Prüfdauer von 14 Tagen im Rahmen der Langzeitprüfung wurden in allen Probekörpern die Risse mit Wasser durchströmt. Nach einem Tag wurden weiße Fließspuren an den sechs Probekörpern sichtbar. Bis zum Ende der Prüfung nehmen diese Fließspuren zu. Weitere Auffälligkeiten waren nicht zu erkennen. Bild 182 zeigt exemplarisch den Probekörper H3 nach der Prüfung.



Bild 182: Probekörper H3 nach der Langzeitprüfung

Während der Langzeitprüfung mit konstantem Außenwasserdruck durchströmte das Wasser die oben beschriebenen Risse. Der über 14 Tage aufgebrachte Wasserdruck von 0,3 bar hatte keine erkennbaren Auswirkungen auf die Hohlstellen und das angrenzende Verbundsystem zwischen Beschichtung und Untergrund. Die oben beschriebenen Risse vergrößerten sich weder in ihrer Länge noch in ihrer Breite. Weitere Undichtigkeiten oder ein weiterführender Verlust der Haftung zwischen Mörtel und Schachtwand außerhalb der Hohlstellen waren nicht erkennbar. Die nach einem Tag sichtbaren weißen Fließspuren stammen vermutlich vom zur Hohlstellenerzeugung eingesetzten Trennmittel.

Kurzzeitprüfung

Auch das Ergebnis der Kurzzeitprüfung war bei allen sechs Prüfkörpern vergleichbar. Zu Beginn der Außenwasserdruckbelastung strömte das Wasser wie zuvor bei der Langzeitprüfung durch die oben beschriebenen Risse im Beschichtungsmörtel der

Hohlstellenbereiche. Ab einer bestimmten Druckstufe löste das Wasser stellenweise die seitlich und unten an den Hohlstellenbereich angrenzende Mörtelbeschichtung ab. Dieser Vorgang vergrößerte den jeweiligen Hohlstellenbereich z.T. erheblich. Dieser Vorgang setzte sich bis zum äußeren Rand der Probekörperfläche fort und das Wasser konnte dann dort frei ausströmen. Diese Vergrößerung der Hohlstellenfläche fand probekörperabhängig jeweils bei einer anderen Druckstufe statt (vgl. Tabelle 60).

Tabelle 60 Druckstufen beim Ablösen der an den Hohlstellenbereich angrenzenden Mörtelbeschichtung

Probekörper H1	Probekörper H2	Probekörper H3
Druckstufe: 1,6 bar	Druckstufe: 1,4 bar	Druckstufe: 1,2 bar
		
Probekörper H4	Probekörper H5	Probekörper: H6
Druckstufe: 1,2 bar	Druckstufe: 1,0 bar	Druckstufe: 0,7 bar
		

Die Drucksteigerung der Kurzzeitprüfung verursachte bei allen Probekörpern eine deutlich erkennbare Schädigung des an die Hohlstelle angrenzenden Verbundsystems zwischen Beschichtung und Untergrund. Je nach Probekörper wurde die Beschichtung bei einer anderen Druckstufe vom Untergrund abgelöst. Dabei war für die Größe der jeweiligen Druckstufe vor allem die Hohlstellengröße ausschlaggebend. Doch auch die Schichtdicke des Mörtels schien das Einsetzen des Verbundversagens zu beeinflussen.

Bild 183 stellt auf der folgenden Seite das Einsetzen des Verbundversagens zwischen Beschichtung und Untergrund in Abhängigkeit zu Druckstufe und Beschichtungsdicke dar. In diesem Diagramm ist zu erkennen, dass die Wahrscheinlichkeit einer Schädigung des Verbundsystems durch eine große Hohlstellenfläche erhöht wird. Bemerkenswert ist ebenfalls, dass die Zunahme der Beschichtungsdicke offensichtlich nicht vor den Folgen des erhöhten Wasserdrucks schützt. In dieser Ver-

suchsreihe wurde die dünnste Beschichtung erst bei dem maximalen Wasserdruck von der Schachtwand getrennt.

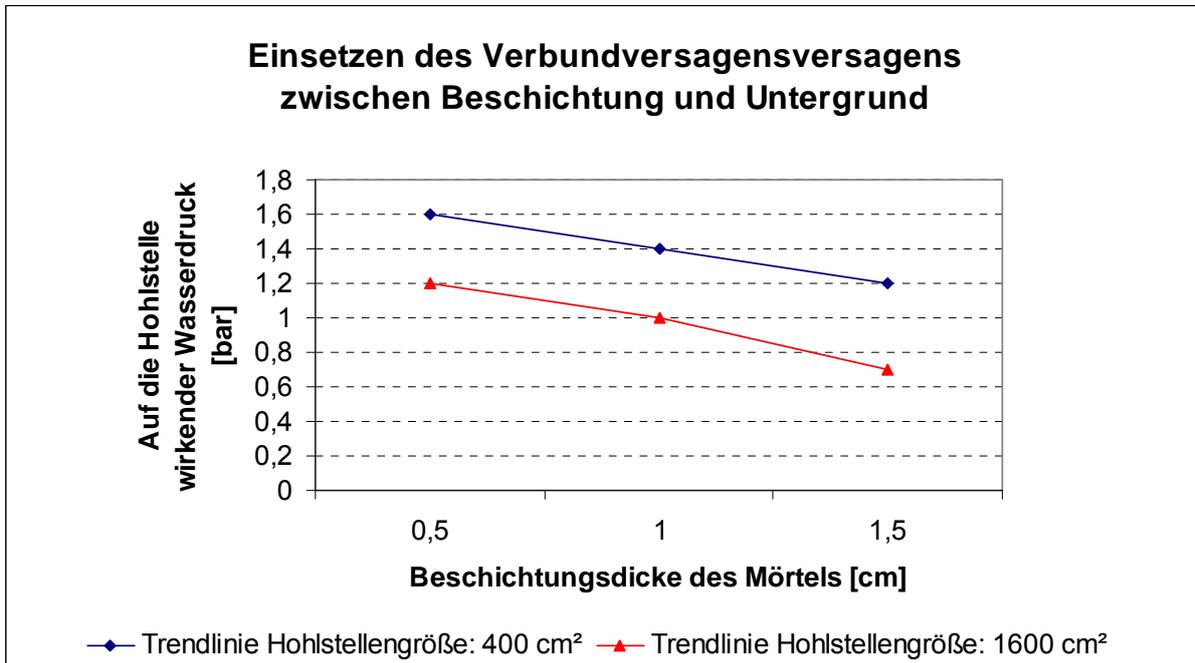


Bild 183 Einsetzen des Verbundversagens zwischen an die Hohlstellen angrenzender Beschichtung und Untergrund in Abhängigkeit zu Druckstufe und Beschichtungsdicke

Haftzugfestigkeitsprüfung der angrenzenden Beschichtung

Die Ergebnisse der Haftzugfestigkeitsprüfungen der oberhalb an den Hohlstellenbereich angrenzenden Mörtelbeschichtung nach der Außenwasserdruckprüfung sind in Tabelle 61 zusammengefasst.

Tabelle 61 Haftzugfestigkeiten der oberhalb an den Hohlstellenbereich angrenzenden Mörtelbeschichtung

Probekörper		Prüfergebnisse der Haftzugfestigkeit			
		Abstand von der Hohlstelle			Mittelwert
		5,0 cm	10,0 cm	15,0 cm	
H1		1,28 N/mm ²	1,79 N/mm ²	1,69 N/mm ²	1,59 N/mm ²
H2		0,98 N/mm ²	0,69 N/mm ²	0,75 N/mm ²	0,81 N/mm ²
H3		0 N/mm ² (Ablösung beim Bohren)	0 N/mm ² (Ablösung beim Bohren)	2,31 N/mm ²	0,77 N/mm ²
H4		0,32 N/mm ²	1,37 N/mm ²	0,44 N/mm ²	0,71 N/mm ²
H5		1,03 N/mm ²	0,92 N/mm ²	0,88 N/mm ²	0,94 N/mm ²
H6		1,08 N/mm ²	0,65 N/mm ²	0,32 N/mm ²	0,68 N/mm ²

Der Verbund riss bei allen Prüfflächen zwischen Mörtelbeschichtung und Untergrund. Die Ergebnisse der Haftzugfestigkeitsprüfung verdeutlichen, dass die oberhalb an die Hohlstelle angrenzende Mörtelbeschichtung auch nach hoher Außenwasserdruckbelastung noch Verbund zur Schachtwand besitzen kann. Dabei hatte die Beschichtungsdicke offensichtlich keine Auswirkungen auf die Haftzugfestigkeit.

7.3.5 Ergänzende In-situ-Untersuchungen

Bei den zuvor dargestellten Untersuchungen waren stets Risse in Hohlstellenbereichen von Mörtelbeschichtungen zu erkennen. Diese sind offensichtlich ohne Außenwirkung während der Mörtelerhärtung entstanden. Ob dies auch in situ bei Mörtelbeschichtungen auftreten kann, wurde nunmehr untersucht. Dazu wurden Hohlstellen in durch Mörtelbeschichtung sanierten Abwasserschächten begutachtet. Die Beschichtungen dieser Abwasserschächte wurden bereits vor einigen Jahren von Mitarbeitern des IKT geprüft. Dabei konnten an den Hohlstellen dieser Beschichtungen keine Risse festgestellt werden [48].

Bei dieser erneuten Inspektion der Hohlstellen in situ wurden die gleichen Maßnahmen zur Risserkennung wie in der Versuchsdurchführung angewandt. Dazu wurden die Hohlstellenbereiche bei diesen Untersuchungen gereinigt, vorgehäst und getrocknet, um eventuell vorhandene Risse sichtbar zu machen (vgl. Bild 184). Die Reinigung der Hohlstellenbereiche beinhaltete das Entfernen von Verunreinigungen, Inkrustationen und Zementschlämme von der Schachtwand. Die Reinigung der Mörtelbeschichtung erfolgte mit Drahtbürste und Spachtel. Das anschließende Nässen und Trocknen der Beschichtung sollte wie bei den Probekörpern des Versuchsaufbaus auch feinste Risse im Beschichtungsmörtel erkennen lassen.



Bild 184 Untersuchung einer Hohlstelle auf Risse: Reinigung der Beschichtung mit einem Spachtel (links) und Nässen und Trocknen der Beschichtung (rechts)

In **Abwasserschacht 1** (vgl. Bild 185) wurden bei der ersten Untersuchung vor etwa drei Jahren vier Hohlstellen festgestellt. Diese Hohlstellen konnten auch bei dieser Untersuchung zweifelsfrei lokalisiert werden.



Bild 185 Abwasserschacht 1: Lage des Schachtes (links) und Blick in den Schacht (rechts)

Die Hohlstellen befanden sich im Schachtkonus und im Einbindebereich eines Steigbügels. Drei der vier Hohlstellen hatten sich in ihrer Fläche vergrößert. Bei der optischen Inspektion der Hohlstellenbereiche konnten zunächst keine Risse erkannt werden. Nach dem Reinigen der Hohlstellen wurden diese mit Wasser vorgehäst und getrocknet. Nach dem Trocknen der Schachtwand waren in allen Hohlstellenbereichen der Mörtelbeschichtung Risse zu erkennen. Diese Risse verliefen zumeist

horizontal, mittig oder an den Grenzbereichen der Hohlstellen und an Stellen mit Inkrustationen auf der Schachtwand. Ihre maximale Breite betrug 0,6 mm. In Bild 186 ist einer dieser Risse dargestellt.



Bild 186 Riss in einem Hohlstellenbereich von Abwasserschacht 1: Rissverlauf (links) und Detailansicht (rechts)

Auch im Konusbereich des Abwasserschachtes konnten im Hohlstellenbereich Risse festgestellt werden.

In der Beschichtung von **Abwasserschacht 2** existierten Hohlstellen im Schachtkörper und im Schachtkonus, welche sich im Vergleich zur letzten Untersuchung vergrößert hatten. Auch hier konnten zunächst keine Risse festgestellt werden. Dies entsprach dem Ergebnis der ersten Untersuchung.

Nach dem Reinigen und Befeuchten der Mörtelbeschichtung waren in allen Hohlstellenbereichen Risse in der Beschichtung zu sehen. Diese hatten eine maximale Breite von 0,2 mm und verliefen zumeist horizontal und mittig durch die Beschichtung im Hohlstellenbereich.

Die Ergebnisse der Außenwasserdruckprüfung in den Laborversuchen wurden durch die In-situ-Untersuchungen bestätigt. Alle untersuchten Hohlstellen wiesen mindestens einen Riss in der Mörtelbeschichtung auf. Dabei war besonders erwähnenswert, dass diese Risse bei der ersten Schachtinspektion nicht erkannt werden konnten. In der ersten Schachtuntersuchung wurden lediglich die Hohlstellen ohne weitere Auffälligkeiten festgestellt. Nur durch die sorgfältige Reinigung der Rissbereiche mit Spachtel und Drahtbürste sowie das Nässen und Trocknen der Beschichtung konnten diese sichtbar gemacht werden. Die Risse in den Probekörpern des Versuchsaufbaus konnten ebenfalls bei der ersten Begutachtung der Hohlstellenbereiche nicht erkannt werden. Zudem sind die Rissverläufe in situ und im Labor durchaus vergleichbar.

Die Untersuchungen belegen somit, dass Hohlstellen zwischen Beschichtung und Schachtwand zur Rissbildung im Mörtel führen können und die Wasserdichtheit eines Abwasserschachtes in diesen Bereichen gefährdet ist. Während der Außenwasserdruckprüfung im Labor strömte Wasser kontinuierlich durch die Risse in der Beschichtung. In den untersuchten Abwasserschächten in situ waren Inkrustationen infolge von nachdrückendem Grundwasser zu erkennen.

Darüber hinaus wurde festgestellt, dass sich Hohlstellenflächen mit der Zeit vergrößern können. Von acht bereits untersuchten Hohlstellen besaßen bei dieser Inspektion sechs eine größere Ausdehnung.

7.3.6 Zusammenfassung

Die untersuchten Probekörper weisen unabhängig von Hohlstellengröße und Beschichtungsdicke ein einheitliches Schadensbild auf:

In den Hohlstellenbereichen waren bereits vor Beginn der Außenwasserdruckprüfungen Risse im Beschichtungsmörtel vorhanden. Diese waren offensichtlich während der Mörtelerhärtung entstanden und verliefen überwiegend horizontal in den Grenzbereichen zwischen Hohlstelle und umliegender Mörtelbeschichtung mit Verbund zur Schachtwand. Die Rissbreite betrug stets weniger als 0,1 mm mit der Folge, dass die Risse bei der optischen Vorinspektion nicht zu erkennen waren. Erst durch das Nässen und Trocknen der Beschichtung konnten diese Risse sichtbar gemacht werden. Die Belastung der Probekörper mit Außenwasserdruck zeigte, dass diese Risse Undichtigkeiten an der Mörtelbeschichtung darstellen. Die Außenwasserdruckprüfungen fanden somit an bereits vorgeschädigten Probekörpern bzw. Beschichtungen statt. Darüber hinaus zeigte sich, dass eine nur bereichsweise aufgetragene Mörtelbeschichtung durch einen erhöhten Außenwasserdruck an Hohlstellen geschädigt bzw. partiell abgelöst werden konnte. Der Einfluss des Außenwasserdrucks auf das an eine Hohlstelle angrenzende Verbundsystem aus Beschichtungsmörtel und Schachtwand kann jedoch als relativ unkritisch eingestuft werden.

Während der Langzeitprüfung bei einem praxisnahen Außenwasserdruck wurde das an die Hohlstelle angrenzende Beschichtungssystem nicht geschädigt. Erst durch eine Drucksteigerung auf bis zu 1,6 bar wurde der Mörtel vom Untergrund abgelöst. Ein Außenwasserdruck in dieser Höhe ist jedoch in den in situ untersuchten Abwasserschächten nicht zu erwarten [6].

