

neutral
unabhängig
gemeinnützig



IKT-Institut für
Unterirdische Infrastruktur

Forschungsbericht

Kanalreinigung

- Düsen, Drücke, Hochdruckstrahlen -



Bosseler, B.; Schlüter, M.
Gelsenkirchen, Dezember 2004

Fördernde Stelle



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

Auftragnehmer



IKT - Institut für Unterirdische Infrastruktur
Exterbruch 1
45886 Gelsenkirchen

Wissenschaftliche Leitung

Dr.-Ing. Bert Bosseler

Projektleitung und Bearbeitung

Dipl.-Ing. Marco Schlüter

Dipl.-Ing. (FH) Beate Voigt

Dipl.-Ing. (FH) H. Akkas

Dipl.-Ing. (FH) M. Engelberg

Dipl.-Ing. (FH) T. Kutschowitz

Dipl.-Ing. M. Illing

Dipl.-Ing. P. Meyer

Wir danken den Projektbeteiligten für die inhaltliche Begleitung des Forschungsvorhabens aus Sicht der Praxis, für die fachliche Diskussion und die weitreichende Unterstützung bei der Analyse von Reinigungsprozessen im Kanalbetrieb:

Dipl.-Ing. F. Großklags

Herr J. Graban; Herr T. Kariot

Dipl.-Ing. F.-J. Knoblauch

Dipl.-Ing. H. Jahn

Herr B. Hellweg

Herr J. Lunkewitz

Herr W. Sievert

Dipl.-Ing. J. Lollert; Herr R. Reike

Herr H.-J. Thiel

Herr R. Czuba

Prof. Dr.-Ing. W. Hösel

Stadt Bochum

Gelsenkanal, Gelsenkirchen

Stadt Recklinghausen

Stadt München

Gemeinde Holzwickede

Wuppertaler Stadtwerke AG

Stadt Ratingen

Stadt Hagen

ESW Entwässerung Stadt Witten

Stadt Warendorf

Fachhochschule Gelsenkirchen,

Fachbereich Ver- und Entsorgungstechnik

Darüber hinaus danken wir Herrn M. Ziegenbein von der Müntefering GmbH und Herrn D. Schrameck von der Otto Schrameck GmbH für die zahlreichen Anregungen im Rahmen der praktischen Versuchsdurchführung.

Ein besonderer Dank für die Unterstützung im Zuge der Vorbereitung des ebenfalls im Rahmen des Forschungsvorhabens erstellten IKT-Handbuchs „Kanalreinigung“ gilt Frau Dipl.-Ing. (FH) M. Meinen, Herrn T. Kirk von der Stadtentwässerung Hannover, Frau Dipl.-Ing. (FH) D. Trautzsch und Herrn K. Rath sowie Herrn H. Welke von der Stadtentwässerung Göttingen, Herrn H.-J. Thiel von der ESW Entwässerung Stadt Witten, Herrn Dipl.-Ing. T. Schoppen und Herrn F.-J. Kotzanek vom Stadtentwässerungsbetrieb Düsseldorf, Herrn Dipl.-Ing. G. Helmich von den Entsorgungsbetrieben Mühlheim, Herrn Dipl.-Ing. R. Türk von der Stadt Würselen, Herrn F. Cengel von den Wirtschaftsbetrieben Duisburg sowie den Mitarbeitern der Stadtentwässerung der Stadt Detmold.

INHALTSVERZEICHNIS

1	VERANLASSUNG, ZIELSTELLUNG UND VORGEHENSWEISE	1
2	TECHNISCHER UND RECHTLICHER HINTERGRUND	3
	2.1 Normative Anforderungen	3
	2.2 Ablagerungen und Netzsituation	7
	2.3 Hochdruckspülverfahren	10
	2.4 Hochdruckspülbeständigkeit	19
3	PRAXISERFAHRUNGEN	25
	3.1 Erhebungsumfang	25
	3.2 Kanalablagerungen	25
	3.3 Fahrzeug- und Werkzeugeinsatz	41
	3.4 Reinigungsabläufe	45
	3.5 Reinigungssituationen	48
4	DÜSENWIRKUNG	50
	4.1 Hintergrund und Vorgehensweise	50
	4.2 Auswahl der HD-Düsen	51
	4.3 Betriebsprozesse und Düsenbewegungen	54
	4.4 Transportleistung	59
	4.5 Lösen	83
	4.6 Empfehlungen zur Düsenauswahl	109
5	BELASTUNGEN AUS HOCHDRUCKDÜSEN-EINSATZ	112
	5.1 Problemstellung und Vorgehensweise	112
	5.2 Grundbelastungen und Versuchskonzept	114
	5.3 Prüfmethoden	118
	5.4 Ergebnisse	127
	5.5 Schlussfolgerungen	184
6	ZUSAMMENFASSUNG UND SCHLUSSFOLGERUNGEN	187
7	FAZIT	199
8	LITERATURVERZEICHNIS	201

1 Veranlassung, Zielstellung und Vorgehensweise

In Nordrhein-Westfalen wird ein Kanalnetz von ca. 90.000 km Länge betrieben. Fast das gesamte Netz wird vollständig innerhalb von 2-3 Jahren gereinigt (vgl. [1]). Die Reinigung der Abwasserkanäle gehört entsprechend zu den Kernaufgaben der kommunalen Netzbetreiber. Sie sichert den Entwässerungskomfort der Bürger, z.B. durch Beseitigung von Geruchsbelästigungen und Verstopfungen, trägt aber auch wesentlich zum Werterhalt der Netze bei, z.B. durch Verringerung von Korrosionserscheinungen. Künftig ist mit einer wachsenden Bedeutung der Kanalreinigung zu rechnen, da bei gleichen Rohrdurchmessern deutlich weniger Abwasser abgeleitet wird und damit eine stärkere Bildung von Kanalablagerungen zu erwarten ist. Ursachen sind z.B.

- Einsparungen beim Trinkwasserverbrauch,
- ein vermehrter Rückhalt von Regenwasser, z.B. durch Versickerung,
- ein verringertes Fremdwasseraufkommen, z.B. durch Sanierungsmaßnahmen und das Abklemmen von Fehllanschlüssen.

Schon heute stellt der hohe Reinigungsbedarf die Netzbetreiber vor erhebliche finanzielle Probleme, da Kostensteigerungen für die Kanalreinigung nicht im Rahmen von Gebührenerhöhungen getragen werden können. Alle Beteiligten stehen daher unter verstärktem Druck, wirkungsvolle Optimierungspotentiale für Kostensenkungen zu erschließen. Die Situation verschärft sich insbesondere dadurch, dass kaum dokumentiertes Wissen über die Möglichkeiten zur effizienten, wirkungsvollen und den Rohrwerkstoff schonenden Kanalreinigung vorliegen. Darüber hinaus ist häufig vor einem Reinigungseinsatz nicht einmal bekannt, ob überhaupt Ablagerungen im Kanal zu erwarten sind und welche Beschaffenheit diese haben könnten. Die Reinigungsarbeit findet weitestgehend im "Kanalunkeln" statt. Meist wird auf eine Kontrolle des Reinigungserfolges gänzlich verzichtet. Entsprechend hängt auch die Auswahl wichtiger Reinigungsparameter wie Düsen, Düseneinsätze, Pumpendruck und Durchzugsgeschwindigkeit in der Regel allein von den Erfahrungen und subjektiven Einschätzungen der Verantwortlichen vor Ort ab. Belastbare Aussagen als Grundlage für eine weitergehende Optimierung der Reinigungsprozesse und –strategien fehlen.

Vor diesem Hintergrund beauftragte das Ministerium für Umwelt und Naturschutz, Landwirtschaft und Verbraucherschutz des Landes Nordrhein-Westfalen das IKT – Institut für Unterirdische Infrastruktur, Gelsenkirchen mit dem nachfolgend beschriebenen Forschungsprojekt „Kanalreinigung“ (Aktenzeichen IV-9-041 105 0122). **Ziel** ist es, Empfehlungen für die technische und wirtschaftliche Optimierung des Kanalreinigungsprozesses mit dem Hochdruckspülverfahren zu erarbeiten. Im Vordergrund stehen dabei sowohl der optimale Einsatz der verwendeten Geräte als auch die Durchführung des Verfahrens an sich mit Blick auf die wesentlichen verfahrenstechnischen Parameter. Ein besonderes Augenmerk gilt der Auswahl

geeigneter Düsen für die jeweilige Reinigungsaufgabe sowie der Sicherung der bestehenden Netzsubstanz durch Vermeidung übermäßiger Belastungen aus Hochdruckstrahlen sowie Düsenkörper- bzw. Schlauchbewegung.

Um dieses Ziel zu erreichen, wurde eine stark **praxisorientierte Vorgehensweise** gewählt (Bild 1). Zunächst wurden zahlreiche Reinigungseinsätze vor Ort begleitet, um die relevanten technischen Parameter und den mit heutigen Mitteln erzielbaren Reinigungserfolg zu ermitteln. Darüber hinaus wurden weitere betriebliche Einflussfaktoren, wie Mitarbeiter- und Fahrzeugeinsatz, Reinigungsabläufe und spezifische Ablagerungssituationen aufgenommen. Diese Praxiserfahrungen bildeten die Basis, d.h. die Anforderungen, für die weiteren Untersuchungen unter reproduzierbaren Randbedingungen. Ein Teil dieser Untersuchungen, die Bewertung typischer Kanalablagerungen, war dabei eng mit den Vor-Ort-Einsätzen verknüpft.