Die Prüfungen zeigten darüber hinaus, dass eine hohe Beschichtungsdicke die Verbundstärke zwischen Beschichtung und Schachtwand nicht zwingend erhöht. Dieses Erkenntnis wurde durch die anschließenden Haftzugfestigkeitsprüfungen bestätigt. Die Haftung zwischen Beschichtung und Untergrund wurde offensichtlich in erster Linie durch die Ausführung der Sanierung bestimmt. Dennoch zeigten die Versuchsergebnisse, dass Hohlstellen bei anliegendem Außenwasserdruck kritisch zu bewerten sind. Alle Mörtelbeschichtungen dieser Versuchsreihe waren in ihren Hohlstellenbereichen durch Risse geschädigt, welche offensichtlich während der Hydratation entstanden sind. Diese Risse lagen zumeist horizontal in den Grenzbereichen zwischen Mörtelbeschichtung mit Untergrundverbund und Hohlstelle vor. Die Risse waren jedoch mit dem Auge nicht zu erkennen, traten bei geringer Außenwasserdruckbelastung aber als Undichtigkeiten in Erscheinung.

Aufgrund dieser Versuchsergebnisse wurden ergänzende In-situ-Untersuchungen durchgeführt. In diesen Baustellenuntersuchungen wurde der Zusammenhang zwischen Hohlstellen und der Rissbildung im Beschichtungsmörtel weiter untersucht. Die Untersuchungsergebnisse belegen, dass Hohlstellen aufgrund der Rissbildung

im Beschichtungsmörtel und der damit verbundenen Gefährdung der Wasserdichtheit des Abwasserschachtes kritisch zu bewerten sind. Sie verdeutlichen, dass feine Risse im Beschichtungsmörtel nur durch die Reinigung sowie das Nässen und Trocknen der Beschichtung erkennbar werden. Deshalb sollten Inspektionen von Mörtelbeschichtungen diese Maßnahmen zur Risserkennung beinhalten. Bei der Abwasserschachtsanierung durch Mörtelbeschichtung sind Hohlstellen zu vermeiden. Als Basis für eine hohlstellenfreie Mörtelbeschichtung ist eine fachgerechte Ausführung der Sanierung erforderlich.

Offen blieb, inwiefern ein konstant anstehender Wasserdruck auf eine derartige Hohlstelle in Verbindung mit einer Beschichtung des gesamten Schachtringes in Umfangsrichtung das Infiltrationsverhalten beeinflussen kann. Hierzu dienten die im Abschnitt 6.2.2 beschriebenen Großversuche. Dort zeigte sich, dass die zu erwartenden Feuchtefahnen nicht abflusswirksam waren.

7.4 Nachbehandlungsmittel bei mineralischen Beschichtungen

7.4.1 Vorgehensweise

Damit der Hydratationsprozess eines Beschichtungsmörtels ungestört und wie vom Hersteller beabsichtigt ablaufen kann, ist es je nach eingesetztem Material erforderlich, dem erhärtenden Mörtel nach seiner Applikation auf die Schachtwand Wasser zuzuführen, mindestens jedoch eine Wasserverdunstung über die Oberfläche zu verhindern bzw. zu reduzieren. Im Wesentlichen stehen somit für eine Nachbehandlung von Mörtelbeschichtungen wasserzuführende oder verdunstungshemmende Maßnahmen zur Verfügung.

Im ersten Fall liegt der Nachbehandlung eine regelmäßige Befeuchtung des Mörtels - ggf. mit weiteren Maßnahmen zur Verringerung der Zugluft im frisch beschichteten Schacht - für einen Zeitraum gemäß Herstellerangaben zugrunde. Im zweiten Fall werden Nachbehandlungsmittel auf den noch frischen Mörtel aufgestrichen oder aufgesprüht, um Wasserverluste durch Verdunstung zu reduzieren oder verhindern.

Inwieweit die verschiedenen Methoden und Materialien die Qualität und die Haftzugfestigkeit einer Mörtelbeschichtung beeinflussen, sollte in Laborversuchen anhand von beschichteten und nachbehandelten Probekörpern untersucht werden. Im Vorfeld dieser Untersuchungen wurde in situ der Einsatz von Nachbehandlungsmitteln dokumentiert und die generelle Verwendbarkeit der dort eingesetzten Materialien überprüft.

Nach der Auswahl der einzelnen Nachbehandlungsmittel wurden die Probekörper hergestellt. Bei diesen handelte es sich um genormte Betongrundkörper, die mit einem Mörtel beschichtet worden waren, der gemäß Herstellerangaben eine Nachbehandlung erforderte. Fünf Probekörper-Paare sind beschichtet und nachbehandelt sowie unmittelbar danach in einer Klimakammer für 28 Tage eingelagert worden. Während der Einlagerung wurden die Beschichtungen optisch inspiziert und Auffälligkeiten, z.B. Rissbildung, dokumentiert. Nach der Auslagerung wurden an den nachbehandelten Beschichtungsprobekörpern Haftzugprüfungen durchgeführt.

7.4.2 In-situ Maßnahmen

Exemplarisch ist im Folgenden die Nachbehandlung einer frischen Mörtelbeschichtung mit einer wasserbasierten, synthetischen Emulsion und mit einer wachshaltigen Flüssigkeit dargestellt (vgl. Bild 187). Nach Abschluss der Beschichtungsarbeiten ließen die Mitarbeiter der Sanierungsfirmen jeweils etwa eine halbe Stunde an Zeit vergehen, bevor sie mit einem Quast bzw. mit einer Sprühflasche das Nachbehandlungsmittel auf die bereits angezogene Beschichtung vorsichtig applizierten.



Bild 187 Aufquasten einer synthetischen Emulsion (links) und Aufsprühen eines wachshaltigen Nachbehandlungsmittels auf eine kurz zuvor applizierte Mörtelbeschichtung (rechts)

Unter den vorherrschenden Randbedingungen konnten im Rahmen von Nachuntersuchungen keine Auffälligkeiten, z.B. Risse in den Beschichtungen, festgestellt werden. Welchen Einfluss das jeweilige Nachbehandlungsmittel an den positiven, optischen Erscheinungsbildern der Mörtelbeschichtungen hatte, blieb offen.

7.4.3 Laborversuche

Die Laborversuche sollten aufzeigen, welchen Einfluss die Art der Nachbehandlung auf die Qualität einer Mörtelbeschichtung unter bestimmten klimatischen Randbedingungen besitzen kann. Als Qualitätskriterien wurden die optische Erscheinung der Beschichtung - im Wesentlichen mit Blick auf Risse im Beschichtungsmörtel - und die Haftzugfestigkeit herangezogen. Die mit nur einem Mörtelprodukt beschichteten Betongrundkörper (vgl. Abschnitt 7.2.2, Bild 172) wurden alle in gleicher Weise hergestellt und im gleichen Klima bei 18° Celsius und 55 % relativer Luftfeuchte für die Dauer von 28 Tagen gelagert [40]. Diese klimatischen Randbedingungen sind anhand von Ergebnissen aus Langzeitmessungen in [18] in der Klimakammer eingestellt worden. Lediglich die Art der Nachbehandlung war unterschiedlich. Gemäß Herstellerangaben war die Mörteloberfläche u.a. vor Wasserverdunstung zu schützen. Jeweils ein beschichtetes Betonplatten-Paar ist wie folgt nachbehandelt worden:

- keine Nachbehandlung,
- Feuchthalten mit nassen Jute-Lappen, die auf der Beschichtung bzw. dem Probekörper liegen,

- systemzugehöriger Verdunstungsschutz des Mörtelherstellers (NB-Mittel A),
- ein vergleichsweise häufig auf Baustellen eingesetztes Nachbehandlungsmittel (NB-Mittel B),
- ein weiteres Produkt aus dem Zubehörhandel (NB-Mittel C).

Während der Einlagerungsdauer wurden die nachbehandelten Beschichtungsprobekörper wöchentlich optisch kontrolliert und ggf. erkennbare Auffälligkeiten wie etwa Risse dokumentiert. Nach der Auslagerung erfolgten an jedem Probekörper fünf Haftzugfestigkeitsprüfungen.

7.4.4 Versuchsergebnisse

Nachfolgend exemplarisch dargestellte Bilder von zwei Probekörpern sollen einen Eindruck der optischen Erscheinung dieser nach der Auslagerung aus der Klimakammer geben (vgl. Bild 188). In einem Fall zeigt die feucht gehaltene Beschichtung des Probekörpers keine Risse, in dem anderen Fall enthält die mit dem Nachbehandlungsmittel C versehene Beschichtung Risse von einer Breite bis zu 0,45 mm.

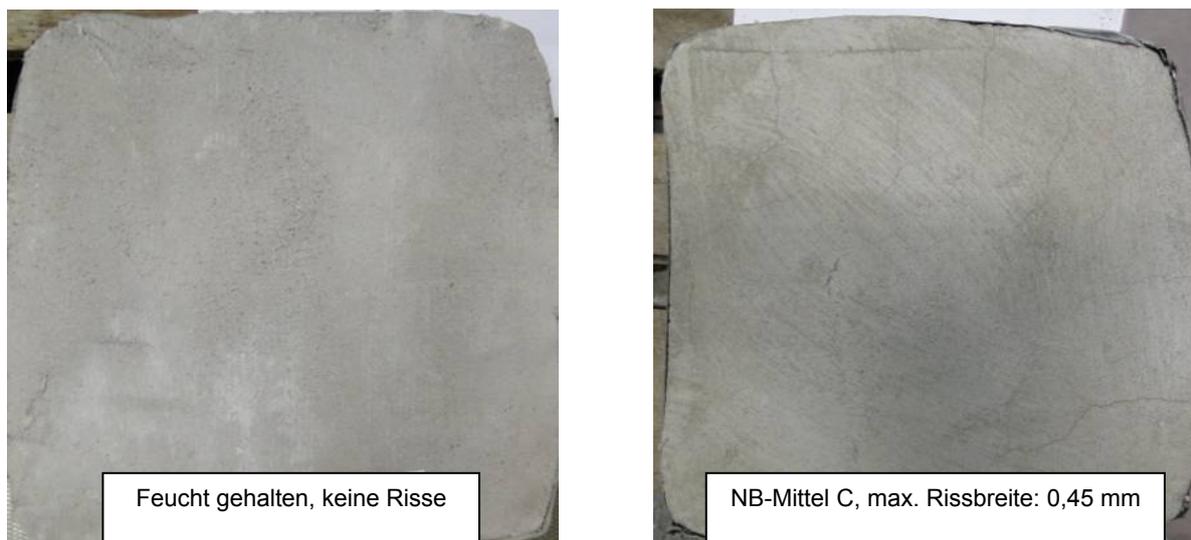


Bild 188 *Rissfreie Beschichtung durch feucht halten (links) und Beschichtung mit Rissen von bis zu 0,45 mm Breite, trotz Auftragen von Nachbehandlungsmittel C (rechts) [40]*

Die Probekörper, deren Beschichtungen entweder nicht oder mit den Mitteln A und B nachbehandelt worden sind, zeigten vergleichbar zu Bild 188 rechts Risse von maximalen Breiten zwischen 0,2 mm und 0,4 mm.

Die wesentlichen Ergebnisse der Haftzugprüfungen sowie die festgestellten maximalen Rissbreiten an den nachbehandelten Probekörpern sind Tabelle 62 zu entnehmen. Es zeigt sich hier sehr deutlich, dass die mittleren Haftzugfestigkeiten nur sehr geringfügig von einander abweichen und darüber hinaus die vergleichsweise hohen Anforderungen nach [10], auch mit Blick auf die gemessenen Minimalwerte, erfüllen.

Tabelle 62 Haftzugfestigkeiten und maximale Rissbreiten von Mörtelbeschichtungen in Abhängigkeit der Nachbehandlung

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

7.4.5 Zusammenfassung

Die Untersuchungen an den unterschiedlich nachbehandelten Beschichtungsprobenplatten zeigten mit Blick auf die ermittelten Haftzugfestigkeiten keine nennenswerten Unterschiede. Alle Prüfungen erfüllten die vergleichsweise hohen Anforderungen von im Mittel 1,5 N/mm² mit kleinstem Einzelwert von 1,0 N/mm² gemäß [10]. Dabei ist es unter den gegebenen Versuchsrandbedingungen offensichtlich unerheblich, ob keine Nachbehandlung erfolgte, der Mörtel feucht gehalten wurde oder Nachbehandlungsmittel eingesetzt worden sind.

Im Gegensatz dazu war das optische Erscheinungsbild der Beschichtungen vergleichsweise uneinheitlich. Bei Feuchthalten der beschichteten Probekörper entstanden unter den vorherrschenden, klimatischen Randbedingungen keine Risse in der Beschichtung. Dem gegenüber konnten die verwendeten Nachbehandlungsmittel eine Rissbildung in den Beschichtungen der Probekörper nicht verhindern. Ein vergleichbares Rissbild konnte auch an den nicht nachbehandelten Probekörpern festgestellt werden. Erste Risse von etwa 0,1 mm Breite waren in den Beschichtungen bereits nach einer Woche in der Klimakammer erkennbar.

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

7.5 Hohlstellenortung an Mörtelbeschichtungen

7.5.1 Veranlassung

Gerade die Ortung von Hohlstellen ist bei applizierten Schachtbeschichtungen sehr zeitaufwändig und nicht immer unproblematisch. In der Regel wird die Beschichtung mit einem Hammer abgeklopft und je nach Klang wird entschieden, ob eine Hohlstelle vorliegt. Schwierig wird dies insbesondere bei wassergefüllten Hohlstellen. Untersuchungen der Universität Stuttgart [52] sollten zeigen, ob mit dem Verfahren der lokalen Resonanzspektroskopie die Untersuchung von Mörtelbeschichtungen auf Hohlstellen vereinfacht werden kann. Dafür wurden zwei Schachtwände mit bekannten Fehlstellen in den Beschichtungen zur Verfügung gestellt. Zusätzlich wurde eine Messung im Großversuchsstand des IKT an einer wassergefüllten Hohlstelle durchgeführt.

7.5.2 Verfahren und Untersuchungsprogramm

Für die lokale Resonanzspektroskopie wurde ein Modalanalysegerät der Firma LMS in Verbindung mit einem Notebook und der Datenerfassungssoftware LMS Pimento verwendet. Die Anregung erfolgte über einen Impulshammer der Firma Kistler und die Aufzeichnung mit einem Mikrofon der Firma PCB sowie mit bis zu zwei Körperschallaufnehmern der Firma Kistler. Die Datenauswertung und Darstellung erfolgte mit Matlab. Das Prinzip der lokalen Resonanzspektroskopie ist im Bild 189 dargestellt.

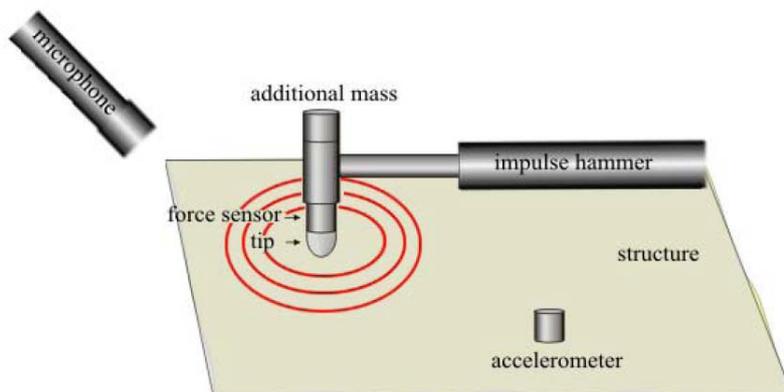
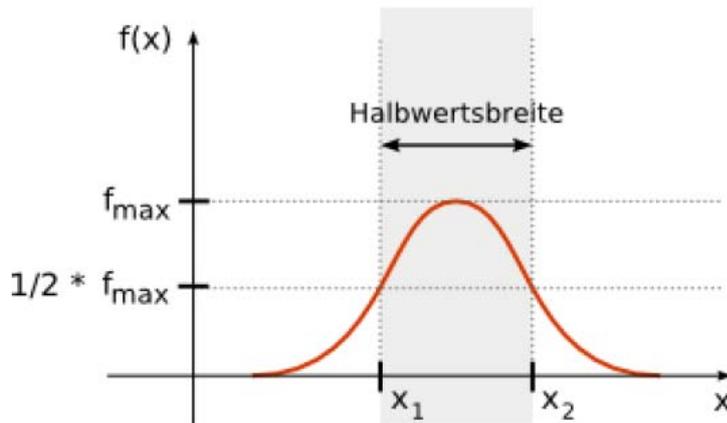


Bild 189 Messprinzip der lokalen Resonanzspektroskopie [52]

Mit einem instrumentierten Impulshammer wird das Bauteil zu Schwingungen angeregt. Diese Schwingungen erzeugen einen Klang, der mit Hilfe eines Mikrofons aufgezeichnet wird. Der Klang ändert sich bei strukturellen Veränderungen im Material. Diese Klangänderung ist in einer Änderung des Frequenzgehaltes des Signals erkennbar. Zusätzlich wird mit bis zu zwei Körperschallaufnehmern die Schwingung des Bauteils aufgezeichnet.

Darüber hinaus wird zu den Klangsignalen über einen Kraftaufnehmer im Hammerkopf das Anregungssignal mit aufgezeichnet. Die Kontaktzeit der Anregung ändert sich, wenn das Material härter oder weicher wird. Je näher ein Defekt an der Ober-

fläche liegt, umso empfindlicher reagieren die Hammeranregungen darauf. Die Hammersignale sind idealerweise Gaußkurven (vgl. Bild 192). Zur Darstellung der Hammersignale wird deren Halbwertsbreite bestimmt. Die Halbwertsbreite ist die Breite bei halber Höhe des Signals [52].



*Bild 190 Bestimmung der Halbwertsbreite einer Funktion $f(x)$ [52];
 x : Zeit in ms; $f(x)$: Kraft in Newton*

Die lokale Resonanzspektroskopie wurde an Mörtelbeschichtungen von Schachtingenwänden durchgeführt (vgl. Bild 191). In den insgesamt sieben untersuchten Messfeldern waren unter den Mörtelbeschichtungen Hohlstellen unterschiedlicher Größe und Tiefe eingebaut worden. Die ersten sechs Messfelder befanden sich in zwei Schachtringen, in denen Mörtelbeschichtungen unterschiedlicher Dicke aufgebracht worden waren. Mit Hilfe eines Trennmittels waren unter den Mörtelbeschichtungen Fehlstellen eingebracht worden (vgl. Abschnitt 7.3.3).



*Bild 191 Schachtringe A und B (links) mit eingebaute Mörtelbeschichtungen;
 Beispiel für ein zu prüfendes Messfeld (rechts)*

Die Größen der Messfelder, die Sollfehlerausdehnungen bzw. Hohlstellengrößen und Tiefenlagen - entspricht den Schichtdicken der einzelnen Mörtelbeschichtungen - sind in Tabelle 63 dargestellt.

Tabelle 63 Randbedingungen in den Messfeldern [52]

Probekörper- nummer	Messfeld- nummer	Messfeldgröße	Sollfehleraus- dehnung bzw. Hohlstellengröße	Fehlertiefe bzw. Schichtdicke des Mörtels
[-]	[-]	[cm]	[cm]	[cm]
A	1	50 x 50	20 x 20	0,5
A	2	50 x 50	20 x 20	1,0
A	3	50 x 50	20 x 20	1,5
B	1	60 x 60	40 x 40	0,5
B	2	60 x 60	40 x 40	1,0
B	3	60 x 60	40 x 40	1,5
Schacht	-	75 x 45	20 x 20	nicht bekannt

Über die Sollfehler wurde ein Messraster mit einem Messpunktabstand von fünf Zentimetern gelegt. Die Größe der Messfelder in Schachtring A betrug 50 x 50 cm, in Schachtring B 60 x 60 cm. Im Bereich der Sollfehler waren oberflächlich Risse zu sehen. Das dritte Messfeld befand sich in einem im Großversuchsstand eingebauten Schacht. Auch hier war eine Hohlstelle eingebaut, die etwa 20 x 20 cm groß war. Im Bereich der Hohlstelle hatten sich bereits Risse gebildet. Durch eindringendes Wasser waren die Bereiche um die Risse bereits feucht. Über den geschädigten Bereich wurde ein Messraster mit fünf Zentimetern Messpunktabstand gelegt. Das Messfeld war 75 x 45 cm groß.

7.5.3 Prüfergebnisse

Im Messfeld A1 wurden 121 Punkte abgeklopft und der erzeugte Klang mit einem Mikrofon aufgezeichnet. Der auf den Hohlstellen erzeugte Klang war hörbar anders und vor allem lauter als der auf gut verbundenen Stellen erzeugte Klang. Da die lokale Resonanzspektroskopie empfindlicher reagiert, wenn sich Materialänderungen näher der Oberfläche befinden, war zu erwarten, dass die Signalamplituden der drei Messfelder sich unterscheiden. Tatsächlich waren die Amplituden der Messfelder A1 und A2 ungefähr gleich groß. An Messfeld 3 hingegen waren die Amplituden geringer, da hier die Schichtdicke am größten war. Zur Auswertung der Daten über die gesamte Fläche des Messfeldes wurden zuerst die Halbwertsbreiten der Anregungssignale betrachtet. Hierfür wurde für jeden Punkt die Halbwertsbreite ermittelt und dann mittels einer kubischen Interpolation ein flächiges Bild der farbcodierten Halbwertsbreiten erstellt. Das Ergebnis ist im Bild 192 zu sehen.

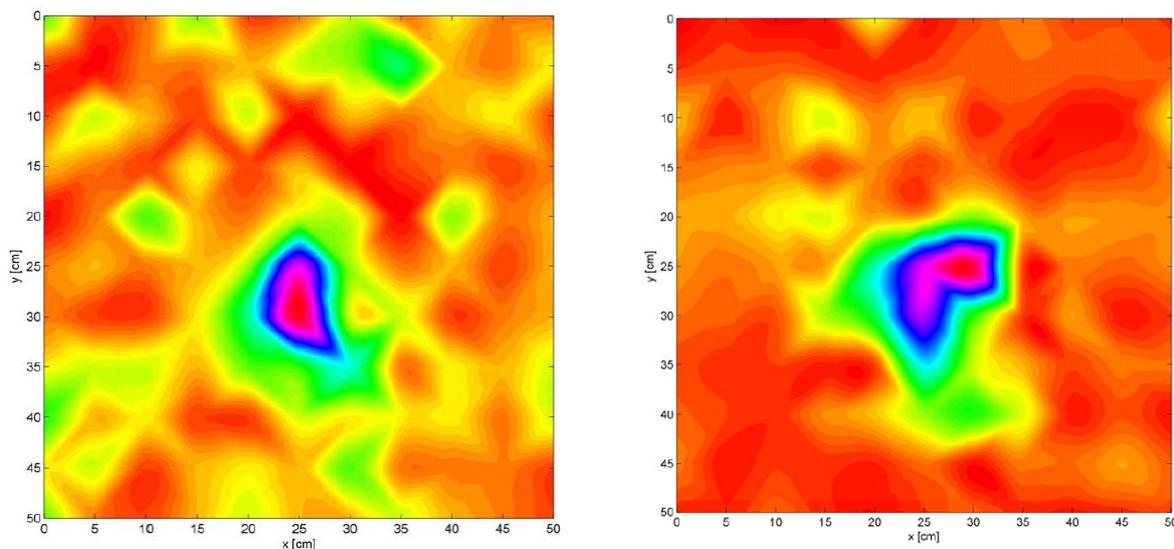


Bild 192 Halbwertsbreiten der Anregungssignale (links) und Energie der Amplitudenspektren von Messfeld A1(rechts) [52]

Bereiche mit größerer Halbwertsbreite zeigen sich in diesem Bild in der Mitte als grün-blauer Fleck. Der Bereich erstreckt sich in x-Richtung von 15 cm bis 35 cm und in y-Richtung von 20 cm bis 40 cm. Die Änderung der Halbwertsbreite ist wie erwartet in der Mitte der Hohlstelle am größten. Da die Mörtelbeschichtung im Gegensatz zu Kunststoffen, woran die lokale Resonanzspektroskopie bisher hauptsächlich Verwendung fand, sehr hart ist, sind die Änderungen in der Halbwertsbreite besonders in den Randbereichen der Fehlstelle gering mit nur etwa 0,15 ms. Auch ungeschädigte Bereiche des Messfeldes zeigen ähnliche Veränderungen der Halbwertsbreiten. Dies ist auf Effekte durch die Oberflächenstruktur zurück zu führen. Die Auswertung der Halbwertsbreiten der Anregungssignale ist also nur bedingt aussagekräftig.

Im Folgenden werden daher die Klangsignale näher untersucht. Wie bereits in Bild 192, links gezeigt, ändern sich vor allem die Signalamplituden auf der Hohlstelle signifikant. Um die Amplitudenspektren ebenfalls über der Fläche darzustellen, wird von jedem Messpunkt die Energie der Klangsignale als Fläche unter dem Amplitudenspektrum berechnet. Diese wird analog zu den Halbwertsbreiten mittels einer kubischen Interpolation für das Messfeld A1 flächig dargestellt (vgl. Bild 192 rechts und Bild 193 oben links). Auch in dieser Darstellung kann die Hohlstelle sehr deutlich zwischen 15 cm und 35 cm auf der x-Achse und zwischen 20 cm und 40 cm auf der y-Achse lokalisiert werden. Außerdem zeigen sich zwei kleinere Bereiche mit vergrößerter Energie bei den Koordinaten (15/20) und (15/10). Es ist zu vermuten, dass hier lokal begrenzte kleinere Lufteinschlüsse vorliegen. Die Amplitudenspektren der zusätzlich angebrachten Körperschallaufnehmer zeigen ein ähnliches Verhalten.

Messfeld A2 wurde ebenfalls an 121 Punkten abgeklopft und der Klang aufgezeichnet. Da die Auswertung der Halbwertsbreiten keine zusätzliche Information liefert, wird hier nicht näher darauf eingegangen. Im Bild 193 mitte links sind, wie bei Messfeld A1, die Energien der Amplitudenspektren für das Messfeld A2 flächig dargestellt. Auch hier lässt sich die Hohlstelle in der Mitte des Messfeldes lokalisieren. Ebenso wie die Fehlstelle in A1 erstreckt sie sich von ca. 15 cm bis 35 cm in x-Richtung und

von ca. 20 cm bis 40 cm in y-Richtung. Während sich die Fehlstelle in Messfeld A1 nach unten hin etwas verjüngt, ist die Fehlstelle in A2 symmetrisch.

An Messfeld A3 sind die Signalamplituden insgesamt kleiner, da die Mörtelbeschichtung hier mit 1,5 cm schon vergleichsweise dick ist. Dementsprechend geringer sind die Änderungen in den Energien (vgl. Bild 193 unten links). Man erkennt zwar größere Energien in der Mitte des Messfeldes, allerdings auch am linken und rechten Rand des untersuchten Bereichs. Eventuell hat sich die Hohlstelle bereits ausgebreitet. Da auch das Messfeld B3, mit der gleichen Fehlertiefe von 1,5 cm aber größerer Fehlerausdehnung, ein vergleichbares Ergebnis zeigt, ist zu vermuten, dass die lokale Resonanzspektroskopie für eine Fehlertiefe von 1,5 cm an Mörtel nur noch bedingt geeignet ist, da Oberflächeneffekte sich in ähnlich großen Signalveränderungen zeigen.

Im Schachtring B wurden größere Fehlstellen eingebaut und deshalb auch das Messfeld vergrößert. Es wurden 169 Punkte auf einem 60 x 60 cm großen Feld abgeklopft. Die Energien der Amplitudenspektren von Feld B1 sind im Bild 193 oben rechts zu sehen. Auch hier kann man die Fehlstelle gut anhand vergrößerter Energien detektieren. Die Fehlstelle erstreckt sich von etwa 10 cm bis 50 cm in x-Richtung und von 5 cm bis 50 cm in y-Richtung. Die detektierte Hohlstelle ist also etwas größer als die angegebene Sollgröße von 40 x 40 cm. Man sieht außerdem, dass sich die Hohlstelle in den Randbereichen schon etwas ausgeweitet hat.

Die Energien der Amplitudenspektren an Messfeld B2 sind im Bild 193 mitte rechts zu sehen. Die Hohlstelle zeigt sich von 10 cm bis 50 cm in x-Richtung und von 5 cm bis fast 55 cm in y-Richtung. Auch hier ist die detektierte Hohlstelle größer als die Sollgröße von 40 x 40 cm.

Wie schon erwähnt, zeigt sich die Hohlstelle weniger deutlich, wenn die Schichtdicke der Mörtelbeschichtung etwa 15 mm beträgt. Wie auch schon bei Messfeld A3 sind die Änderungen in Messfeld B3 geringer und die Hohlstelle nicht mehr eindeutig zu identifizieren (vgl. Bild 193 unten rechts). Die größten Energien zeigen sich hier am linken Rand des Messfeldes. Eine Ausbreitung der Hohlstelle ist jedoch auch nicht ausgeschlossen.

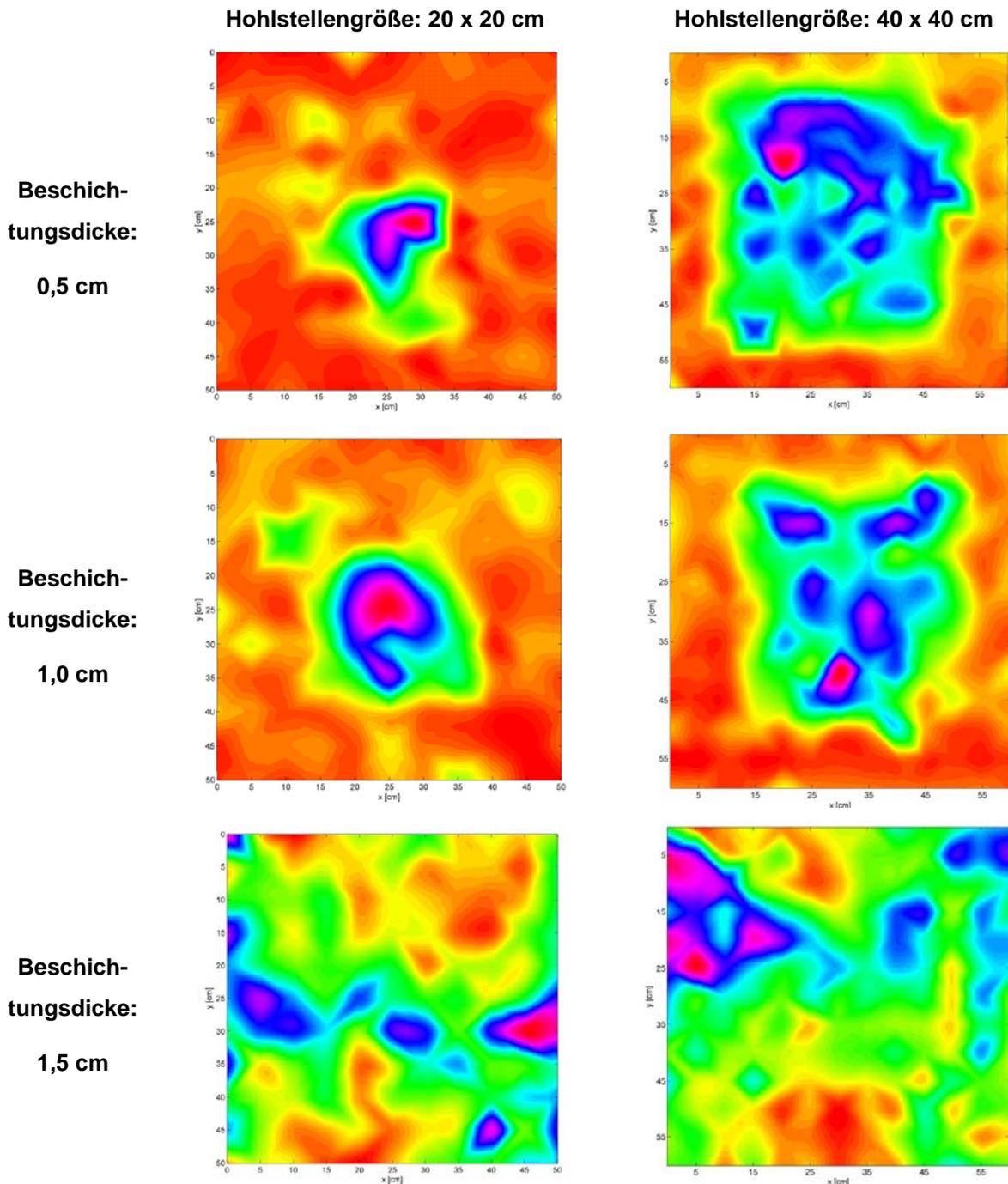


Bild 193 Energie der Amplitudenspektren an sechs Messfeldern: Messfeld A1 (oben links), A2 (mitte links), A3 (unten links), B1 (oben rechts), B2 (mitte rechts) und B3 (unten rechts) [52]

Zusätzlich zu den Messfeldern in den beiden Schachtringen, wurden Messungen in einem im Versuchsstand eingebauten Schacht durchgeführt. Aufgrund der Durchfeuchtung der Schachtwand ist hier der Unterschied zwischen den geschädigten und ungeschädigten Bereichen weniger deutlich zu hören. Das rechte Bild 194 zeigt das Messfeld im Schacht. Man erkennt sehr deutlich Rissbildung im Bereich der rot markierten Hohlstelle und darüber hinaus. Durch die Risse dringt Wasser ein.