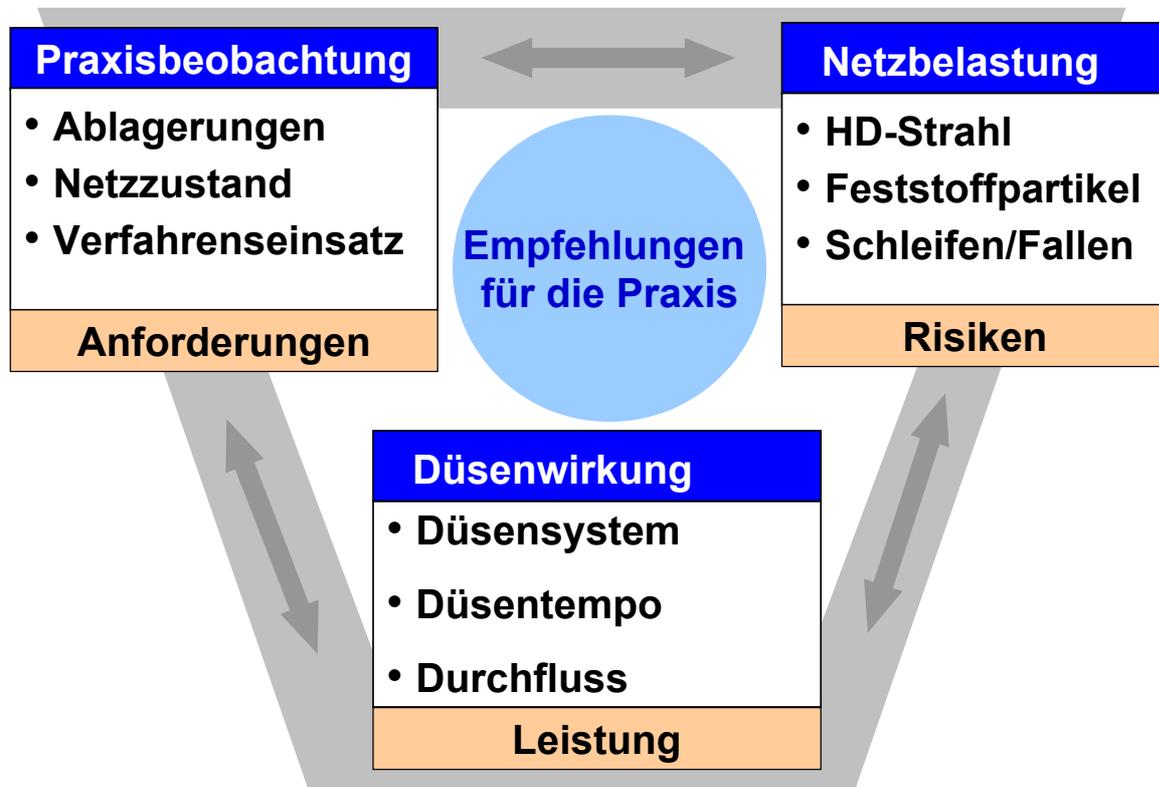


Bild 1: IKT-Forschungsvorhaben „Kanalreinigung mit dem HD-Verfahren“

Die labortechnischen Versuche setzten sich aus Untersuchungen zur **Düsenwirkung** und den aus HD-Reinigung resultierenden Netzbelastungen zusammen. Zahlreiche der am Markt verfügbaren Düsen und Düseneinsätze wurden hinsichtlich ihrer Hochdruckwasserstrahl-Eigenschaften und Leistungsfähigkeit untersucht, um praxisorientierte Empfehlungen zur Düsenauswahl abzuleiten. Die Aggressivität der Hochdruckstrahlen und ihr tatsächlicher Einfluss auf das Lösen von Ablagerungen wurden ermittelt und die Transport- bzw. Räumleistung der Düsen in Versuchen mit

unterschiedlichen Druck- und Durchflussszenarien untersucht. Insbesondere der Düsenrückzugsgeschwindigkeit kam dabei eine besondere Bedeutung zu.

Im Rahmen der Untersuchungen zur **Netzbelastung** aus HD-Reinigung wurden Grundbelastungsarten identifiziert und Prüfaufbauten zur Simulation dieser Belastungen ausgewählt bzw. entwickelt. Unter Einsatz zahlreicher der heute am Markt vertriebenen Rohrprodukte wurde die Wirkung typischer Belastungen aus HD-Reinigung beobachtet. Kritische Belastungssituationen mit Schadensrisiken konnten so erkannt und Empfehlungen für eine schonende HD-Reinigung abgeleitet werden.

Sämtliche Empfehlungen wurden abschließend in einem praxisorientierten „IKT-Handbuch Kanalreinigung“ [2] zusammengefasst, dass in enger Abstimmung mit zahlreichen Netzbetreibern aus NRW sowie weiteren interessierten Fachleuten formuliert wurde.

2 Technischer und rechtlicher Hintergrund

2.1 Normative Anforderungen

Ansammlungen von Ablagerungen, Fetten und Inkrustationen sowie Wurzeleinwüchse beeinträchtigen die Betriebssicherheit der Kanalisation. Im Extremfall können diese zum vollständigen Kanalverschluss führen. Reicht der entstehende Abwasserrückstau bis in die Kellerräume, kann es Bürgerbeschwerden geben. Doch auch wenn das Wasser noch abläuft, muss bereits gereinigt werden. Denn in stark verschmutzten Kanalnetzen verringert sich die Abfluss- und Speicherkapazität. Damit erhöht sich das Risiko von Schmutzfrachtentlastungen in den Vorfluter. Auch können Niederschlagsabflüsse Ablagerungen aufwirbeln und die Schmutzfracht im Kanal beachtlich erhöhen. Dies kann u.U. in der Abwasserreinigungsanlage zu unerwünschten Spitzenbelastungen führen.

Darüber hinaus finden bereits in der Kanalisation biologische Umsetzungsprozesse an den Kanalablagerungen statt. So kann sich Schwefelwasserstoff je nach Alter und Zusammensetzung der Ablagerungen sowie der örtlichen Belüftungssituation in der Kanalatmosphäre anreichern und die sogenannte biogene Schwefelsäurekorrosion auslösen. Die Folge können nicht unerhebliche Beschädigungen an den Kanalisationsanlagen sein. Schon in geringen Konzentrationen wird Schwefelwasserstoff von den Anwohnern auch als Geruchsbelästigung wahrgenommen.

Vor diesem Hintergrund werden auch gesetzliche Anforderungen an die Kanalreinigung gestellt:

Gemäß § 18 des Wasserhaushaltsgesetzes (WHG) ist „Abwasser so zu beseitigen, dass das Wohl der Allgemeinheit nicht beeinträchtigt wird.“ Die Reinigung und Wartung der Kanäle trägt zum störungsfreien Betrieb des Kanalnetzes bei und leitet sich insofern auch aus den Anforderungen im WHG ab.

Der Landesgesetzgeber Nordrhein-Westfalen regelt in § 57 Landeswassergesetz (LWG NRW), dass Bau, Betrieb und Unterhaltung von Abwasseranlagen nach den allgemein anerkannten Regeln der Technik durchgeführt werden müssen. Des Weiteren wird in § 53 LWG NRW gefordert, die Abwasserbeseitigung mittels eines Abwasserbeseitigungskonzeptes sicherzustellen. Die Verpflichtung zur Selbstüberwachung regelt § 61 LWG NRW (vgl. Bild 2).

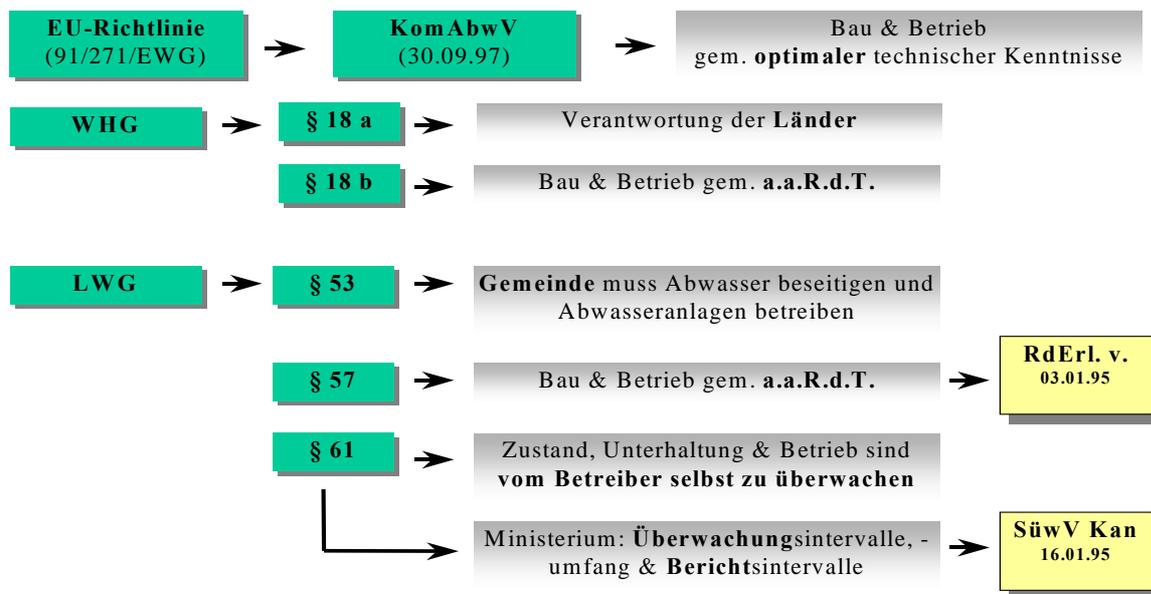


Bild 2: Rechtliche und technische Anforderungen [3]