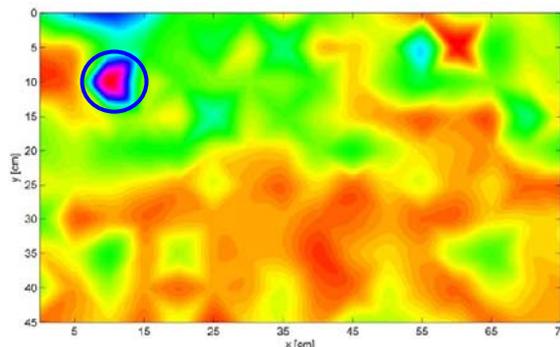


Bild 194 Foto des Messfeldes im Schacht (links) und Darstellung der Halbwertsbreiten der Anregungssignale an der Messstelle im Versuchsstand (rechts) [52]; Innerhalb der roten Markierung im Bild links befindet sich die selbe Stelle wie im linken, oberen Bildbereich der Auswertung innerhalb des blauen Kreises (rechts)

Im Bild 194 rechts sind die Halbwertsbreiten der Anregungssignale zu sehen. Es fällt auf, dass die Halbwertsbreiten in der oberen Hälfte des Messfeldes etwas größer sind als in der unteren Hälfte. Die Trennung scheint entlang des Risses zu laufen, der horizontal durch das Messfeld verläuft. Besonders breit ist das Signal am Punkt mit den Koordinaten (10/10). Hier wurde, bedingt durch das Messfeldraaster, genau auf einen Riss geklopft (vgl. Bild 194, links, rote Markierung), was eine Verlängerung des Signals bewirkt. Hier kann nach Ansicht des Prüfers vermutet werden, dass diese Auffälligkeit in weichem bzw. lösem Material an den Rissflanken begründet liegt.

Wie schon bei den Messfeldern in den Schachtringen, wird nun die Energie der Amplitudenspektren betrachtet. Diese ist in Bild 195 dargestellt, in dem das Ergebnis der Messungen halbtransparent über ein Foto des Messfeldes gelegt wurde. Man erkennt dort rote Bereiche (Bereiche geringer Energie), die ungefähr dem Verlauf der Risse folgen. Eine Anregung in Rissnähe hat also eine verminderte Energie im Klangsignal zur Folge. Der an der Schachtwand markierte Bereich zeichnet sich im Energiebild grün ab. Jedoch ist er ohne Kenntnis der Hohlstelle allein aus den Daten nicht zu identifizieren.

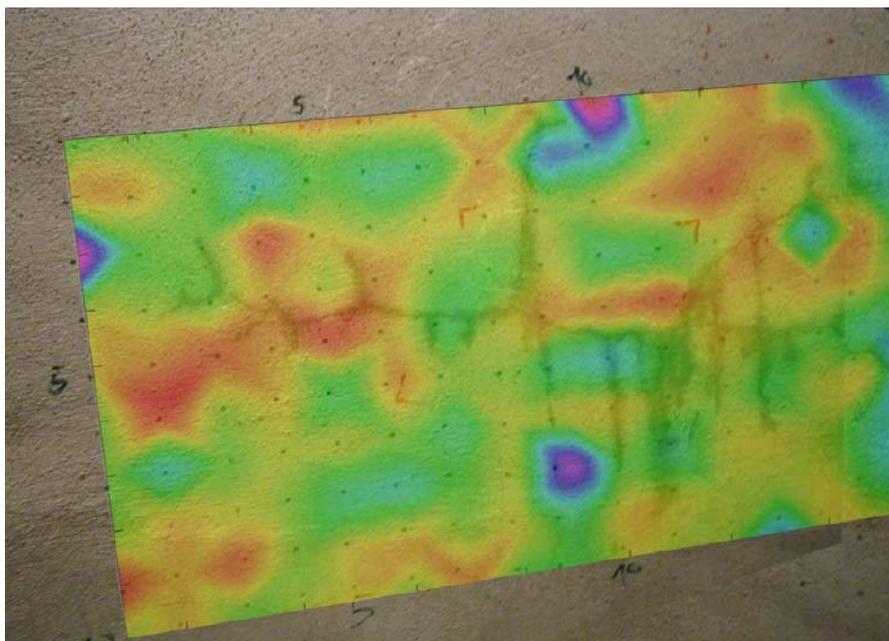


Bild 195 Energien der Amplitudenspektren an der Messstelle im Versuchsstand [52]

Eine genauere Betrachtung der Amplitudenspektren zeigte, dass man Änderungen durch die Hohlstelle im Frequenzbereich zwischen 0,6 kHz und 1,2 kHz sehen konnte. Deshalb wurde nun die Energie der Amplitudenspektren dieses Frequenzbereichs dargestellt. Das Ergebnis ist im Bild 196 zu sehen. Die Lage der planmäßig eingebauten Hohlstelle ist mit schwarzen Linien eingezeichnet. Hier zeichnet sich der Bereich der Hohlstelle deutlicher als gelber/roter Bereich ab. Auch findet man in der unteren Hälfte des Messfeldes weitere rote Bereiche, die neben den Rissen verlaufen. Es ist zu vermuten, dass sich die Hohlstelle entlang der Risse bereits weiter ausgebreitet hat.

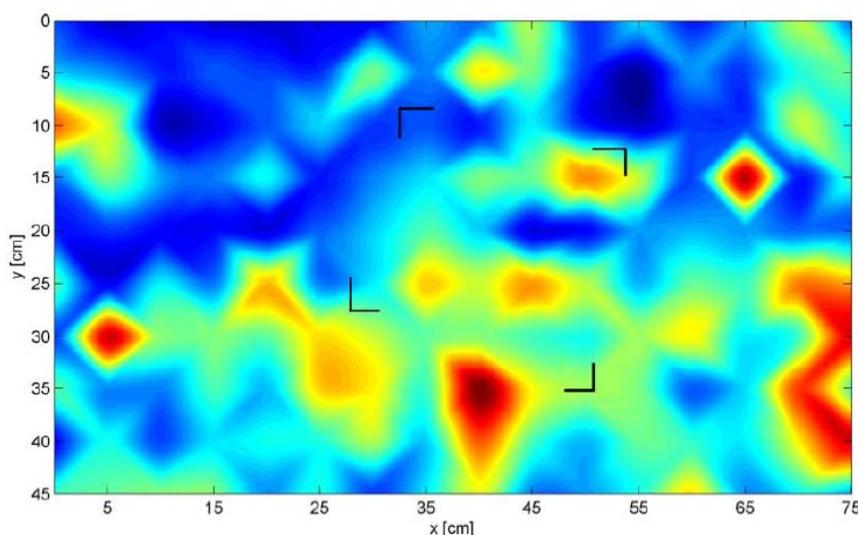


Bild 196 Energien der Amplitudenspektren von 0,6 kHz bis 1,2 kHz an der Messstelle im Versuchsstand [52]

7.5.4 Zusammenfassung

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

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

7.6 Betriebsbelastungen an sanierten Rohreinbindungen

7.6.1 Veranlassung

Bei neu gebauten Abwasserschächten und angeschlossenen Haltungen werden insbesondere Anforderungen an die Dichtheit und Beweglichkeit der einzelnen Bauteile untereinander gestellt (z.B. DIN EN 476 [53]). Vor diesem Hintergrund ist die Frage zu beantworten, ob mit unterschiedlichen Verfahren sanierte bzw. abgedichtete Rohranbindungen die o. g. Anforderungen gemeinsam erfüllen können und welche Reserven die einzelnen Sanierungsvarianten gegenüber Praxisbeanspruchungen bieten.

7.6.2 Versuchsaufbau und -durchführung

Fünf Schachtunterteile mit jeweils drei Rohranbindungen - einmal Beton und zweimal Steinzeug - wurden für Sanierungen verwendet. In jeweils eines der Steinzeugrohre wurde zudem ein Liner-Stück aus GFK eingesetzt.

Vier der Schachtunterteile wurden in ein erdfeuchtes Kies-Sand-Gemisch in Container-Versuchsstände eingebaut (vgl. Bild 197, unten links und rechts). Ein Schachtunterteil stand frei in der Versuchshalle, da diese Rohranbindungen ausschließlich mit Kurzlinern saniert wurden (vgl. Bild 197, links oben) und hierbei ein umgebender Boden für die Sanierung nicht erforderlich war.



Bild 197 Versuchsaufbau für die einzelnen Sanierungen: Freistehender Rohr-Schachtaufbau (oben links); Blick in ein Schachtunterteil (oben rechts); Einbauzustand ohne Boden (unten links); Fertiggestellter Versuchsaufbau (unten rechts)

Um Undichtigkeiten an den Rohranbindungen zu simulieren, wurden die Dichtungen an den Steinzeugrohren sowie im Schachtfutter für die Aufnahme der Betonrohre zur Hälfte entfernt (vgl. Bild 198). Darüber hinaus sind die Rohre an derjenigen Seite in ihrem Scheitel auf einer Länge von etwa 15 cm eingeschnitten worden (vgl. Bild 198, rechts oben und unten), die in das Schachtfutter eingeführt wurde. Nach dem die Schäden in die einzelnen Bauteile eingebracht und die Schachtunterteile mit den Rohren aufgebaut worden waren, wurde je Schachtunterteil ein Liner-Stück aus GFK von etwa 40 cm Länge in ein Steinzeugrohr eingeschoben (vgl. Bild 198, links unten).



Bild 198 Schäden zur Simulation von Undichtigkeiten an Rohrverbindungen: Geschädigte Dichtung für Betonrohr (oben links); Längsschnitt im Betonrohrscheitel (oben rechts); Eingesetzter Liner mit offenem Ringspalt (unten links); Längsschnitt im Steinzeugrohrscheitel (unten rechts)

Die o. a. Undichtigkeiten bzw. Schäden an den Rohranbindungsbereichen wurden von Fachfirmen mit unterschiedlichen Produkten saniert. Die nachfolgend aufgeführten Materialien sind dabei jeweils in einem Schachtunterteil an allen geschädigten Rohranbindungen eingesetzt worden:

- Zweikomponentige Elastomerharze auf Polyurethanbasis (*MC-Konudur 208 und 216*), schnell und stark schäumendes Harz für Vorinjektion, schnell und mäßig schäumendes Harz für die Hauptinjektion;
- Zweikomponentiges Acrylatgel zur Injektion (*Carbo Cryl Wv*);
- Reparaturmörtel (*IPA Unimörtel mit Anmachflüssigkeit epasit Gwickbond*);

- Kurzliner (3-P-Harz mit ECR-Matte 1050 g/m²).

An einem weiteren Schachtunterteil wurden die Abdichtungsmaterialien in Abhängigkeit des Rohrwerkstoffes eingesetzt:

- Steinzeugrohr: Dauerelastische Fuge (*Sikaflex Pro 3 WF*);
- Betonrohr: Epoxidharzmörtel (*Plastikol Multipox K*);
- Steinzeugrohr mit eingeschobenem Liner: Handlaminat (*ungesättigtes Polyesterharz und EPS-Matte 300 g/m²*).

Eine Übersicht zu den sanierten Rohranbindungen in Abhängigkeit des verwendeten Reparaturmaterials enthält Tabelle 64. In der Summe sind dies 15 mit unterschiedlichen Materialien sanierte Rohranbindungen.

Tabelle 64 Sanierungen in Abhängigkeit des Reparaturmaterials

Lfd. Nr.	Schachtunterteilnummer-Rohrmaterial	Reparaturmaterial	Rohrmaterial
1	SU1-B	Polyurethanharz	Beton (B)
2	SU1-S		Steinzeug (S)
3	SU1-SL		Steinzeug-Liner (SL)
4	SU2-B	Acrylatgel	Beton (B)
5	SU2-S		Steinzeug (S)
6	SU2-SL		Steinzeug-Liner (SL)
7	SU3-B	Reparaturmörtel	Beton (B)
8	SU3-S		Steinzeug (S)
9	SU3-SL		Steinzeug-Liner (SL)
10	SU4-B	Kurzliner	Beton (B)
11	SU4-S		Steinzeug (S)
12	SU4-SL		Steinzeug-Liner (SL)
13	SU5-B	Epoxidharzmörtel	Beton (B)
14	SU5-S	Dauerelastische Fuge	Steinzeug (S)
15	SU5-SL	Handlaminat	Steinzeug-Liner (SL)

Die Sanierungen wurden jeweils nach den Vorgaben der einzelnen Materialhersteller durchgeführt. In zwei Fällen waren geringfügige Nacharbeiten erforderlich, da offensichtliche Mängel an den sanierten bzw. abgedichteten Bereichen zu erkennen waren.

Nach Abschluss der Reparaturarbeiten an den Rohranbindungen wurde folgendes Prüfprogramm mit den entsprechenden Beanspruchungen umgesetzt:

1. Dichtheitsprüfung nach DIN EN 1610 [54] (vgl. Bild 199, oben links),

2. bei festgestellter Dichtheit Durchführung einer Kanalreinigung in Anlehnung an DIN 19523 [55] (vgl. Bild 199, oben rechts),
3. erneute Dichtheitsprüfung nach DIN EN 1610,
4. bei festgestellter Dichtheit Abwinkelung der sanierten Rohranbindungen unter Wasserfüllung in Anlehnung an DIN EN 476 bis hin zum Bruch (vgl. Bild 199 unten links und unten rechts).

Sofern Undichtigkeiten an einer sanierten Rohranbindung während der Umsetzung des Prüfprogramms festgestellt wurden, war die Prüfung des Probekörpers beendet.

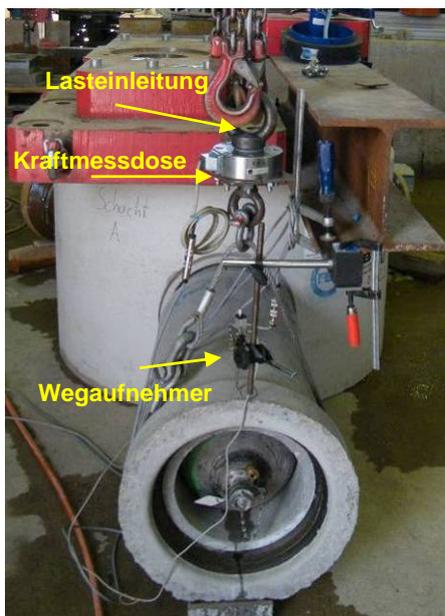


Bild 199 Umsetzung des Prüfprogramms: Vorbereitung einer Dichtheitsprüfung (oben links); Kanalreinigung (oben rechts); Versuchsaufbau für die Abwinkelung (unten links); Abgewinkeltes Betonrohr während des Versuchs (unten rechts)

7.6.3 Versuchsergebnisse

Im Gesamtblick ist festzustellen, dass insbesondere die einfachen und kostengünstigen Arbeiten, z.B. die Verfüllung der Ringräume mit Mörteln, nicht zum Erfolg führ-

ten. Aber auch zeit- und kostenintensivere Injektionsverfahren zeigten nicht immer ein zufriedenstellendes Ergebnis.

Prüfprogramm Nr. 1: Erste Dichtheitsprüfung

Von 15 sanierten Rohranbindungen waren bereits acht bei der ersten Dichtheitsprüfung undicht (vgl. Tabelle 65). In sechs Fällen konnten dabei Undichtigkeiten an den Rohranbindungen während der Befüllung des Schachtunterteils mit Wasser festgestellt werden, zwei weitere hingegen ließen während der Drucksteigerung einen Wasseraustritt erkennen. Beispiele für die Undichtigkeiten finden sich in Bild 200.