Nach **Selbstüberwachungsverordnung Kanal (SüwV Kan) [4]** muss in Nordrhein-Westfalen die Ablagerungssituation auf Grundlage eines Einsatz- bzw Spülplanes oder, bei Nichtvorliegen eines solchen Planes, alle 2 Jahre überprüft werden. Werden bei dieser Überprüfung Ablagerungen festgestellt, sind die im **Runderlass [5] des Ministeriums für Umwelt, Raumordnung und Landwirtschaft** beschriebenen Maßnahmen durchzuführen. So ist bei Ablagerungshöhen von mehr als 15 % der Profilhöhe (geschätzt) nach Reinigungsplan zu reinigen. Liegt ein solcher Plan nicht vor, sind Leitungen bis DN 1000 innerhalb von 3 Monaten und Leitungen größer DN 1000 innerhalb von 6 Monaten zu reinigen.

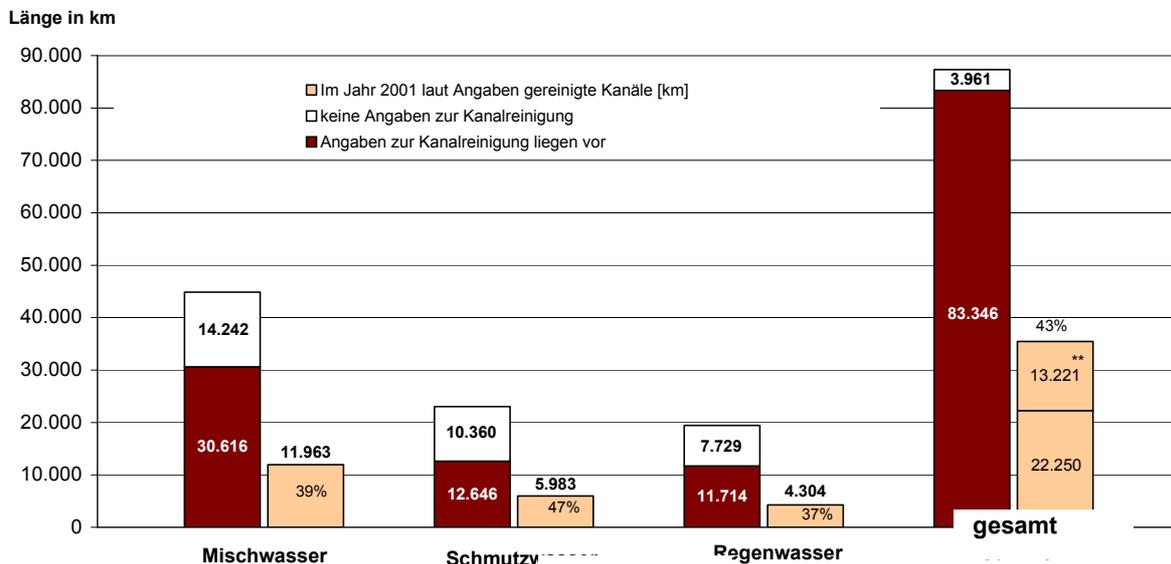
Der o.a. zweijährliche Rhythmus gilt als Vorgabe für die Betreiber von Abwasseranlagen in NRW, jedoch nur sofern keine weitergehenden betrieblichen Erfahrungen vorliegen. Voraussetzung für eine betriebsbedingte Abweichung von dieser Vorgehensweise ist die Erstellung eines Spül- bzw. Einsatzplans, nach dem eine planmäßige Bewertung der Ablagerungen betrieben wird. Die Reinigungsintervalle können dann abhängig von den örtlichen Randbedingungen (z.B. Gefällesituation, Rohrmaterial etc.) und dem prognostizierten Ablagerungsverhalten auf der Grundlage von Ablagerungskontrollen durchaus auf fünf bis zehn Jahren ausgedehnt werden (vgl. [6], [7]). Die SüwV Kan bietet somit die Möglichkeit, im Rahmen einer eigenen Planung von der vorgeschriebenen

zweijährlichen Frist abweichen zu können. Den Betreibern eröffnet sich damit die Möglichkeit für eine „bedarfsorientierte“ Kanalreinigung auf der Grundlage von Inspektionsdaten.

Eine umfassende Erhebung bei den 396 Netzbetreibern in NRW [1] zeigte, dass davon bisher wenig Gebrauch gemacht wurde. Die Auswertung der erhobenen Daten legten die Vermutung nahe, dass sich die Betreiber in NRW insbesondere für die Reinigung von Schmutzwasserkanälen tendenziell an dem gemäß SÜwV Kan vorgegebenen zweijährlichen Reinigungsintervall orientieren. Nach eigenen Angaben der Betreiber wurden im Berichtsjahr 2001 rund 43 % des insgesamt 87.307 km langen Kanalnetzes in NRW gereinigt (Bild 3).

Kommunale Kanalreinigung im Berichtsjahr 2001

Auswertung für das kommunale Kanalnetz in NRW von 87.307 km*



* Längen der Entwässerungssysteme nach den Angaben des LDS NRW (vgl. Tabelle 1)

** Angaben, die nicht nach dem jeweiligen Entwässerungssystem unterschieden wurden

Bild 3: Länge und prozentualer Anteil der im Berichtsjahr 2001 gereinigten Kanäle in NRW, vgl. [1]

Hinweise zur Planung und Durchführung der Kanalreinigung, den technischen Anforderungen sowie dem Personal- und Gerätebedarf sind auch in zahlreichen technischen Normen und Regelwerken zusammengefasst. Tabelle 1 gibt hierzu einen Überblick.

Tabelle 1: Technische Anforderungen an die Kanalreinigung, Überblick

Index	Titel	Ausg.	Anforderungen an die Kanalreinigung
ATV A 140 T.1 [8]	Regeln für den Kanalbetrieb, Teil 1: Kanalnetz	Mrz 90	Das Kanalnetz muss jederzeit funktionsbereit sein, dazu sind für die Wartungsmaßnahme Kanalreinigung erforderlich: <ul style="list-style-type: none"> - gut ausgebildetes Personal, - leistungsfähige Fahrzeuge und Geräte, - Beachtung der Unfallverhütungsvorschriften, - schadlose Beseitigung des Räumgutes, - Überprüfung des Reinigungserfolges, - Abstimmung auf die baulichen Gegebenheiten (Vermeidung von Materialschäden).
ATV-A-147 T.1 [7] bzw. ATV-DVWK-A 147 T.1 (Entw.) [9]	Betriebsaufwand für die Kanalisation, Teil 1: Betriebsaufgaben und Häufigkeiten	Mai 93 bzw. April 03	Die Häufigkeit der Kanalreinigung ist nicht explizit festgeschrieben. Reinigungsintervalle können erfahrungsgemäß entsprechend der Art des Entwässerungsverfahrens, der Gefälle- und Abflussverhältnisse, der Ablagerungen und den Rückstauverhältnissen zwischen einem halben Jahr und zehn Jahren liegen.
ATV A 147, Teil 2 [10]	Betriebsaufwand für die Kanalisation, Teil 2: Personal-, Fahrzeug- und Gerätebedarf	Mrz 95	Eine Tabelle zur Reinigung gibt Auskunft über Tätigkeit, Häufigkeit pro Jahr, Kolonnenstärke, Fahrzeug bzw. Gerät, Tagesleistung und ggf. Aufwand als Richtwert sowie Bemerkungen. Die angegebenen Tagesleistungen sind als Durchschnittswerte der Praxis anzusehen.
DIN 30 702 [11]	Kommunalfahrzeuge	Okt 87	Festlegung der Begriffe für Saugfahrzeug und Hochdruckspülfahrzeuge
DIN 30 705 [12]	Saugfahrzeuge und HD-Spülfahrzeuge	Sept 87	In dieser Norm sind Anforderungen (einschließlich Abnahme) an Kanal- und Sinkkasten-Reinigungsfahrzeuge sowie Gruben-Reinigungsfahrzeuge festgelegt.
WRc [13]	Sewer Jetting Code of Practice (Großbritannien)	1997	Anforderungen an die Durchführung der Kanalreinigung werden konkret in hydraulische Leistungsdaten für das Hochdruckspülen umgesetzt: Maximale Düsendrücke und Durchflussraten werden in Abhängigkeit von Nennweite, Rohrwerkstoff und Zustand des zu reinigenden Rohres festgelegt.
SN 592 012 [14]	Schweizer Norm „Rohre, Formstücke, Verbindungen und andere Rohrleitungsteile (Schweiz)	1994	Mit Blick auf die Funktionsanforderungen an Rohrwerkstoffe, die auch die Dichtheit und Temperaturbeständigkeit umfassen, wird die Widerstandsfähigkeit gegen Rohrreinigungsgeräte im Rahmen einer Werkstoffprüfung bzw. eines Rohrreinigungstests für Rohre der <i>Grundstücksentwässerung</i> untersucht. Dazu wird ein ca. 5 m langes Rohrsystem mit Abzweigen und Bögen aufgebaut und mit einer wasserstrahlenden Hochdruckspüldüse unter definierten Randbedingungen <i>einmal</i> durchfahren. Anschließend wird der Zustand des Rohrsystems optisch kontrolliert.
DIN EN 752, Teil 7 [15]	Entwässerungssysteme außerhalb von Gebäuden, Teil 7: Betrieb und Unterhalt	Jun 98	Es muss ein Unterhaltungsplan aufgestellt werden. Er muss die Art der Unterhaltungsstrategie, die für die Kanalreinigung anzuwenden ist, die Anforderungen an die Überwachung und deren Häufigkeit enthalten. Bei der Beseitigung von Ablagerungen durch Kanalreinigung sind die möglichen Auswirkungen auf die Kläranlage zu berücksichtigen. Es sind Maßnahmen zu treffen, um eine Einleitung von stark verschmutzten Stoffen über Regenentlastungsbauwerke in den Vorfluter zu verhindern. Die Beseitigung von Rückständen aus der Kanalreinigung sollte die umweltrelevanten Auswirkungen berücksichtigen und in Abstimmung mit der zuständigen Stelle erfolgen. Besondere Hinweise: <ul style="list-style-type: none"> - Der Anwendungsbereich der Norm erstreckt sich von der privaten Hauswand bis zur Kläranlage, d.h. sie gilt in diesem Bereich sowohl für das private als auch das öffentliche Netz. - „Die Strategien für den Unterhalt von Entwässerungssystemen sind der vorausschauend geplante Unterhalt oder die ereignisabhängige Reaktion. Es ist auch eine Kombination von beiden möglich. (...) die vorausschauende Unterhaltung ist immer dann erforderlich, wenn entweder die Schadensfolgen erheblich sind oder dem Auftreten von Schäden vorzubeugen ist.“
ATV-DVWK-M 197 [16]	Ausschreibung von Kanalreinigungsleistungen mit dem HD-Spülverfahren	Entwurf Mai 2003	Das Merkblatt bietet den ausschreibenden Stellen (Kommunen, Firmen, Verbände und Ingenieurbüros) Hilfestellungen für die Ausschreibung von Kanalreinigungsleistungen mit dem Hochdruckspülverfahren in Abwasserkanälen und -leitungen, die im freien Gefälle betrieben werden.
(Norm-Entwurf) DIN EN 14654 [17]	Planung, Durchführung und Überwachung von Reinigungsmaßnahmen in Abwasserkanälen und -leitungen	Entwurf Mai 2003	Hinweise zur Planung, Durchführung und Überwachung von Reinigungsmaßnahmen in Abwasserkanälen und -leitungen außerhalb von Gebäuden. Es werden Reinigungsziele und Dokumentationshinweise für die Reinigungsarbeit gegeben.

2.2 Ablagerungen und Netzsituation

Da Abwasser keine homogene Flüssigkeit ist und in den meisten Kanälen instationäre Abflusszustände herrschen, ist davon auszugehen, dass auch **Ablagerungen** in unterschiedlicher Struktur vorliegen. In der Mehrheit setzen sich Ablagerungen aus Gemischen von mineralischen und organischen Bestandteilen, Papier, Haaren, Fasern, Nahrungsresten und kleineren Steinen zusammen [18, 19]. Spinn- und Faserstoffe können zu einer Armierung der Sedimente führen und so die Lösbarkeit in erheblichem Maße verschlechtern. Chemische und biologische Umsetzungsprozesse verstärken die Komplexität der Ablagerungszusammensetzung.

Untersuchungen zur Beschaffenheit von Ablagerungen [20] zeigen auf, dass der organische Anteil des Sedimentes im Bereich von 10-15% liegt. Die mit organischer Materie durchsetzten Ablagerungen weisen eine gesteigerte Bakterienaktivität auf. Zusammen mit den mineralischen Anteilen verbinden sich die organischen Bestandteile, die eine pastenartige Konsistenz aufweisen, zu einem kohäsiven Ablagerungsgemisch. Die entstehenden kohäsiven Ablagerungen, die nach ARTIÈRES [20] annähernd die gleichen bodenmechanischen Eigenschaften aufweisen wie ausgeprägt plastische Tone, lassen sich durch einen ungleichförmigen Kornaufbau und die kohäsiven Eigenschaften des Feinstanteiles als stabil bleibende Kanalisationsablagerungen beschreiben.

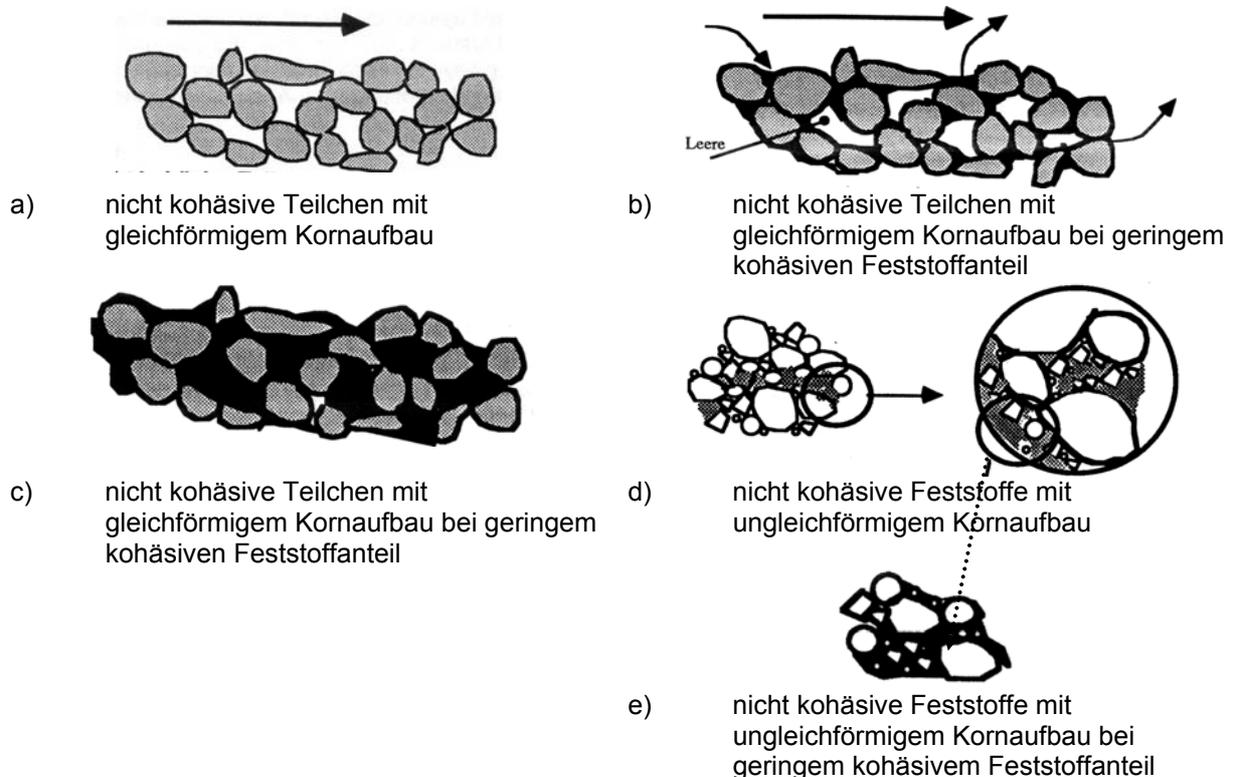


Bild 4: Struktur und Verhalten von Feststoffen [20]

Ablagerungen, die nur aus relativ gleichkörnigem Sand bestehen, lassen sich in der Regel durch betriebliche Reinigungsmaßnahmen leicht ausspülen, da ihnen die organischen Stoffe fehlen, die den inneren Zusammenhalt der Ablagerungen gewährleisten. Umgekehrt kann sich eine Ablagerung, die nur aus organischen Stoffen besteht, nicht verfestigen, da ihr die schweren mineralischen Partikel fehlen, welche für die Verdichtung der Ablagerung sorgen [21].

Ablagerungen haben infolge ihrer organischen Bestandteile und der physikalisch-chemischen Verhältnisse (alkalischer pH-Wert) die Eigenschaft, Schmutzstoffe zu akkumulieren [20, 22]. Die Anreicherung von Schadstoffen im Sediment, wie beispielsweise von Schwermetallen (Zn, Cu), kann zu erheblichen Konsequenzen für die Gewässergüte führen, sofern feine Partikel in den Vorfluter ausgetragen werden. Da Ablagerungen in etwa das gleiche Zeitsetzungsverhalten wie ein Ton aufweisen und sich demzufolge mit über die Zeit abnehmendem Wassergehalt verfestigen, sollten entsprechend kurze Reinigungsintervalle gewählt werden, damit die Ablagerungen nur unbedeutend konsolidieren können [22].