Tabelle 65 Undichte Sanierungen bei der ersten Dichtheitsprüfung

Lfd. Nr. (vgl. Tabelle 64)	Schachtunterteilnummer- Rohrmaterial	Reparaturmaterial	Beschreibung Schadstellen
2	SU1-S	Polyurethanharz	Wasseraustritt aus eingebautem Schaden im Rohrscheitel (vgl. Bild 200 unten rechts)
4	SU2-B	Acrylatgel	Wasseraustritt unterhalb Rohrsohle
5	SU2-S		
7	SU3-B	Reparaturmörtel	Wasseraustritt aus umlaufendem Riss im Reparaturmörtel, (vgl. Bild 200 oben links)
8	SU3-S		
9	SU3-SL		
13	SU5-B	Epoxidharzmörtel	Wasseraustritt aus eingebautem Schaden im Rohrscheitel (vgl. Bild 200 oben rechts)
14	SU5-S	Dauerelastische Fuge	Wasseraustritt an Rohrsohle (vgl. Bild 200 unten links)



Bild 200 Beispiele für Undichtigkeiten an den Sanierungen bei der ersten Dichtheitsprüfung: Umlaufender Riss im Reparaturmörtel (oben links); Wasser-austritt an mit Epoxidharzmörtel abgedichteter Schadstelle (oben rechts); Undichtigkeit an dauerelastischer Fuge (unten links); Wasser-austritt an mit Polyurethanschaum/-harz abgedichteter Schadstelle (unten rechts)

Prüfprogramm Nr. 2: Zustand nach Kanalreinigung

Da acht Sanierungen bereits bei der ersten Dichtheitsprüfung undicht waren, konnte nunmehr an sieben noch dichten Rohranbindungen die Betriebsbelastung „Kanalreinigung“ aufgebracht und somit ihre Auswirkung auf die Sanierungen überprüft werden. Tabelle 66 enthält die Sanierungen, die einer Kanalreinigung unterzogen wurden.

Tabelle 66 Probekörper für die Betriebsbelastung „Kanalreinigung“

Lfd. Nr. (vgl. Tabelle 64)	Schachtunterteilnummer- Rohrmaterial	Reparaturmaterial	Rohrmaterial
1	SU1-B	Polyurethanharz	Beton (B)
3	SU1-SL		Steinzeug-Liner (SL)
6	SU2-SL	Acrylatgel	Steinzeug-Liner (SL)
10	SU4-B	Kurzliner	Beton (B)
11	SU4-S		Steinzeug (S)
12	SU4-SL		Steinzeug-Liner (SL)
15	SU5-SL	Handlaminat	Steinzeug-Liner (SL)

In einem Fall - ein mittels Acrylatgel saniertes Steinzeugrohr mit Liner - trat nach ca. zehn Überfahrten der Reinigungsdüse über die Reparaturstelle zwischen Schachtaußenwand und Injektionskörper deutlich sichtbar Wasser aus (vgl. Bild 201). Die sechs weiteren Sanierungen zeigten sich während dieser Betriebsbelastung hingegen unauffällig.

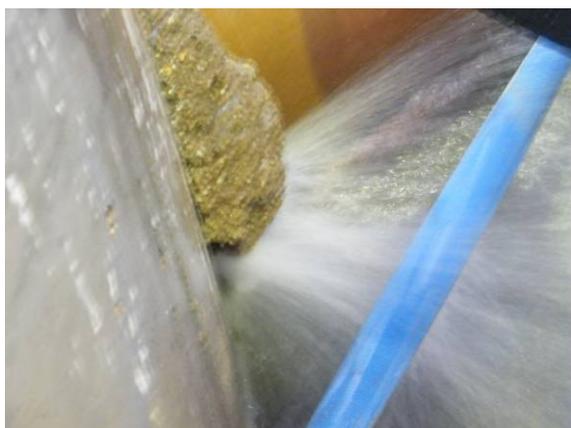


Bild 201 Wasseraustritt während der Kanalreinigung zwischen Rohr und Injektionskörper (links); Abgelöstes Handlaminat (innerhalb roter Markierung) führte zu einer Undichtigkeit (rechts)

Prüfprogramm Nr. 3: Zweite Dichtheitsprüfung

Die auf die Betriebsbelastung „Kanalreinigung“ folgende Dichtheitsprüfung an den zunächst unauffälligen Probekörpern bestanden insgesamt fünf sanierte Rohranbindungen. Bei einer sechsten - ein mittels Handlaminat saniertes Steinzeugrohr mit Liner - wurde unmittelbar nach Aufbringen eines Wasserdrucks von 0,5 bar ein Wasseraustritt aus der Reparaturstelle sichtbar (vergleichbar Bild 200, unten links). Hier ist sehr wahrscheinlich, dass eine partielle Materialablösung (vgl. Bild 201, rechts) die Ursache für diese Undichtigkeit darstellt.

Prüfprogramm Nr. 4: Verhalten unter Abwinklung

An fünf sanierten Rohranbindungen (vgl. Tabelle 67) konnte schließlich die Abwinkelbarkeit der Rohre relativ zum Schacht überprüft werden. Während der einzelnen

Abwinklungsversuche wurden Kraft und Weg messtechnisch erfasst (vgl. Bild 199, unten links).

Nach DIN EN 476 [53] sollen Rohre der hier verwendeten Nennweite DN 300 eine Abwinklung gegenüber dem Schacht von zwei Prozent dicht aufnehmen können. Die Messwerte für die einzelnen Abwinklungen sind den o. g. Sollwerten in nachfolgender Tabelle 67 gegenübergestellt.

Tabelle 67 Messwerte der Abwinklungsversuche

Lfd. Nr. (vgl. Tabelle 64)	Schachtunter- teilnummer - Rohrmaterial	Reparatur- material	max. Kraft* (bei Bruch)	max. Weg (bei Bruch)	Soll-Weg (Abwink- lung, [53])
1	SU1-B	Polyurethan- harz	7,0 kN	58,2 mm	19,0 mm
3	SU1-SL		> 20,0 kN	26,9 mm	9,8 mm
10	SU4-B	Kurzliner	16,5 kN	2,0 mm	20,4 mm
11	SU4-S		38,9 kN	9,4 mm	12,8 mm
12	SU4-SL		26,5 kN	8,2 mm	12,4 mm

* maximale, gemessene Kraft normiert auf einen Abstand von 1 m von der Rohreinbindung

7.6.4 Zusammenfassung

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

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

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

Bei den Injektionen zeigte sich, dass der Abdichtungserfolg ohne anstehendes und somit eindringendes Grundwasser nur schwer sicherzustellen ist. Von sechs durchgeführten Injektionen waren drei bei der ersten Dichtheitsprüfung undicht. Bei der Injektion mit Gelen zeigte sich darüber hinaus, dass Hochdruckstrahlen infolge von Reinigungsmaßnahmen die Dichtwirkung in Abhängigkeit der vorliegenden Randbedingungen zerstören können. Sofern bei einer Injektion mit Harzen die Dichtwirkung anfangs erreicht wurde, so widerstanden diese Stellen auch den Hochdruckreinigungen. Zudem war die Abwinkelbarkeit in den Rohreinbindungen weiterhin gegeben.

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

7.7 Wirtschaftlichkeitsbetrachtungen

In Nordrhein-Westfalen sind etwa 200.000 Schächte (10 % des Gesamtbestandes) schadhaft. Der Sanierungsaufwand beträgt rund 700 Millionen Euro.

Undichte, zugleich aber tragfähige Schächte können mittels Beschichtungsverfahren saniert werden. Eine Vorabdichtung schadhafter Stellen kann unter Umständen erforderlich sein. Sofern angrenzende Haltungen aus baulichen oder hydraulischen Gründen in offener Bauweise zu erneuern sind, werden i. d. R. in einem Arbeitsgang auch die Schächte neu errichtet.

Schachtbeschichtung und Schachterneuerung kommen in unterschiedlichen Situationen zum Einsatz. Insofern besteht im engeren Sinne keine Substitutionsbeziehung zwischen diesen Maßnahmen. Wenn Undichtigkeiten durch Beschichtungsverfahren behoben werden können, ist kein Neubau erforderlich. Sofern in den nachfolgenden Ausführungen die Kosten dieser Verfahren dargestellt werden, geht es folglich nicht darum, die wirtschaftliche Vorteilhaftigkeit des einen oder anderen Verfahrens herauszuarbeiten, sondern Größenordnungen der mit den Maßnahmen verbundenen Investitionen transparent zu machen. Dabei werden Finanzierungskosten und Betriebsaufwendungen während der Nutzungsperiode nicht in die Betrachtung einbezogen. Ebenso bleiben Erträge unberücksichtigt, die den Netzbetreibern aus der Spanne zwischen Zinsaufwand und den höheren, in die Gebührenermittlung einfließenden kalkulatorischen Zinsen zufließen.

Beschichtungsverfahren zeichnen sich dadurch aus, dass die Wiederherstellung von Bauwerken unter Einbeziehung der ursprünglichen Bausubstanz erfolgt und damit vergleichsweise geringfügige und kostengünstige Eingriffe möglich sind (kleine Baustelleneinrichtung, kein Straßenaufbruch, i. d. R. keine Abwasserhaltung usw.).

Des Weiteren sind Beschichtungssanierungen aufgrund der geringfügigen Auswirkungen auf überirdische Verkehrsströme, aber auch im Hinblick auf Lärmemissionen, Baustellendauer u. a. m. bürgerfreundliche Verfahren.

Die Kosten der Schachtbeschichtung werden nachfolgend anhand der angefallenen Kosten für die im Großversuchsstand durchgeführten Maßnahmen dargestellt. Hier wurden knapp sechs Meter tiefe Schächte mit etwa 18 m² Fläche beschichtet. Auf Baustellen können zusätzliche Leistungen erforderlich werden, bspw. der Ersatz der Steigbügel. Die damit verbundenen Kosten hat das IKT bei Netzbetreibern erfragt.

Je nach Baustellensituation, regionaler Preislage sowie in Abhängigkeit von weiteren Faktoren können die hier angeführten Kosten variieren. Hierdurch sind einer verallgemeinerten Verwendung Grenzen gesetzt.

Die Bruttokosten für die Schachtbeschichtung einschließlich der Untergrundvorbereitung liegen, bezogen auf einen Quadratmeter Beschichtungsfläche, zwischen 90 Euro/m² und 475 Euro/m². Der Durchschnitt liegt bei 248 Euro/m².

Insgesamt lassen sich drei Preissegmente erkennen:

- 90 bis 150 Euro/m²: vier Anbieter bzw. Verfahren (3 x Mörtel, 1 x Kunststoff)
- 240 bis 300 Euro/m²: vier Anbieter bzw. Verfahren (1 x Mörtel, 3 x Kunststoff)
- 440 bis 480 Euro/m²: zwei Anbieter bzw. Verfahren (1 x Mörtel, 1 x Kunststoff)

Auffällig ist, dass Angebote, in denen eine bis drei Leistungspositionen ausgewiesen sind, durchweg in das untere bis mittlere Kostensegment fallen. Bei ausdifferenzierter Leistungsdarstellung (vier bis neun Leistungspositionen) finden sich die Angebote ausschließlich im mittleren bis oberen Kostensegment.

Geht man davon aus, dass Pauschal- bzw. wenig ausdifferenzierte Angebote auf die Sanierungssituation im IKT-Großversuchsstand zugeschnitten sind und für den realen Sanierungsfall eher ausdifferenzierte Leistungs- und Kostendarstellungen zu erwarten sind, dann ergibt sich bei Ausblendung der Pauschalangebote eine Kostenspanne für Beschichtungen in Höhe von 240 bis 480 €/m² (Mörtel: 240 bis 480 €/m²; Kunststoff: 260 bis 440 €/m²).

Die auf diese Weise ermittelten Durchschnittskosten für die Schachtbeschichtung einschließlich der Vorbereitung des Untergrundes betragen 334 € je m² Beschichtungsfläche.

Weitere Kosten können für die Abdichtung undichter Stellen auftreten, bspw. durch Injektionsverfahren. Dabei spielt der im Einzelfall vorfindbare Zustand des Schachtes eine wesentliche Rolle. Bei hier angenommenen Bruttokosten von 900 Euro für die Abdichtung eines Schachtes erhöhen sich die Kosten um 50 Euro je m² Beschichtungsfläche.

Schließlich sind in Abhängigkeit von der Baustellensituation auch Leistungen zu berücksichtigen, die bei der Schachtsanierung im IKT-Großversuchsstand keine Rolle spielen. Beispielfhaft lassen sich das Entfernen und der Neueinbau von Steigbügel, das Aufarbeiten der Bermen oder das Reprofilieren und Abdichten von Schachtringfugen anführen. Die Kosten für derartige **Zusatzleistungen** sind den oben genannten Kosten hinzuzurechnen. Überschlüssig ermittelt erhöhen sich die auf die Beschichtungskosten je Quadratmeter umgelegten Bruttokosten wie folgt:

- 5 Steigbügel ausbauen, entsorgen, liefern, einbauen:
23 € je m² Beschichtungsfläche
- 0,8 m² Schachtsohle aufarbeiten:
7 € je m² Beschichtungsfläche

- 5 x 3,14 m Ringfuge aufstemmen, aufarbeiten, verpressen:
47 € je m² Beschichtungsfläche

Mit dem Versuchsaufbau des IKT wird u. a. das Ziel verfolgt, Einsatzgrenzen für Beschichtungsverfahren sichtbar zu machen. Die Sanierung der mit komplexen Schadensbildern vorbereiteten Schächte lässt erkennen, dass sich die bestehenden Einsatzbereiche bei sorgfältiger Vorbereitung des Schachtuntergrundes noch erweitern lassen. Der damit verbundene Mehraufwand schlägt sich möglicherweise in höheren Kosten nieder. Da bei besserer Ausführungsqualität geringere Gewährleistungskosten zu erwarten sind, steigen die Gesamtkosten der ausführenden Unternehmen nicht zwangsläufig um den Betrag des Mehraufwandes. Überdies spielt für die Angebotspreise die Wettbewerbssituation eine Rolle: Sofern sich höhere Preise am Markt nicht durchsetzen lassen, geht ein möglicherweise anfallender Mehraufwand zu Lasten der Gewinne der ausführenden Unternehmen. Daher werden die Kosten, die möglicherweise mit der Verbesserung der Sanierungsqualität einhergehen, hier nicht einbezogen.

In der Gesamtbetrachtung belaufen sich damit die durchschnittlichen Gesamtkosten einer Beschichtung inkl. Abdichtung und Zusatzleistungen auf rd. 460 € je m² Beschichtungsfläche (Bild 202). Diese Kosten beziehen sich jedoch auf die hier betrachteten Schächte mit 18 m² Innenfläche unter den vorhandenen Randbedingungen.

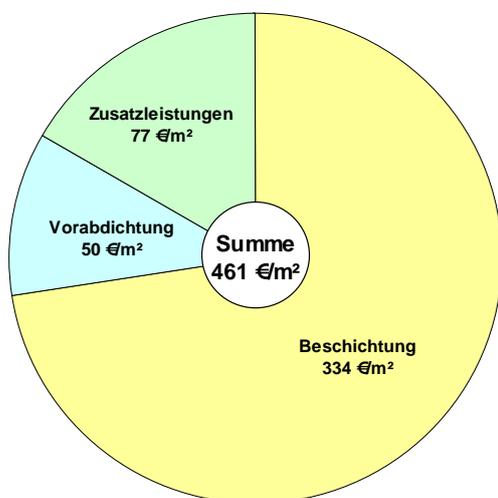


Bild 202 Durchschnittliche Kosten der Schachbeschichtung je m² Beschichtungsfläche (Schächte im Beispiel mit 18 m² Beschichtungsfläche)

Für die Schachterneuerung konnten im Rahmen einer begleiteten Maßnahme insgesamt Kosten von 833 €/m² ermittelt werden. Hierin enthalten sind die Kosten für Straßenbauarbeiten, für den Abriss und die Entsorgung des Altschachtes, sowie für den Neuaufbau mit den zugehörigen Leitungseinbindungen. Somit sind bei den hier betrachteten Beispielen die Kosten für den Neubau etwa doppelt so hoch wie für eine Beschichtungsmaßnahme.