Neben den Ablagerungen im Sohlbereich der Abwasserkanäle reichert sich über den gesamten Kanalumfang eine Sielhaut als organischer Bewuchs an der Kanalinnenwand an. Die Sielhaut besteht überwiegend aus Wasser und lebender Materie, wie Pilzen und Bakterien. Sie entsteht normalerweise auf Flächen die vom Abwasser benetzt sind, jedoch ist auch der Bewuchs des Kanalscheitels bei hohen Abwassertemperaturen durch die Bildung von Kondensat möglich. BROMBACH et al. [22] zeigen durch Untersuchungen, dass die Sielhaut bei fehlender mittlerer Kornfraktion sowohl feine als auch ganz grobe mineralische Stoffe einlagert. Sofern keine Inspektion des Kanals ansteht, erscheint die Entfernung der Sielhaut von der Wand der Abwasserkanäle nicht sinnvoll [23], da neben erneut geschaffenen Angriffsflächen für die biogene Schwefelsäurekorrosion und dem damit verlorengegangenen Reinigungseffekt eine Mehrbelastung des Abwassers an organischen Inhaltsstoffen erzeugt wird.

Im Allgemeinen treten Ablagerungen in Kanälen nicht als kontinuierliche Fläche sondern als Dünen auf, die Längen zwischen 2 m und 5 m besitzen [24]. Dies erschwert die Angabe von Ablagerungsmengen. Bisher erfolgte dies uneinheitlich als Anteil an der Mischwasserfracht oder Trockenwetterfracht, als spezifische Massenangabe in Masse je Meter Kanallänge oder als spezifische Volumenangabe je Meter Kanallänge oder als Ablagerungshöhe. RISTENPART [25] stellt fest, dass die Ablagerungen zwar kurzfristigen, im Minutenbereich liegenden, und mittelfristigen, im Wochenbereich liegenden, Schwankungen unterliegen, dass aber die Menge an Ablagerungen einer Kanalstrecke durch eine charakteristische Ablagerungshöhe beschrieben werden kann. Bei der Ermittlung der Ablagerungsmenge aus der Ablagerungshöhe und der eingenommenen Segmentfläche wird auch der Kanaldurchmesser berücksichtigt. Deshalb wird in [25] empfohlen, die Angabe der

charakteristischen Ablagerungshöhe gegenüber spezifischen Mengen und Volumenangaben je Meter Kanallänge zu bevorzugen.

Die Wirkung und Einsetzbarkeit von Reinigungsverfahren und der damit verbundene Reinigungsaufwand sind neben der Ablagerungssituation auch von örtlichen **Netzbedingungen** abhängig. Diese sind gekennzeichnet durch (vgl. [1], [6], [26], [27], [28], [29]):

- die **Zugänglichkeit und Umgebungsbedingungen**, z.B. bei Schachtbauwerken in Verkehrsräumen,
- die **Netzgeometrie**, d.h. Nennweite, Querschnittsprofil, Gefälle,
- den **Rohrwerkstoff**, wie z.B. spröde oder weiche Materialien,
- die **Verbindungstechnik**, wie z.B. Steckmuffen oder Schweißnähte,
- den **Kanalzustand**, wie z.B. Riss- oder Scherbenbildung, und
- das **Entwässerungssystem** bzw.
- die **Abwasserinhaltsstoffe und Grobstoffanteile**.



a) Netzgeometrie:
großer Querschnitt



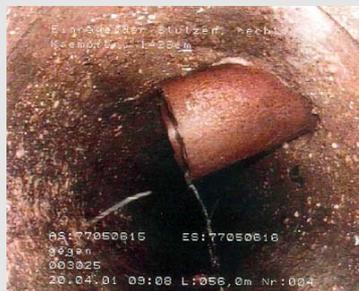
b) Umgebungsbedingungen:
Schacht im Verkehrsraum



c) Zugänglichkeit:
Schacht im Gelände



d) Rohrwerkstoff/Kanalzustand:
Mauerwerksfugen ausgewaschen



e) Verbindungstechnik:
seitlicher Anschluss



f) Rohrwerkstoff:
Kurzschlauch

Bild 5: Netzbedingungen, Bildbeispiele

2.3 Hochdruckspülverfahren

2.3.1 Verfahren

In mehr als 90 % aller Kanalreinigungsmaßnahmen wird sowohl zur Beseitigung von Ablagerungen im Rahmen der regelmäßigen Wartung als auch für die Reinigung als vorbereitende Maßnahme einer Kanalinspektion oder Sanierung das Hochdruckspülverfahren (HD-Spülverfahren) eingesetzt [6]. Es ist in der Regel nicht anwendbar bei sehr stark verfestigten Ablagerungen oder zur Beseitigung von Abflusshindernissen, z.B. einragende Anschlusskanäle, künstliche Hindernisse und Wurzeln. In diesen Fällen muss zusätzlich auf mechanische Reinigungsverfahren oder -geräte zurückgegriffen werden, die zum Teil auch direkt durch die Hochdruckspülfahrzeuge angetrieben werden können.

Die Kanalablagerungen werden bei der Hochdruckspülung durch Druckwasserstrahlen von der Rohrwandung gelöst und bis zu dem Arbeitsschacht gespült. Dort wird das Spülwasser mit den gelösten Ablagerungen in den Schlammbehälter eines Reinigungsfahrzeugs gesaugt. Nach Abschluss der Arbeiten wird der gesammelte Schlamm in einen Entwässerungscontainer geleert und anschließend entsorgt. Die gesamte Gerätetechnik ist auf einem Fahrzeug installiert und besteht im Wesentlichen aus den Komponenten Fahrzeugtank, Hochdruckpumpe, Spülschlauch, Saugschlauch und Reinigungsdüse (vgl. Bild 6).

Anzahl und Ausrichtung der Düseneinsätze, aber auch die Anzahl der Reinigungsdurchgänge pro Haltung sowie die Ziehgeschwindigkeit der Spüldüse hängen von der Art der Verschmutzung, der Menge des zu transportierenden Räumgutes und dem Reinigungszweck ab.

Bei der Durchführung der Hochdruckreinigung können in der Praxis auch Probleme auftreten [27]. In stark verschmutzten Kanälen kann es vorkommen, dass aufgrund zu großer Ablagerungsmengen schrittweise vom Beginn der Haltung gespült werden muss oder dass die Düse zur Seite hin auswandert und nur einen Teil der Sohle reinigt. Durch Druckschwankungen, die während der Hochdruckreinigung im Kanal auftreten, kann es über Hausanschlussleitungen zu Geräuschbelästigungen und sogar Wasseraustritt in Entwässerungsgegenständen der Anwohner kommen.



Bild 6: Hochdruckreinigung: Gerätetechnik und Fahrzeug-Komponenten

2.3.2 Hochdruckreinigungsfahrzeuge

Zur Hochdruckreinigung werden Hochdruckspülfahrzeuge, Schlammsaugfahrzeuge sowie kombinierte Spül- und Saugfahrzeuge mit und ohne Wasseraufbereitung einzeln oder im Gespann eingesetzt. In begehbaren Kanälen kann zur Beseitigung ausgedehnter, verfestigter Ablagerungen eine manuelle Reinigung auch mit Hilfsmitteln wie bspw. Spitzhacken, Drucklufthämmern, Sandstrahlgeräten und Hochdruckspülergeräten notwendig werden [30]. Der Einsatz dieser Geräte wurde im Rahmen des hier dargestellten Forschungsprojektes allerdings nicht betrachtet, da die entsprechenden Reinigungssituationen grundsätzlich eng mit den örtlichen Besonderheiten verknüpft sind und die Reinigungserfahrungen deswegen selten auf andere Anwendungsfälle übertragbar sind.



Bild 7: Hochdruckspülfahrzeug



Bild 8: Schlamm- und Feststoffsaugfahrzeug



Bild 9: Kombiniertes Spül- und Saugfahrzeug



Bild 10: Kombiniertes Spül- und Saugfahrzeug mit Wasseraufbereitung

Hochdruckspülfahrzeuge (Bild 7) verfügen über keine eigene Saugvorrichtung, um die abgespülten Kanalablagerungen im Schacht zu entnehmen. Demzufolge kann der gesamte Wasserbehälter zum Spülen genutzt werden. Häufig werden Spülfahrzeuge auch im Gespann mit Saugfahrzeugen eingesetzt.

Mit Saugfahrzeugen (Bild 8) werden Feststoffe aus Sinkkästen, Schächten und Gruben in den Schlammbehälter gesaugt. Sie werden häufig auch in der Kombination mit einem Hochdruckspülfahrzeug eingesetzt. Der Anwendungsbereich umfasst aber auch die Fäkal- und Klärschlamm Entsorgung.

Mit kombinierten Spül- und Saugfahrzeugen (Bild 9) werden die im o.g. Kapitel genannten Möglichkeiten beider Fahrzeugtypen in einer Fahrzeugart konzentriert (Reinigung, Sammlung und Transport bei vielseitigen Entsorgungsaufgaben).

Die Wasseraufbereitungsanlage (vgl. Bild 10) trennt den Schlamm von dem mitgesaugten Wasser. Während das Sandgut im Schlammbehälter verbleibt, wird das Schmutzwasser mechanisch gereinigt und anschließend dem Hochdruckspülvorgang wieder zur Verfügung gestellt.

Sowohl der Güteschutz Kanalbau [31] als auch das Regelwerk der ATV [32] und weiterführende Fachliteratur (vgl. [33]) fassen Anforderungen an die Leistungsparameter für Kanalreinigungsfahrzeuge zusammen (vgl. Tabelle 2). Darüber hinaus vergibt der Güteschutz Kanalbau seit 1995 das Gütezeichen R für Dienstleister, die die Reinigung von Abwasserkanälen anbieten. Im Rahmen einer Recherche bei NRW-Netzbetreibern wurden die in Tabelle 3 dargestellten Fahrzeugkennwerte von den Kanalbetrieben genannt.

Tabelle 2: Leistungsparameter und Richtwerte für Hochdruckspül- und Saugfahrzeuge mit Wasserrückgewinnung

DN**	Fassungsvermögen*	Pump- leistung**	Spül- schlauch**		Druck*		Vakuumpumpe*	Saug- schlauch*	Geräusch- pegel*
			Länge	DN	Fahrz	Düse			
[mm]	[m ³]	[l/min]	[m]	[Ø]	[bar]	[bar]	[m ³ /h]	[mm]	[d/BA]
200-800	10 – 12	ca. 320	120-200	25	150	80-120	1200 – 1500	100 – 125	max. 82
800-1200	14 – 18	ca. 390 – 450	120-200	32	150-180	80-120	1200 – 1500	125 – 150	max. 82
> 1200	bis 20	ca. 640 – 800 2 Pumpen	120-200	40	Keine Angaben				

(Nach *Güteschutz Kanalbau R [34], **ATV 1.7.3 [32])

Tabelle 3: Technische Parameter der Kanalreinigung, vgl. [6]

Kennwert		Spülfahrzeug	Saugfahrzeug	Komb. Spül- und Saugfahrzeug	Komb. Spül- und Saugfahrzeug mit Wasserrückgewinnung
Personaleinsatz	Anzahl der Personen auf dem Fahrzeug	2 Pers.	1 – 2 Pers.	1 – 3 Pers.	2 – 3 Pers.
Einsatzbereich*	Kanalnennweite 1. DN 100-300 2. DN 300-800 3. DN 800-1200 4. > DN 1200	70,00 % 60,00 % 70,00 % 30,00 %	50,00 % 62,50 % 62,50 % 62,50 %	84,38 % 93,75 % 83,87 % 45,16 %	56,52 % 82,61 % 78,26 % 82,61 %
Hochdruckpumpe*	Fördermenge 1. 320-390 liter/min 2. 390-450 liter/min 3. 450-640 liter/min 4. 640-800 liter/min	80,00 % 0,00 % 0,00 % 10,00 %	-	70,97 % 25,81 % 22,58 % 0,00 %	47,83 % 47,83 % 26,09 % 0,00 %
	Druck an der Pumpe 1. 80 – 120 bar 2. 120 – 150 bar 3. 150 – 180 bar	50,00 % 40,00 % 20,00 %	-	19,35 % 41,94 % 51,61 %	17,39 % 47,83 % 52,17 %
	Druck an der Pumpe 1. 80 – 120 bar 2. 120 – 150 bar 3. 150 – 180 bar	50,00 % 40,00 % 20,00 %	-	19,35 % 41,94 % 51,61 %	17,39 % 47,83 % 52,17 %
Vakuumpumpe*	Volumenstrom 1. 750 – 1500 m ³ /h 2. 1500 – 3000 m ³ /h 3. 3000 – 5000 m ³ /h (mit Saugunterstützung)	50,00 % 40,00 % 20,00 %	50,00 % 25,00 % 0,00 %	48,39 % 32,26 % 6,45 %	26,09 % 56,52 % 8,70 %
Hochdruckschlauch*	Durchmesser 1. DN 25 (bis 325 l/min) 2. DN 32 (bis 650 l/min) 3. DN 40 (bis 800 l/min)	60,00 % 40,00 % 10,00 %	-	77,42 % 41,94 % 12,90 %	62,50 % 62,50 % 12,50 %
	Schlauchlänge [m] Schlauchwerkstoff	50 bis 200 Meter 80 % Gummi 10 % Kunststoff	-	75 bis 220 Meter 64 % Gummi 16 % Kunststoff	80 – 300 Meter 65,2 % Gummi 17,4 % Kunststoff
Hochdruckdüse*	Druck an der Düse 1. 50 – 80 bar 2. 80 – 100 bar 3. 100 – 150 bar	70,00 % 60,00 % 10,00 %	-	28,13 % 56,25 % 31,25 %	39,13 % 43,48 % 34,78 %
	Werkstoff Düseneinsatz 1. Keramik 2. Edelstahl 3. Saphir	60,00 % 60,00 % 0,00 %	-	64,52 % 58,06 % 9,68 %	73,91 % 65,22 % 13,04 %

* Prozentuale Anzahl der Netzbetreiber, die die jeweilige Kenngröße einem Fahrzeugtyp zugeordnet haben.

2.3.3 Hochdruckspülschläuche

Je nach Förderstrom der Hochdruckpumpe werden Schläuche mit verschiedenen Nennweiten (Durchmesser) nach DIN 30705 Teil 4 [35] verwendet. Entsprechende Empfehlungen finden sich in [32] (vgl. Tabelle 4). Die Auswahl von Hochdruckschläuchen orientiert sich an den spezifischen Betriebsanforderungen, wie bspw. maximaler Betriebsdruck, minimaler Biegeradius, maximal zulässige Druckverluste (pro Meter), geringer Einzieh Widerstand und Beständigkeit gegenüber der Kanalatmosphäre. Die Schläuche bestehen aus Gummi oder Kunststoff. Typische Vor- und Nachteile sind in Tabelle 5 aufgeführt.

Tabelle 4: Nennweiten von HD-Spülschläuchen und empfohlener Förderstrom, nach [32]

Nennweite	Durchfluss [l/min]
DN 19	bis 200 [l/min]
DN 25	200 [l/min] bis [325 l/min]
DN 32	325 [l/min] bis 650 [l/min]
DN 40	650 [l/min] bis 800 [l/min]

Tabelle 5: Vor- und Nachteile von Gummi-/Kunststoff-Schläuchen (vgl. [36])

HD-Schlauch		
	Gummi	Kunststoff
Vorteile +++	<ul style="list-style-type: none"> ➤ abriebfeste Schlauchdecke und wenig empfindlich gegen äußere Beschädigung ➤ flexibler als Kunststoffschlauch ➤ kann am Einsatzort mit Schraubkupplungen repariert werden 	<ul style="list-style-type: none"> ➤ leichter als Gummischlauch, dadurch schwimmfähig, dadurch größere Zugweite der Kanaldüse ➤ geringere Reibung im Kanal als beim Gummischlauch ➤ geringere Druckverluste durch glatte Innenwand
Nachteile ---	<ul style="list-style-type: none"> ➤ höheres Gewicht als Kunststoffschlauch ➤ höhere Druckverluste als im Kunststoffschlauch durch raue Innenwand 	<ul style="list-style-type: none"> ➤ empfindlich gegen äußere Beschädigung ➤ Handling: vergleichsweise steif, ggf. Gummischlauch-Stück zwischen Kanaldüse und HD-Spülschlauch notwendig ➤ glatte Schlauchdecke: Schlauchlagen können sich bei Zugentlastung von der Haspel lösen

Die Druckverluste im Schlauch sind abhängig von der Länge des Schlauches und zum Teil abhängig von dem inneren Radius der Schlauchtrommel. Je kleiner der Radius, umso größer sind die Druckverluste [37]. Erfahrungsgemäß ist der Druckabfall im Kunststoffschlauch gegenüber dem Gummischlauch, aufgrund der glatten Wandung, um ca. 30% bis 40% geringer. Ebenso ist der Druckabfall beim gebrauchten Schlauch geringer als beim neu aufgezogenen Schlauch (auch aufgrund der Schlauchdehnungen und Vergrößerung des Innendurchmessers infolge des Gebrauchs) [38]. Nach [38] besteht die Möglichkeit, den Druckabfall in den Spülschläuchen unter Zugabe eines patentierten Strömungsbeschleunigers zu reduzieren.

2.3.4 Kanalreinigungsdüsen

Kanalreinigungsdüsen haben im Wesentlichen die zwei Aufgaben,

- den Schmutz von der Rohrwandung zu lösen und
- die Abwasserfließgeschwindigkeit zum Transport der Feststoffe zu erhöhen.

Die örtlichen Netzbedingungen sowie die Menge und Hartnäckigkeit der Verschmutzung beeinflussen den Schwierigkeitsgrad dieser Aufgabe. Düsenhersteller bieten vor diesem Hintergrund ein breites Angebot an Kanalreinigungsdüsen an. Die Düsen unterscheiden sich bspw. nach Form, Gewicht, Anzahl und Durchmesser der Düseneinsätze, Wasserführung im Düsenkörper und im Düseneinsatz und dem Schlauchanschluss. Im Rahmen der vorliegenden Untersuchungen wurde auch eine umfassende Marktübersicht erarbeitet und im Internet veröffentlicht (www.ikt.de). Für die unterschiedlichen Reinigungsaufgaben werden verschiedene Reinigungswerkzeuge genutzt, z.B.