Bei der Beurteilung der Wirtschaftlichkeit von Schachtbeschichtungen im Vergleich zur Erneuerung sind neben den Investitionskosten weitere Faktoren von Bedeutung. Hier sind zunächst Abschreibungszeiten und zu erwartende Nutzungsdauern zu nennen. Schachtbeschichtungen werden ungefähr seit 25 Jahren am Markt angeboten. Empirische Daten über die zu erwartenden Nutzungsdauern der aktuell zum Einsatz kommenden Verfahren liegen allerdings nicht vor. DIN EN 752 [19] unterscheidet bei der Kanalsanierung drei unterschiedliche Einzelgruppen:

- **Reparatur:**
Maßnahmen zur Behebung örtlich begrenzter Schäden.
- **Renovierung:**
Maßnahmen zur Verbesserung der aktuellen Funktionsfähigkeit von Abwasserleitungen und -kanälen, unter vollständiger oder teilweiser Einbeziehung ihrer ursprünglichen Substanz.
- **Erneuerung:**
Herstellung neuer Abwasserleitungen und -kanäle in der bisherigen oder einer anderen Linienführung, wobei die neuen Anlagen die Funktion der ursprünglichen Abwasserleitungen und -kanäle einbeziehen

Eine Schachtbeschichtung ist demnach der Gruppe der Renovierung zuzuordnen. In den KVR-Leitlinien [56] werden für die Durchführung von Kostenvergleichsrechnungen Nutzungsdauern für diese Gruppe zwischen 25 und 50 Jahren empfohlen. Diese Spannweite verdeutlicht bereits die Problematik. Je nach Standort des Bauwerkes, Netzbetreiber oder örtlichen Randbedingungen kann dieser Zahlenwert deutlich variieren. Darüber hinaus werden für dynamische Kostenvergleichsrechnungen auf Basis der KVR-Leitlinien Angaben zu Preissteigerungen, Inflationsraten und auch langfristigen Zinssätzen benötigt [56].

Ferner ist in Bezug auf die Abschreibungsdauern zu berücksichtigen, dass gerade bei langfristigen Investitionen die tatsächliche Nutzungsdauer und die Abschreibungsdauer voneinander abweichen können. Wenn bspw. aus Gründen der kaufmännischen Vorsicht verkürzte Abschreibungsdauern gewählt werden, fallen während der Abschreibungszeit überhöhte Kosten an, während danach stille Reserven bestehen (Abschreibungsdauer < Nutzungsdauer). Das Mehr an kaufmännischer Sicherheit führt dazu, dass heutige Gebührenzahler im Vergleich zu künftigen Generationen übermäßig belastet werden. Der Idealfall übereinstimmender Nutzungs- und Abschreibungszeiträume ist nur theoretischer Natur. Nicht auszuschließen ist ebenfalls, dass angesetzte Abschreibungszeiträume in der Nutzung nicht erreicht werden (Abschreibungsdauer > Nutzungsdauer), was mit einer übermäßigen Verlagerung von Kosten auf künftige Generationen einhergeht. Je langfristiger die Investitionen angelegt sind, desto höher ist das Risiko, den Idealfall zu verfehlen. Weniger langfristig laufende Investitionen lassen sich als risikoärmer einstufen. Zudem besteht Reinvestitionszeitpunkt die Möglichkeit den technischen Fortschritt zu nutzen und dementsprechend auf innovative Produkte oder sogar Konzepte zurückzugreifen.

Vor dem Hintergrund von Laufzeit und Risiken besteht ein interessanter Aspekt in der Untersuchung etwaiger Zusammenhänge zwischen der Qualität neu errichteter Schächte und später eintretender Sanierungsbedarfe. Lässt sich ein solcher Zusammenhang empirisch nachweisen, dann ist zu hinterfragen, inwiefern durch Maßnahmen der Qualitätssicherung Sanierungen – und damit Betriebsaufwendungen sowie vorzeitige Ersatzinvestitionen – vermieden werden können. Wirtschaftlich sinnvoll sind Maßnahmen der Qualitätssicherung, solange die damit verbundenen Kosten geringer sind, als die vermiedenen Sanierungskosten. Es geht folglich nicht um eine vollständige Vermeidung von Sanierungen, sondern um eine Optimierung, bei der die Summe aus den Kosten der Qualitätssicherung und den Kosten der Sanierung minimiert werden.

Zur Herausarbeitung der Kausalzusammenhänge zwischen Qualitätssicherung und Sanierung sowie zur Erarbeitung einer wirtschaftlich sinnvollen Optimierungsstrategie sind empirische Untersuchungen erforderlich. 200.000 schadhafte Schächte in Nordrhein-Westfalen stellen sicherlich eine hinreichend große Datenbasis dar. Mit Blick auf die Dimension des volkswirtschaftlichen Aufwandes zur Wiederherstellung intakter Abwasserschächte lassen sich hier Wirtschaftlichkeitsreserven in beachtlicher Höhe vermuten.

8 Planungshinweise und Empfehlungen

8.1 Qualitätssicherung Schachtbeschichtung

8.1.1 Anwendungsbereich

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

8.1.2 Sanierungsplanung

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

Zustandserfassung:

Die Zustandserfassung sollte nach dem Kodiersystem der DIN EN 13508-2 [57] in Verbindung mit dem DWA M 149-2 [58] erfolgen. Erforderlichenfalls kann im Sinne einer höheren Verständlichkeit auch der Auftraggeber Kurzbezeichnungen zur Zustandsbeschreibung vorgeben. Zur Dokumentation der Schäden sollte das Sanierungsprotokoll (vgl. Abschnitt 8.1.7) genutzt werden.

Sanierungsziele:

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

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

sich insbesondere die Frage nach der Beständigkeit der vorgenannten Trag-/Schutz- und Dichtwirkung unter mechanischen und biologisch-chemischen Angriffen.

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

Qualitätsanforderungen:

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

Beschichtungsmaterial:

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

Termine:

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

Abnahmeschwerpunkt:

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

Maximale Hohlstellengröße:

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

Risse in Mörtelbeschichtungen:

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

Haftzugfestigkeit:

In [10] und [29] sind Mindestwerte für die Haftzugfestigkeiten von Beschichtungen festgelegt. Die Ergebnisse des Forschungsprojektes zeigten jedoch, dass die Bedeutung der Haftzugfestigkeit für polymere und mineralische Beschichtungen unterschiedlich zu bewerten ist. Materialsteifigkeit, Hohlstellengröße, Grundwasserstand und Haftzugfestigkeit wirken stets gemeinsam.

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

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

Erforderliche Prüfungen:

Bereits in der Planungsphase kann festgelegt werden, welche Prüfungen im Rahmen der Baumaßnahme durchgeführt werden sollen. Hierbei kann auf die Übersicht im Abschnitt 8.1.6 zurückgegriffen werden. Bereits bei der Sanierungsplanung kann der vorgesehene Prüfumfang im Sanierungsprotokoll (vgl. Abschnitt 8.1.7) festgehalten werden.

8.1.3 Untergrundvorbereitung

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

Tragfähigkeit des Untergrundes

Zur Wiederherstellung der Tragfähigkeit des Untergrundes ist zunächst das nichttragfähige oder korrosionsgeschädigte Material abzutragen. Gegebenenfalls muss die Resttragfähigkeit des Schachtbauwerkes beurteilt werden. Der Einsatz von Beschichtungsverfahren setzt i.d.R. einen sauberen und vollflächig tragfähigen Untergrund voraus. Die notwendigen Vorbereitungsmaßnahmen hängen dann vorwiegend vom Zustand des Schachtbauwerkes ab und erst in zweiter Linie von dem einzusetzenden Beschichtungsverfahren. So sind Schmutzstoffe stets zu entfernen, z.B. mit Heißwasser-Hochdruckstrahlen (Fettentfernung, lose Partikel). Bei Korrosion ist der vorgeschädigte Untergrund unbedingt abzutragen, z.B. mit Feststoff- oder Höchstdruckstrahlen (Aufräumen des Gefüges, Freilegen des Korngerüsts). Nach der Untergrundvorbereitung können Abreißprüfungen durchgeführt werden, um maximal mögliche Haftzugfestigkeiten abzuschätzen. Mögliche Prüfungen mit Bezug zur Tragfähigkeit des Untergrundes sind Abschnitt 8.1.6 zu entnehmen.

Dichtheit

Für die Durchführung einer Beschichtungsmaßnahme ist das Schachtbauwerk unabhängig vom vorgesehenen Beschichtungsmaterial bei anstehendem Grundwasser temporär abzudichten. Die bei Abdichtungsmaßnahmen eingesetzten Werkstoffe müssen dann an den Kontaktflächen zum Untergrund und ggf. zur Beschichtung

ebenfalls einen sicheren Verbund eingehen. Derartige Maßnahmen sind daher im Sanierungsprotokoll (vgl. Abschnitt 8.1.7) zu vermerken. So kann an diesen Stellen bei der Abnahme genauer auf Hohlstellen und Undichtigkeiten, z.B. Risse, geachtet werden.

Ebenheit

Insbesondere maschinell aufgetragene Beschichtungen fordern einen weitgehend ebenen Untergrund. Hier sind dann Reprofilierungen erforderlich. Da auch hier zu meist vom Beschichtungsmaterial abweichende Materialien verwendet werden, sind die Stellen der Reprofilierung im Sanierungsprotokoll (vgl. Abschnitt 8.1.7) zu vermerken.

8.1.4 Beschichtung

Die Qualitätsanforderungen und wesentliche Terminvorgaben werden bereits bei der Sanierungsplanung festgelegt (vgl. Abschnitt 8.1.2). Bei der Beschichtung sind diese sorgfältig zu überprüfen. Die Beschichtung muss unbedingt zeitnah nach einer Abdichtung durchgeführt werden, um erneute Undichtigkeiten zu vermeiden. Unmittelbar vor Beschichtung sollten der Zustand des Schachtes begutachtet, und stichprobenartig die bis dahin erstellten Sanierungsprotokolle kontrolliert werden. Für Mörtelbeschichtungen sind unbedingt in Abhängigkeit des Schachtklimas Maßnahmen zur Nachbehandlung festzulegen. Von besonderer Bedeutung sind auch örtliche Randbedingungen, wie beispielsweise Temperatur, Sonneneinstrahlung, Wind, Staubbelastung, Luftfeuchtigkeit und auch Taupunktabstände. Mögliche Prüfungen zur Beschichtung sind Abschnitt 8.1.6 zu entnehmen.

8.1.5 Abnahmen

Die Qualitätsanforderungen und wesentliche Terminvorgaben für die Bau- bzw. Gewährleistungsabnahmen werden bereits bei der Sanierungsplanung festgelegt (vgl. Abschnitt 8.1.2). Mögliche Prüfungen im Rahmen der Abnahme sind Abschnitt 8.1.6 zu entnehmen.

8.1.6 Prüfungen zur Qualitätssicherung

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

Tabelle 68 Prüfung der Untergrundvorbereitung

Ziel	Nr.	Prüfung	Durchführung nach / mittels	Ergebnis
Tragfähigkeit des Untergrundes	U1	Oberflächenzugfestigkeit	DAfStb-Instandsetzungsrichtlinie [10]	<ul style="list-style-type: none"> Abreißspannung Abschätzung der erreichbaren Haftzugfestigkeiten
	U2	Schmidthammer	DIN EN 12504-2 [59]	<ul style="list-style-type: none"> Druckfestigkeit Untergrund
	U3	Karbonatisierungstiefe	Indikatorrest über die Wanddicke	<ul style="list-style-type: none"> Nachweis lösender Angriff
	U4	Sulfatgehalt	nichtdispersive Infrarotspektroskopie an Bohrmehlproben	<ul style="list-style-type: none"> Nachweis treibender Angriff
Beurteilung der Beschichtungsfähigkeit der Oberfläche	U5	Haptische Kontrolle	Herstellervorgaben	<ul style="list-style-type: none"> Feststellen absandender, loser und milderfester Bestandteile
	U6	Optische Prüfung	Herstellervorgaben	<ul style="list-style-type: none"> Oberflächenrauigkeit Unregelmäßigkeiten Abdichtungserfolg Ebenheit der Innenflächen (Reprofilierung)
	U7	Indikatorrest	Herstellervorgaben	<ul style="list-style-type: none"> pH-Wert Öl- oder Fettrückstände

Tabelle 69 Prüfung der Beschichtung

Ziel	Nr.	Prüfung	Durchführung nach / mittels	Ergebnis
Zulässigkeit der Umgebungsbedingungen	B1	Klimamessung	DAfStb-Instandsetzungsrichtlinie [10]	<ul style="list-style-type: none"> Temperatur Luftfeuchtigkeit Wind Sonne/Schatten
	B2	Messungen an der Bauteiloberfläche		<ul style="list-style-type: none"> Taupunkt Oberflächenfeuchte
Materialkennwerte Kunststoffe	B3	Zugversuch	z.B. DIN EN ISO 527 [60]	<ul style="list-style-type: none"> Zugfestigkeit
	B4	Shore-Härte	z.B. DIN 53505 [61]	<ul style="list-style-type: none"> Materialhärte
	B5	Materialzusammensetzung	Infrarotspektroskopie	<ul style="list-style-type: none"> Nachweis über Qualität des eingesetzten Materials
Materialkennwerte Frischmörtel	B6	LP-Versuch	DIN EN 1015-7 [62]	<ul style="list-style-type: none"> Luftporengehalt
	B7	Konsistenzprüfung	DIN EN 1015-3 [63] und -6 [64]	<ul style="list-style-type: none"> Ausbreitmaß
Materialkennwerte Festmörtel	B8	Biegezugprüfung	DIN EN 196-1 [65]	<ul style="list-style-type: none"> Biegezugfestigkeit
	B9	Druckprüfung		<ul style="list-style-type: none"> Druckfestigkeit
	B10	Porengehalt	Quecksilberporosimetrie	<ul style="list-style-type: none"> Mörtelqualität

Tabelle 70 Abnahmeprüfung

Ziel	Nr.	Prüfung	Durchführung nach / mittels	Ergebnis
Beurteilung der Beschichtungs- oberfläche	A1	Haptische Kontrolle	Auftraggeber- vorgaben	<ul style="list-style-type: none"> • Feststellen absandender, loser und milderfester Bestandteile
	A2	Optische Prüfung	Auftraggeber- vorgaben	<ul style="list-style-type: none"> • Oberflächenstruktur • Farbunterschiede • Fehlendes Beschichtungsmaterial • Risse • Blasen • Undichtigkeiten
Verbundkontrolle/ Schichtdicken- kontrolle	A3	Abklopfen	Schlosserhammer (Gewicht: 100-200g)	<ul style="list-style-type: none"> • Lage von Hohlstellen • Größe von Hohlstellen
	A4	Haftzugprüfung	DAfStb- Instandsetzungs- richtlinie [10]	<ul style="list-style-type: none"> • Haftzugfestigkeit • Schichtdicke

8.1.7 Muster Sanierungsprotokolle

Auf Basis der vorgenannten Punkte wurde ein Musterprotokoll entworfen, welches die wesentlichen Qualitätssicherungs-Maßnahmen dokumentiert (vgl. Bild 203). Das Protokoll umfasst die Planung, die Untergrundvorbereitung, die Beschichtung und die Abnahmen. Das Protokoll für die Planung kann beispielsweise auch ergänzend den Ausschreibungsunterlagen hinzugefügt werden, um die Randbedingungen und die Anforderungen an die Beschichtung für die ausführende Firma zu verdeutlichen. Ergänzt werden können diese Protokolle durch eine Übersichtsskizze zum Schachtbauwerk (vgl. Bild 204). Diese kann den Protokollen als Anlage beigelegt werden.