- **rundumstrahlende** Düsen, um die gesamte Rohrwandung (bis ca. DN 600) bspw. für eine Inspektion zu reinigen (vgl. Bild 11),
- **rotierendstrahlende** Düsen, um Inkrustationen zu lösen (vgl. Bild 12),
- **Stocher-/Fräsdüsen** mit Vorstrahl, um Verstopfungen zu lösen (vgl. Bild 13),
- **flachstrahlende** Düsen (Sohlenreiniger) zum Transport von losen Ablagerungen in der Sohle großer Kanäle (ab DN 500) (vgl. Bild 14).

Rundumstrahlende Düsen unterscheiden sich nach Anzahl der Düseneinsätze (6-30 Stück) und deren Abstrahlwinkel. Ein flacher Abstrahlwinkel (6 – 15 Grad) erzeugt eine hohe Zugleistung der Düse. Bei einem weitem Winkel (15 – 35 Grad) erhöht sich die Lösekraft gegenüber hartnäckigen Verschmutzungen an der Rohrwandung. Mit zunehmender Kanalquerschnittsgröße (ca. ab DN 500) verringert sich das Räumvermögen, um gelöste Ablagerungen bis zum Entnahmeschacht zu

transportieren. Aufgrund ihrer Strahlcharakteristik erzeugen rundumstrahlende Düsen große Luftbewegungen im Kanal. Dies kann u.U. die Aerosolbelastung am Arbeitsschacht und das Risiko für Ausblasungen von Geruchsverschlüssen bei Grundstücksentwässerungsanlagen erhöhen. Mit einem weiten Abstrahlwinkel oder auch niedrigeren Druck- und Durchflusswerten verringert sich dieses Risiko.



Bild 11: Rundumstrahlende Düse, Beispiel

Rotierendstrahlende Düsen werden zur Reinigung des gesamten Rohrumfangs eingesetzt, insbesondere zum Lösen von Inkrustationen, Fett und leichten Wurzeleinwüchsen. Die Verteilung der Hochdruckwasserstrahlen erfolgt durch einen rotierenden Körper in Düsenmitte. Dadurch kann die gesamte Rohrrinnenfläche mit nur wenigen, aber energiereichen Strahlen gereinigt werden. Darüber hinaus soll die Reinigungswirkung bei einigen Produkten durch Vibration der Düse begünstigt werden.



Bild 12: Rotationsdüse, Beispiel

Fräsdüsen bzw. Stocherdüsen sind durch eine im Querschnitt scharfkantige Bauform und mehrere nach vorn gerichtete Bohrstrahlen zur Beseitigung von Verstopfungen geeignet. Damit lassen sich Ablagerungen an schwer zugänglichen Stellen mitunter auch zum nächsten Schacht transportieren. Einige

rundumstrahlende Düsen sind ebenfalls mit einem Vorstrahl ausgestattet, um ggf. Verstopfungen aufzulockern.

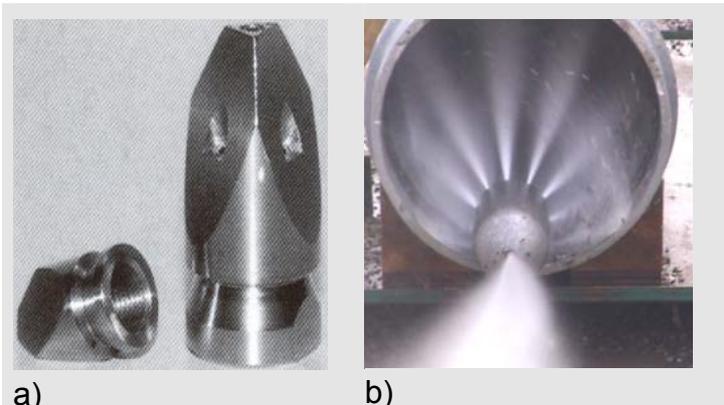


Bild 13: Düsenbeispiele: a) Stocher-/Fräsdüsen
b) rundumstrahlende Düse mit Vorstrahl

Flachstrahlende Düsen (Sohlenreiniger) werden überwiegend zur Reinigung der Kanalsohle und zur Räumung von schweren Ablagerungen in größeren Kanälen (ab DN 500) eingesetzt. Um nicht in größeren Abwasserströmen aufzuschwimmen, sind Sohlenreiniger im Querschnitt größer und massiger als die meisten rundumstrahlenden Düsen. Sohlenreinigende Düsen sind häufig für hohe Förderströme, z.B. 320 l/min, ausgelegt.

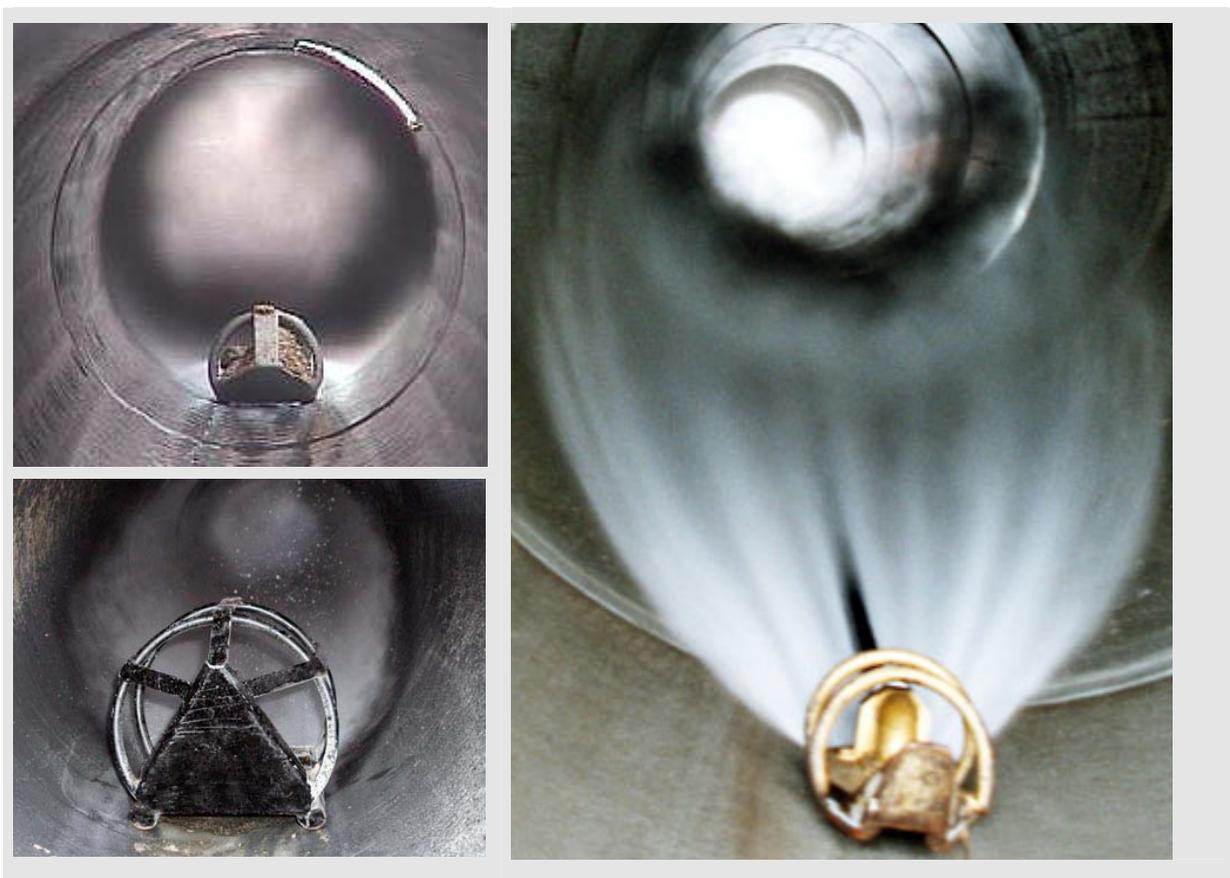


Bild 14: Sohlenreiniger, Beispiele

Mit Hilfe von **Ejektordüsen** (flachstrahlende Düse nach dem Ejektorwirkprinzip) kann ein außerordentlich hoher Volumenstrom in Rohrleitungen erzeugt werden, der Ablagerungen aufwirbelt und transportiert. In Praxiseinsätzen konnte ein Volumenstrom von über 3 m³/min erzeugt werden [39]. Ejektordüsen können nach dem Prinzip der Wasserstrahlpumpe auch zur Vorflutsicherung, z.B. durch Überleiten, eingesetzt werden.



Ejektordüse zur Kanalreinigung
Bild 15: Ejektordüsen



Schwalldüse nach dem Ejektorprinzip

2.4 Hochdruckspülbeständigkeit

Bei der Kanalreinigung mittels Hochdruckspülverfahren werden die Bauteiloberflächen der Rohrleitungen zeitweise hohen Belastungen ausgesetzt. Üblich bzw. denkbar sind z.B. Belastungen aus

- dem Auftreffen des Hochdruckwasserstrahls,
- dem Aufprall von Geschiebepartikeln,
- dem Abrieb durch Transport von Wasser und gelöstem Geschiebe,
- dem „Schleifen“ von Düse und Schlauch,
- dem „Anprallen“ oder „Herabfallen“ der Düse.