Musterprotokoll Qualitätssicherung Schachtbeschichtung



Sanierungsplanung:		www.IKT.de	
Untergrundvorbereitung:		Bauabnahme:	
Beschichtung:		Gewährleistungsabnahme:	
Sanierungsmaßnahme:	Prüfgegenstand:	Vorgang	Termine
		Untergrundvorbereitung:	
		Beschichtung:	
		Bauabnahme:	
		Gewährleistungsabnahme:	
Sanierungsziele		Tragfähigkeit:	
		Dichtheit gegen Medium:	
		Dichtheit gegen Grundwasser:	
		Korrosionsbeständigkeit:	
Verfahren zur Untergrundvorbereitung:		Abdichtungs-/ Reprofilierungsmaterialien:	Beschichtungsmaterial:
Schwerpunkt der Abnahme bei der		Bauabnahme:	
		Gewährleistungsabnahme:	
Anforderungen an die Sanierungs- bzw. Beschichtungsqualität:			
zulässige Hohlstellengröße:	Geringfügige Risse zulässig:	geforderte Haftzugfestigkeit:	
Prüfungen			
Prüfung der Untergrundvorbereitung:			
Nummer	Prüfung	Umfang	
U1	Oberflächenzugfestigkeit		
U2	Schmidthammer		
U3	Karbonatisierungstiefe		
U4	Bohrmehlproben (Sulfatgehalt)		
U5	Haptische Kontrolle		
U6	Optische Prüfung		
U7	Indikatortests (pH-Wert, Öl, Fett)		
Prüfung der Beschichtung:			
Nummer	Prüfung	Umfang	
B1	Klimamessungen		
B2	Messungen an der Bauteiloberfläche		
B3 bis B10	Materialkennwerte		
Abnahmeprüfung:			
Nummer	Prüfung	Umfang	
A1	Haptische Kontrolle		
A2	Optische Prüfung		
A3	Abklopfen		
A4	Haftzugprüfung		

Erforderlichenfalls ist auf Anlagen zu verweisen!

Anlagen:

- A1: _____
- A2: _____
- A3: _____
- A4: _____
- A5: _____

(Unterschrift)

Bild 203 Musterprotokoll für Planung, Untergrundvorbereitung, Beschichtung und Abnahmen

Protokoll Qualitätssicherung Schachtbeschichtung

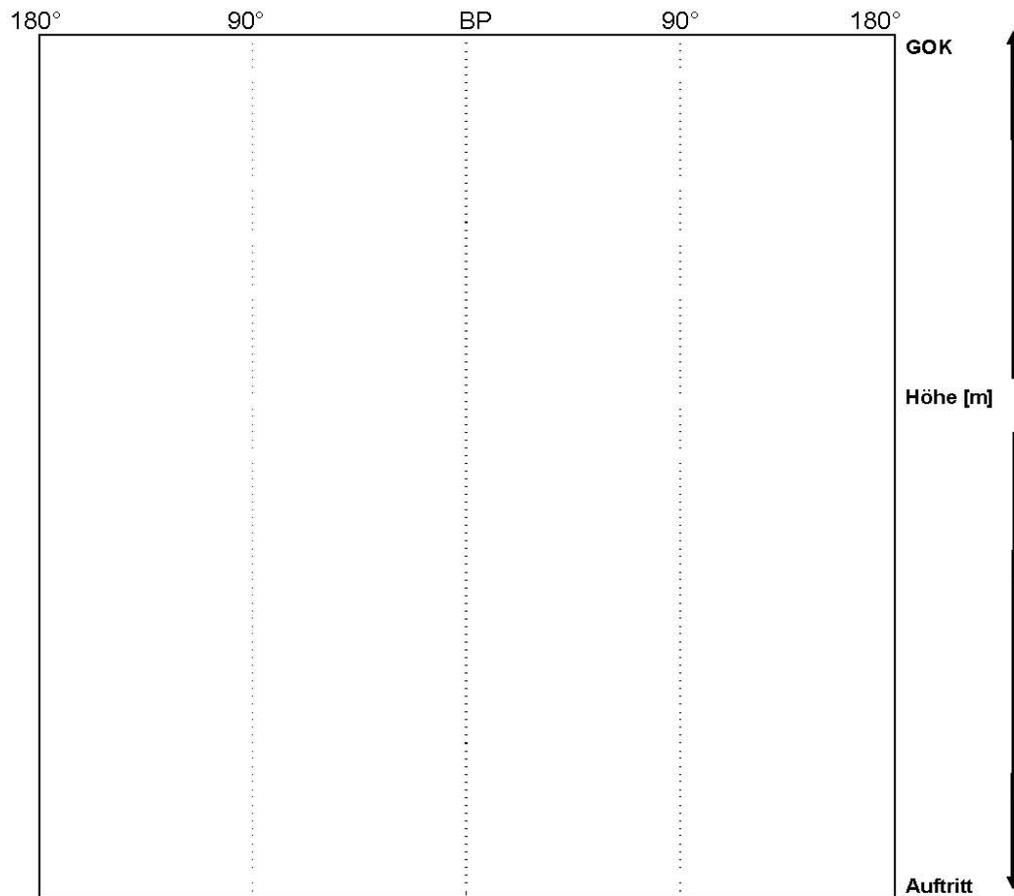
Übersichtsskizze



Sanierungsmaßnahme:	Prüfgegenstand:	Anlage zur:	
		Planung	
		Untergrundvorbereitung	
		Beschichtung	
		Bauabnahme	
		Gewährleistungsabnahme	

Abgerollte Mantelfläche der Schachtwand zur Kennzeichnung der Lage von Schadstellen, Prüfstellen, Steigeisen und Seitenzuläufen, Packerbohrungen bzw. Injektionsstellen, etc.:

Bezugspunkt (BP, z.B. Steigeisengang): _____



Legende:

Anlagen:

(Unterschrift)

Bild 204 Übersichtsskizze zum Schachtbauwerk

8.2 Schulungsprogramm

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

Modul 1: Der Abwasserschacht

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

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

Modul 2: Materialien und Verfahren zur Abwasserschachtsanierung

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

- Materialien und Verfahren zur Abdichtung von Rohreinbindungen
- Materialien und Verfahren zur Abdichtung von Schachtkörpern
- Verfahren zur Untergrundvorbereitung
- Mineralische Beschichtungssysteme
- Polymere Beschichtungssysteme
- Besonderheiten einzelner Verfahren, Materialien und Systeme

Modul 3: Planung und Ausschreibung einer Abwasserschachtsanierung

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

- Grundsätzliche Ziele einer Abwasserschachtsanierung
- Auswahl von Beschichtungssystemen und -qualitäten anhand von Zielvorgaben
- Auswahl und Bewertung von Qualitätssicherungsmaßnahmen

- Auswirkung von Hohlstellen bei Schachtbeschichtungen
- Ausschreibung von Schachtsanierungsmaßnahmen

Modul 4: Ausführung von Abwasserschachtsanierungen

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

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

Modul 5: Bau- und Gewährleistungsabnahme von Abwasserschachtsanierungen

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

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

Schulungsmethoden

Neben den auch sonst üblichen Vorträgen und Arbeitsgruppen liegen besondere Schwerpunkte auf Schulungsblöcken mit erheblichem Praxisbezug. So werden die aus den Großversuchen gewonnenen Exponate zu Beschichtungen und Abdichtungen ausführlich zur Erläuterung von qualitätsrelevanten Einflüssen auf das Sanierungsergebnis herangezogen. Ergänzend werden Baustellen aufgesucht, um die Situation vor Ort besser einschätzen zu können und konkrete Ausführungshinweise aus der Praxis zu erhalten. Schließlich werden Beispielsanierungen mit unterschiedlichen Materialien sowie entsprechende Prüfungen zur Qualitätssicherung von den Kursteilnehmern durchgeführt. Hier soll ein Einblick in die Tätigkeiten der Sanierung, von der Abdichtung, Reprofilierung und Untergrundvorbereitung über die Beschichtung bis zur Prüfung gewährt werden, um später vor Ort entsprechende Tätigkeiten und Vorgänge besser beurteilen zu können. Unterstützt und begleitet wird die Schulung durch die Arbeit in Gruppen zur selbstständigen Lösung praxisbezogener Fragestellungen.

Abschlussprüfung

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

9 Fazit

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

Abdichtungsmaßnahmen als Vorbereitungsmaßnahme geeignet

⇒ **Langzeitwirkung bleibt allerdings zweifelhaft**

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

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

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

Mörtel sind robust, zeigten aber vielfach optische Mängel

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

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

planmäßig geschwächt wurde⁵. Wandungsbrüche infolge des Außenwasserdruckes wurden nicht festgestellt. Dies wurde weitgehend auf die geometrischen Verhältnisse zurückgeführt, d.h. die große Wanddicke und damit Steifigkeit sowie die stabilisierende Kreisform der Beschichtung. Im Zusammenspiel mit dem Altschacht wird der Außenwasserdruck dann über Druckspannungen in der mineralischen Beschichtung abgetragen.

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

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

Kunststoff bietet viel, mit hohen Ansprüchen an Technik und Ausführung

⇒ **nur bei guter Vorbereitung stets dicht**

Polymere Beschichtungen lieferten bei einwandfreier Untergrundbeschaffenheit und sorgfältiger Ausführung gute Ergebnisse. Hier traten lediglich bei einigen Produkten punktuelle Schäden auf, z.B. sog. Pinholes⁶. Wurde der Verbund im Versuch allerdings planmäßig geschwächt⁵, so bildeten sich infolge des Außenwasserdruckes z.T. Blasen. Diese vergrößerten sich in einigen Fällen soweit, dass sie auch Bereiche mit hohen Haftzugfestigkeiten erfassten.

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

Vollflächiger Verbund entscheidet über Qualität

⇒ **Haftzugwerte bieten nur zusätzliche Sicherheit**

Insbesondere bei polymeren Beschichtungen ist ein vollflächiger Verbund wichtiger als bereichsweise hohe Haftzugwerte. Auch Werte von mehr als 1,5 N/mm² schütz-

⁵ Das Trennmittel wurde durch das IKT an diesen Stellen vor einer Beschichtung aufgetragen, um erste Hinweise zur „Robustheit“ des Sanierungssystems gegenüber unplanmäßigen Verbundschwächen zu erfassen, wie sie in der Praxis bei fehlender Untergrundvorbehandlung auftreten können. Eine genaue Beschreibung findet sich in Abschnitt 6.1.

⁶ Hierbei handelt es sich um stecknadelkopfgroße Inhomogenitäten in der Beschichtung, welche auch zu Undichtigkeiten führen können.

ten nicht vor einer Ausweitung bereits vorhandener Blasen bzw. Ablösungen⁵. Bei vollflächigem Verbund wurden keine Schäden beobachtet.

Die in den Laborversuchen im Maßstab 1:1 untersuchten mineralischen Beschichtungen wiesen demgegenüber mittlere Haftzugfestigkeiten im Bereich von 0,5 bis 1,3 N/mm² auf. Bei vergleichsweise geringen Werten wurden zwar verstärkt Rissbildungen und Feuchteffahnen beobachtet, jedoch mit geringen Auswirkungen auf die Dichtwirkung – selbst an Hohlstellen.

Infiltrationsrisiko: Umläufigkeiten an Steigbügeln

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

Verfahrensauswahl wird durch Sanierungsziel dominiert

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

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

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

Vorbereitungsmaßnahmen hängen vom Schachtzustand ab

Der Einsatz von Beschichtungsverfahren setzt i.d.R. einen sauberen, weitgehend trockenen und vollflächig tragfähigen Untergrund voraus. Die notwendigen Vorbereitungsmaßnahmen hängen dann vorwiegend vom Zustand des Schachtbauwerkes ab und erst in zweiter Linie von dem einzusetzenden Beschichtungsverfahren. So sind Schmutzstoffe stets zu entfernen, z.B. mit Heißwasser-Hochdruckstrahlen (Fettentfernung, lose Partikel). Bei Korrosion ist der vorgeschädigte Untergrund unbedingt abzutragen, z.B. mit Feststoff- oder Höchstdruckstrahlen (Aufräumen des Gefüges, Freilegen des Korngerüsts). Bei Infiltrationen ist das Bauwerk in allen Fällen schon vor der Beschichtung abzudichten, z.B. mittels Injektion.

Sanierungsprotokoll ist Voraussetzung für Abnahme

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

Planungshinweise und Empfehlungen

Im Rahmen des Forschungsprojektes wurden Planungshinweise und Empfehlungen zur Qualitätssicherung der Schachtsanierung (vgl. Abschnitt 8.1) entwickelt. Diese enthalten Angaben zu Sanierungszielen, möglichen Prüfungen und Kontrollen sowie Hilfestellungen zur Bewertung von Hohlstellen und Musterprotokolle für die Sanierungsbegleitung.

Schulungsprogramm „Schachtsanierung“

Auf Basis der in diesem Bericht dargestellten Forschungsergebnisse wurde ein Schulungsprogramm (vgl. Abschnitt 8.2) entwickelt, das einen Beitrag zur Verbesserung der Qualität und Erhöhung der Effizienz von Schachtsanierungen leisten soll. Die wissenschaftlichen Inhalte werden ergänzt durch aktuelle Praxiserfahrungen der Netzbetreiber und der IKT – Prüfstellen. Die Inhalte orientieren sich an der praktischen Umsetzung der Planungshinweise und Empfehlungen zur Schachtsanierung. Methodische Instrumente zur Vermittlung der Lehrinhalte sind Exponate aus dem Forschungsprojekt, Beispielsanierungen, Expertengespräche, Vorträge und Arbeitsgruppen. Die Schulungen sollen im dritten Quartal 2011 beginnen.

Weiterer Untersuchungsbedarf

Die o.a. Schlussfolgerungen und Empfehlungen wurden intensiv mit den projektbeteiligten Netzbetreibern diskutiert. Dabei zeigten sich folgende Schwerpunkte für künftige Untersuchungen:

- Vergleichende Produktprüfungen von Beschichtungssystemen (IKT-Warentest)
Die Projektergebnisse zeigten bereits deutliche Unterschiede in der Qualität und den Anwendungsbereichen der einzelnen Verfahrensgruppen und Produkte. Zur Unterstützung sicherer Investitionsentscheidungen sind nun aktuelle und zuverlässige Informationen über die am Markt verfügbaren einzelnen Produkte gefragt. Die Ergebnisse des Forschungsprojektes erlauben nun erstmalig die gezielte Auswahl von tatsächlich qualitätsrelevanten Einflussfaktoren, die auch die „Robustheit“ der Verfahren unter Praxisbedingungen berücksichtigen. Damit kann nun mit einem fundiertem Prüfprogramm, ausgerichtet auf die aktuelle Marktlage und Qualitätsanforderungen der Betreiber, eine große Anzahl von Produkten mit vertretbarem Aufwand vergleichend und aussagekräftig getestet werden.
- Inspektion und Protokollierung
Das Projekt zeigte, dass die Vielzahl der am Markt verfügbaren Beschichtungssysteme aufgrund ihrer optischen Eigenschaften gerade bei der Bauabnahme besondere Anforderungen an Inspektionssysteme für Schächte stellen. Hier stellt sich die Frage, ob mit Hilfe dieser Kamerasysteme mögliche Mängel überhaupt erkannt und die Beschichtungsqualität in ausreichendem Maße erfasst werden können. Insbesondere ist fraglich, ob eindringendes Wasser, Feutefahnen und Farbschattierungen tatsächlich unterschieden werden können.
- Untersuchungen zu Auskleidungen
Mit der Sanierung der Rohranbindungen und Schachtkörper stellt sich häufig auch die Frage der Instandsetzung der Schachtsohle, z.B. mit einer Gerinneauskleidung. Hier stellt sich die Frage, welche Vorabdichtungen erforderlich, welche Auftriebssicherungen notwendig und welche Maßnahmen zur Wiederherstellung der Rohranbindungen geeignet sind. Eine vollständige Auskleidung kann darüber hinaus eine sinnvolle Alternative zu einer Beschichtung darstellen. In-situ-Erfahrungen liegen bereits vor, so dass die Folgen von Einbaumängeln und mehrjähriger Betriebsbeanspruchungen untersucht werden können.
- Beschichtung von Sonderbauwerken
Im Rahmen des Projektes wurden weitgehend zylindrische Bauformen von Abwasserschächten betrachtet. Ähnliche Untersuchungen an Beschichtungssystemen für nicht zylinderförmige Bauwerke der Abwassertechnik, wie beispielsweise Rechteckschächte, Regenbecken oder auch Sonderbauwerke der Ortsentwässerung, stehen noch aus.
- Einsteighilfen und Steigtechnik
Im Großversuchsstand des IKT konnte festgestellt werden, dass einige Steigbügeleinbindungen schon im „Neuzustand“ undicht waren. Hier wurden unabhängig vom Beschichtungsmaterial wasserwirtschaftlich relevante Infiltrationen verzeich-

net. Offen ist u.a., welche Möglichkeiten aus (arbeitssicherheits-) technischer Sicht für die Umsetzung alternativer Lösungen, wie z.B. dem Einsatz von mobilen Einsteighilfen und mobiler Steigtechnik, bestehen.

- Reparatur der Sanierung

Werden bei der Abnahme von Mörtel- und Kunststoffbeschichtungen Mängel und Schäden festgestellt, stellt sich die Frage, mit welchen Reparaturverfahren diese Schwachstellen beseitigt werden können. Dies betrifft die Auswahl einer geeigneten Verfahrenstechnik zur Beseitigung von Hohlstellen oder punktuellen Schäden ebenso wie die Verträglichkeit zwischen Beschichtungs- und Reparaturmaterialien.

10 Zusammenfassung

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

Das Projekt wurde durch einen Lenkungskreis mit 35 Netzbetreibern begleitet und fortlaufend auf deren Praxisanforderungen abgestimmt. Auswählte Produkte und Verfahren wurden im Rahmen von Vor-Ort-Maßnahmen, Großversuchen im Maßstab 1:1 und ergänzenden Detailanalysen untersucht.

Der vorliegende Forschungsbericht enthält zunächst eine Zusammenstellung des Standes der Technik für die Abdichtung und Beschichtung von Abwasserschächten. Die Ergebnisse aus In-situ-Maßnahmen sind in Abschnitt 5 dargestellt: Um die Auswirkungen mehrjähriger Betriebsbelastungen zu erfassen, wurden zunächst Altbeschichtungen untersucht und zahlreichen Qualitätsprüfungen unterzogen. Abdichtungsmaßnahmen an Schachtkörpern und Rohranbindungen wurden vor Ort begleitet. Aufbauend auf den Erkenntnissen aus der Begleitung von Beschichtungsmaßnahmen in [18] diente dies der Auswahl geeigneter Materialien, Verfahren und Randbedingungen für die anschließenden Großversuche und ergänzenden Laboruntersuchungen.

In Großversuchen im Maßstab 1:1 wurde die Leistungsfähigkeit und Robustheit von Abdichtungs- und Beschichtungsverfahren unter definierten, für alle Sanierungsmaßnahmen gleichen Randbedingungen über einen Zeitraum von fünf Monaten untersucht (Abschnitt 6). Mit Blick auf das Langzeit-Verhalten der sanierten Abwasserschächte unter Außenwasserdruck wurden dabei besondere Zeitraffereffekte eingesetzt.

In Abschnitt 7 werden weitere spezielle Fragestellungen auf Grundlage ergänzender Laboruntersuchungen beantwortet, so zur mechanischen Belastbarkeit von sanierten Rohranbindungen, dem Verhalten von Hohlstellen unter Außenwasserdruck und der Wirksamkeit von Nachbehandlungsmitteln bei mineralischen Beschichtungen. Eine Wirtschaftlichkeitsbetrachtung, der Einsatz innovativer Prüfverfahren sowie praxisnahe Planungshinweise und Empfehlungen runden das Bild ab.

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

11 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.; Puhl, R.: Abwasserschächte - Überwachung, Prüfung und Sanierung, Teil 1: Voruntersuchungen (Langfassung), IKT - Institut für Unterirdische Infrastruktur, Gelsenkirchen, Februar 2006.
- [6] Auswertung im Rahmen des Forschungsprojektes „Umsetzung der Selbstüberwachungsverordnung Kanal (SüwVKan) bei den kommunalen Netzbetreibern und Wasserverbänden in NRW; im Auftrag des Ministeriums für Umwelt und Naturschutz, Landwirtschaft und Verbraucherschutz des Landes NRW, IKT - Institut für Unterirdische Infrastruktur, Gelsenkirchen, Dezember 2003.
- [7] Umfrage im Rahmen des Forschungsprojektes „Abwasserschächte - Überwachung, Prüfung und Sanierung, Teil 1: Voruntersuchungen; im Auftrag des Ministeriums für Umwelt und Naturschutz, Landwirtschaft und Verbraucherschutz des Landes NRW, IKT - Institut für Unterirdische Infrastruktur, Gelsenkirchen, Februar 2006.
- [8] Auswertung im Rahmen des Forschungsprojektes „Beschichtungsverfahren zur Sanierung von Abwasserschächten -Studie zu Qualitätseinflüssen und Einsatzgrenzen anhand von Praxis- und Laboruntersuchungen“; im Auftrag des Ministeriums für Umwelt und Naturschutz, Landwirtschaft und Verbraucherschutz des Landes NRW, IKT - Institut für Unterirdische Infrastruktur, Gelsenkirchen, Februar 2005.
- [9] Bosseler, B.; Homann, D.; Kaltenhäuser, G.: Bundesweite Umfrage zur Sanierung von Schachtbauwerken im Bereich der Abwassertechnik mittels Beschichtungsverfahren; Gelsenkirchen, Juli 2001.

- [10] 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.
- [11] ZTV-RISS 93: Zusätzliche Technische Vertragsbedingungen und Richtlinien für das Füllen von Rissen in Betonbauteilen; Der Bundesminister für Verkehr, Abteilung Straßenbau, Abteilung Binnenschifffahrt und Wasserstraßen, Deutsche Bundesbahn, Verkehrsblatt-Verlag, Dortmund, 1993.
- [12] ZTV-ING: Zusätzliche Technische Vertragsbedingungen und Richtlinien für Ingenieurbauten, FGSV-Verlag, 2003.
- [13] Schuhmann, H. u.a.: Handbuch Betonschutz durch Beschichtungen. Praxis und Anwendungen, Normen und Empfehlungen; Expert Verlag. Ehningen bei Böblingen, 1992.
- [14] Schmidt, A.: Berechnung von zweischaligen Tunnelauskleidungen unter Berücksichtigung des Verbundes zwischen Spritz- und Pumpbeton. Bauingenieur 61, S. 63-72, 1986.
- [15] „Auswahl, Planung und Durchführung von Sanierungsmaßnahmen in gemauerten Abwasserkanälen am Beispiel der Demonstrationsbaustelle Hauptsammler zwischen Haspeler Straße und Robert-Daum-Platz in Wuppertal“, Forschungsantrag der Wuppertaler Stadtwerke AG an das MKULNV NRW; April 2002.
- [16] 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.
- [17] Deutsche Bauchemie e.V.: Anwendung von mineralischen Systemen in abwassertechnischen Anlagen; Sachstandsbericht, November 1997.
- [18] Bosseler, B.; Puhl, R.: Beschichtungsverfahren zur Sanierung von Abwassererschächten - Studie zu Qualitätseinflüssen und Einsatzgrenzen anhand von Praxis- und Laboruntersuchungen, IKT – Institut für Unterirdische Infrastruktur, Gelsenkirchen, Februar 2005.
- [19] DIN EN 752, Entwässerungssysteme außerhalb von Gebäuden, Ausgabe 2008; Beuth Verlag, Berlin.
- [20] Stein, D.: Sanierung von Schächten; in: bi UmweltBau 3/2003.
- [21] ATV - DVWK - A 157: Bauwerke der Kanalisation; ATV - DVWK - Regelwerk, November 2000.

- [22] R. Puhl: Handbuch Schacht 2007, IKT - Institut für Unterirdische Infrastruktur, Gelsenkirchen, Januar 2007.
- [23] Deutscher Ausschuss für Stahlbeton, Heft 443: Schutz und Instandsetzung von Betonbauteilen unter Verwendung von Kunststoffen - Sachstandsbericht (1994); H. Rainer Sasse.
- [24] Günther Ruffert: Lexikon der Betoninstandsetzung, Verlag Fraunhofer IRB Verlag, 1999.
- [25] Firmeninformation der Beeck'sche Farbwerke Beeck GmbH & Co.KG, 2010.
- [26] Materialherstellereinformation der BAWAX GmbH, 2010.
- [27] Sasse, H.: Schutz und Instandsetzung von Betonbauteilen unter Verwendung von Kunststoffen – Sachstandsbericht; Deutscher Ausschuss für Stahlbeton H. 443, 1994.
- [28] Schmidt, A.: Berechnung von zweischaligen Tunnelauskleidungen unter Berücksichtigung des Verbundes zwischen Spritz- und Pumpbeton. Bauingenieur 61, S. 63-72, 1986.
- [29] DWA-M 143-17: Sanierung von Entwässerungssystemen außerhalb von Gebäuden; Teil 17: Beschichtung von Abwasserleitungen, -kanälen und Schächten mit zementgebundenen mineralischen Mörteln (Dezember 2006).
- [30] Hillemeier, B.: Ein korrosionssicheres Instandsetzungssystem für Abwasser-sammler aus Beton. Dokumentation II. Internationaler Kongress Leitungsbau, Band II, S. II/249 - II/257, Hamburg, 1987.
- [31] Deutscher Ausschuss für Stahlbeton, Heft 576: „Mechanismen der Blasenbildung bei Reaktionsharzbeschichtungen auf Beton“; Lars Wolf, Beuth Verlag, Berlin 2009.
- [32] Raupach M. und Orłowsky J.: Erhaltung von Betonbauwerken, 1. Auflage, Verlag Vieweg + Teubner, Wiesbaden 2008.
- [33] Firmeninformation der seal-tec GmbH, Oktober 2010.
- [34] Telefonische Auskunft von Hr. Tolksdorf, Hygiene-Institut des Ruhrgebiets, Umwelthygiene, Gelsenkirchen, Oktober 2010.
- [35] GSTT-Information Nr. 18: Anforderungen an Mörtel für Abwasserkanäle und Bauwerke der Ortsentwässerung. Hamburg, Januar 2004.
- [36] ATV - DVWK - M 143 - 8: Sanierung und Erneuerung von Entwässerungssystemen außerhalb von Gebäuden, Teil 8: Injektionsverfahren zur Abdichtung von Abwasserleitungen und -kanälen, August 2004.
- [37] Bonk, Michael: Lufsky Bauwerksabdichtung, 7. Auflage, Verlag Vieweg + Teubner, Wiesbaden 2010.

- [38] Thewes, M.; Kamarianakis, S.: Überprüfung der Einsatzmöglichkeiten tunnel- und tiefbauspezifischer Injektionsverfahren bei der Sanierung von Kanalschächten. Bochum 2010, Unveröffentlicht.
- [39] Bosseler, B.; Homann, D.; Kaltenhäuser, G.: Bundesweite Umfrage zur Sanierung von Schachtbauwerken im Bereich der Abwassertechnik mittels Beschichtungsverfahren; IKT - Institut für Unterirdische Infrastruktur gGmbH, Gelsenkirchen, Juli 2001, unveröffentlicht.
- [40] Breitenbücher, R.; Youn, B.: Untersuchungen an mineralisch gebundenen Bohrkernen aus unterschiedlichen Schächten. Bochum 2010. Unveröffentlicht.
- [41] Siesler, H.-W.; Pfeifer, F.: IR-spektroskopische Untersuchungen verschiedener Schachtbeschichtungen. Essen 2011, Unveröffentlicht.
- [42] DIN EN 1015-3: Prüfverfahren für Mörtel für Mauerwerk - Teil 3: Bestimmung der Konsistenz von Frischmörtel (mit Ausbreittisch); Deutsche Fassung EN 1015-3:1999+A1:2004+A2:2006; Beuth Verlag, Berlin, Mai 2007.
- [43] DIN EN 1015-6: Prüfverfahren für Mörtel für Mauerwerk - Teil 6: Bestimmung der Rohdichte von Frischmörtel; Deutsche Fassung EN 1015-6:1998+A1:2006; Beuth Verlag, Berlin, Mai 2007.
- [44] DIBt-Merkblatt „Bewertung der Auswirkungen von Bauprodukten auf Boden und Grundwasser“; Schriften des Deutschen Instituts für Bautechnik, Reihe M, Heft 1, November 2000.
- [45] DVGW-Arbeitsblatt W 347 „Hygienische Anforderungen an zementgebundene Werkstoffe im Trinkwasserbereich - Prüfung und Bewertung“; Beuth Verlag, Berlin, Mai 2006.
- [46] Tolksdorf, U.: Einsatz von PU in Abwasserschächten - Bewertungen zu den Untersuchungsergebnissen vom 08.09.2010; Hygiene-Institut des Ruhrgebiets, Gelsenkirchen; Unveröffentlicht.
- [47] Schneider Bautabellen für Ingenieure, Abschnitt 13-7.3. 19. Auflage, Werner Verlag 2010.
- [48] Gillar, M.: Auswertung der Prüfungen von Schachtbeschichtungen des IKT von 2006 bis 2008. Juni 2008; IKT gGmbH, Gelsenkirchen; Unveröffentlicht.
- [49] Hummelt, F.: Verbundverhalten von Beschichtungsmörteln zur Sanierung von Abwasserschächten. Diplomarbeit. Gelsenkirchen 2010, Unveröffentlicht.
- [50] DIN EN 1766: Produkte und Systeme für den Schutz und die Instandsetzung von Betontragwerken - Prüfverfahren - Referenzbetone für Prüfungen; Beuth Verlag, Berlin, März 2000.
- [51] DIN EN 1542: Prüfverfahren - Messung der Haftfestigkeit im Abreißversuch; Beuth Verlag, Berlin, Juli 1999.

- [52] Dugan, S.; Jüngert, A.: Lokale Resonanzspektroskopie an Schachtinnenwänden. Stuttgart 2010, Unveröffentlicht.
- [53] DIN EN 476: Allgemeine Anforderungen an Bauteile für Abwasserkanäle und -leitungen für Schwerkraftentwässerungssysteme; Deutsche Fassung EN 476:1997; Beuth Verlag, Berlin.
- [54] DIN EN 1610: Verlegung und Prüfung von Abwasserleitungen und -kanälen. Oktober 1997; Beuth Verlag, Berlin.
- [55] DIN 19523: Anforderungen und Prüfverfahren zur Ermittlung der Hochdruckstrahlbeständigkeit und -spülfestigkeit von Rohrleitungsteilen für Abwasserleitungen und -kanäle. August 2008; Beuth Verlag, Berlin.
- [56] LAWA Länderarbeitsgemeinschaft Wasser: Leitlinien zur Durchführung dynamischer Kostenvergleichrechnungen (KVR-Leitlinien). Kulturbuchverlag, Berlin, 2005.
- [57] DIN EN 13508-2: Zustandserfassung von Entwässerungssystemen außerhalb von Gebäuden. Teil 2: Kodiersysteme für die optische Inspektion. September 2003; Beuth Verlag, Berlin.
- [58] DWA - M 149-2: Zustandserfassung und -beurteilung von Entwässerungssystemen außerhalb von Gebäuden. November 2006.
- [59] DIN EN 12504-2: Prüfung von Beton in Bauwerken - Teil 2: Zerstörungsfreie Prüfung; Bestimmung der Rückprallzahl; Deutsche Fassung EN 12504-2:2001; Beuth Verlag, Berlin.
- [60] DIN EN ISO 527-2: Kunststoffe - Bestimmung der Zugeigenschaften - Teil 2: Prüfbedingungen für Form- und Extrusionsmassen (ISO/DIS 527-2:2010); Deutsche Fassung prEN ISO 527-2:2010; Beuth Verlag, Berlin.
- [61] DIN 53505: Prüfung von Kautschuk und Elastomeren - Härteprüfung nach Shore A und Shore D; August 2000; Beuth Verlag, Berlin.
- [62] DIN EN 1015-7: Prüfverfahren für Mörtel für Mauerwerk - Bestimmung des Luftgehaltes von Frischmörtel, Dezember 1998, Beuth Verlag, Berlin.
- [63] DIN EN 1015-3: Prüfverfahren für Mörtel für Mauerwerk - Bestimmung der Konsistenz von Frischmörtel (mit Ausbreittisch); Mai 2007; Beuth Verlag, Berlin.
- [64] Prüfverfahren für Mörtel für Mauerwerk - Bestimmung der Rohdichte von Frischmörtel; Mai 2007; Beuth Verlag, Berlin.
- [65] DIN EN 196-1: Prüfverfahren für Zement - Bestimmung der Festigkeit; Mai 2005; Beuth Verlag, Berlin.