Um das Beanspruchungsverhalten der am Markt angebotenen Kanalbauteile (Rohre, Formstücke) unter diesen Belastungen zu prüfen, wurden in der Vergangenheit verschiedene Versuchsanordnungen und Prüfprogramme insbesondere durch Netzbetreiber und Normungsgruppen entwickelt. Die im Rahmen dieses Forschungsvorhabens berücksichtigten Prüfeempfehlungen werden im Folgenden zusammenfassend dargestellt (vgl. Tabelle 6).

Tabelle 6: Prüfbeschreibungen zur Untersuchung der Hochdruckspülbeständigkeit

Bezeichnung	Hamburger Modell	DIN V 4264 Normentwurf	DIN V 19517 (Vornorm)		Technical Report prCEN/TR 14920
Literatur	[40]	[41]	[42]		[45]
Titel	Praxisnahe Hochdruckspülversuche	Anforderungen und Prüfungen für Abwasserkanäle und -leitungen bei Hochdruckreinigung	Prüfverfahren zur Ermittlung der Hochdruckspülfestigkeit von Rohren für Abwasserleitungen		Jetting restance of drain and sewer pipes - Moving jet test method
Anwendungsbereich	Beobachtung der Widerstandsfähigkeit von Rohrleitungen gegenüber HD-Reinigung	Bauteile und Werkstoffe von erdverlegten Abwasserkanälen und -leitungen (außerhalb von Gebäuden als Freispigelleitung)	Rohre, Formstücke und Verbindungen für Abwasserleitungen und -kanäle		Rohre, Formstücke und Verbindungen für Abwasserleitungen und -kanäle
Prüfaufbau					
Prüfstrecke	ca. 20 m	ca. 20 m	1,50 m	> 1,00m	>1,80m
Düsenstrahl	beweglich / stationär	beweglich	beweglich	stationär	beweglich
Art des Düsenkopfs	keine Angaben	Rundstrahldüsenkopf nach Skizze, Gewicht 3,0 ± 1,0 kg, ohne Schlitten	Einzeldüse	Einzeldüse	Einzeldüse mit Keramikeinsatz und einem Ausbreitungswinkel von $\omega \leq 3,3^\circ$
Anzahl der Einsätze	8 Düseneinsätze	8 Düseneinsätze	1	1	1
Ø Düsenöffnung	2,4 (± 1) mm	2,4 (± 0,1) mm	2,8 (+0,05) mm	1,0 (+0,05) mm	2,8 (± 0,2) mm
Abstrahlwinkel [°]	30°	30°	30 (±1)°	30 (±1)°	30 (±1)°
Strahlabstand	keine Angaben	keine Angaben	8,5 (±0,5) mm	5 (± 0,5) mm	10,0 (-2) mm
Prüfparameter					
Druck an der Düse	120 bar	120 (± 5) bar	120 (±2) bar	120 -340 bar	120 bar
Durchfluss	320 l/min	320 l/min	46 - 50 l/min	3,65 - 8,25 l/min	46 l/min
Reinigungszyklen	30 Zyklen, 3 x stationär	60 Zyklen, 3 x stationär	50 Zyklen	10 Prüfungen	50 Zyklen
Reinigungsgeschwindigkeit	Vorschub 1,0 m/s, Rückzug 0,1 m/s;	Vorschub 1,0 m/s, Rückzug 0,1 m/s;	1 (±0,1)m/min	0	1 (±0,1)m/min
Geschiebe	5 Liter Splitt	---	---	---	---

2.4.1 Hamburger Modell

Nach dem sogenannten Hamburger Modell [40] wird die Widerstandsfähigkeit von Rohren, Rohrverbindungen und eingebundenen Seitenzuläufen gegenüber Hochdruckreinigung an einem mindestens 20 m langen Rohrstrang untersucht. Entwickelt wurde der Hamburger Spülversuch 1988 von der Hamburger Stadtentwässerung mit Blick auf die tägliche Reinigungspraxis. Der Versuch wird grundsätzlich mit den zum Prüfzeitpunkt üblichen Reinigungsfahrzeugen, Spülschläuchen und Spüldüsen durchgeführt. Alle für die Prüfung eingesetzten Betriebsmittel entsprechen dem jeweiligen Stand der Technik.

Es werden insgesamt 30 Spüldurchgänge, entsprechend einer Lebensdauer von 30 Jahren bei jährlicher Reinigung, durchgeführt. Vor jedem Reinigungszyklus, bestehend aus dem Einbringen und Zurückziehen der Spüldüse, werden 5 Liter Prüfgeschiebe am Ende der Haltung eingefüllt. Durch die Reinigung wird das Geschiebe durch die Haltung transportiert und schließlich herausgespült. Dieser Transportvorgang erzeugt mit der Praxis vergleichbare Beanspruchungen an den Rohrwandungen, den Rohrverbindungen und an den Zuläufen. Die Prüfparameter sind in Tabelle 7 zusammengefasst.

Tabelle 7: Prüfparameter nach dem Hamburger Modell [40]

Prüfparameter	Geforderter Wert
Düse	
Druck an der Düse	120 bar
Durchfluss	ca. 320 l/min
Abstrahlwinkel	30°
Anzahl der Düseneinsätze	8
Durchmesser Düseneinsätze	2,4 mm
Vorlaufgeschwindigkeit	1,0 m/s
Rückzugsgeschwindigkeit	0,1 m/s
Prüfgeschiebe	
Art	Winterstreusplitt, gebrochenes Material, Korngröße 3 – 6 mm
Menge	5 Liter je Spüldurchgang
Prüfhaltung	
Prüfstrecke	mindestens 20,0 m (zuzügl. Vorlauf- und Nachlaufstrecke)
Durchmesser	DN 300 (vorzugsweise)
Gesamtlänge	ca. 20 m
Rohrstöße	≤ 3
Hausanschlüsse	4 (2 im Scheitel, 2 im Kämpfer) DN 150
Allgemeines	
Anzahl Reinigungszyklen	30
Stationäre Belastung	durch Stillstand der Düse (3 Minuten) an einer Stelle

2.4.2 DIN 4264 (Entwurf)

Der Entwurf der DIN 4264 [41] zur Untersuchung der Widerstandsfähigkeit von Rohr- und Sanierungswerkstoffen gegenüber Hochdruckreinigung entspricht im Wesentlichen dem in Abschnitt 2.4.1 dargestellten Hamburger Modell. Die Prüfungen nach dem Normentwurf werden allerdings mit 60 statt 30 Reinigungszyklen *ohne* Prüfgeschiebe durchgeführt. Darüber hinaus werden Toleranzmaße für einzelne Prüfparameter vorgegeben. Einzelheiten sind Tabelle 8 zu entnehmen.

Tabelle 8: Prüfparameter nach dem Normentwurf DIN 4264 [41]

Prüfparameter	Geforderter Wert
Düse	
Druck an der Düse	(120 ± 5) bar
Durchfluss	ca. 320 l/min
Abstrahlwinkel	30°
Anzahl der Düseneinsätze	8
Durchmesser Düseneinsätze	2,4 mm ± 1 mm
Vorlaufgeschwindigkeit	(1 ± 0,1) m/s
Rückzugsgeschwindigkeit	(0,1 ± 0,02) m/s
Prüfgeschiebe	
Art/Menge	ohne Zugabe von Prüfgeschiebe
Prüfhaltung	
Prüfstrecke	mindestens 20,0 m (zuzügl. Vorlauf- und Nachlaufstrecke)
Durchmesser	DN 300 (vorzugsweise)
Rohrstöße	≤ 3
Hausanschlüsse	4 (2 im Scheitel, 2 im Kämpfer) DN 150
Allgemeines	
Anzahl Reinigungszyklen	60 Stck.
Stationäre Belastung	durch Stillstand der Düse (3 Minuten) an einer Stelle

2.4.3 DIN V 19517 (Entwurf)

Ein Entwurf zur Vornorm DIN V 19517 [42] legt Prüfverfahren zur Ermittlung der Beständigkeit von Rohren und Formstücken, einschließlich Verbindungen, für Abwasserleitungen und -kanäle gegenüber der Reinigung mittels Hochdruckspülverfahren fest. Im Wesentlichen orientiert sich diese Norm an dem Verfahren des WRc [43] sowie den Schweizer Untersuchungen [44]. Dabei werden die folgenden zwei Prüfungen unterschieden:

Prüfung mit beweglicher Düse

Bei der Prüfung mit beweglicher Düse wird eine Einzelstrahl-Düse mit exakt definierten Eigenschaften über die Innenfläche des Prüfkörpers (Rohrinnenfläche), bestehend aus einem Rohr der Nennweite DN 300 von ca. 1,80 m Länge (vgl. Bild 16) und einem Abzweig, einschließlich Rohrverbindung mit Dichtungsmitteln, bewegt. Zugrunde gelegt werden 50 Spüldurchgänge, entsprechend einer Lebensdauer von 50 Jahren bei jährlicher Reinigung der Kanäle. In Tabelle 9 werden die Randbedingungen für die Prüfung mit beweglicher Düse zusammengefasst.

Tabelle 9: Randbedingungen der Prüfung mit beweglicher Düse nach [42]

Prüfparameter	Geforderter Wert	
Strahlwinkel	$(30 \pm 1)^\circ$	
Prüfdruck an der Düse	(120 ± 2) bar	
Geschwindigkeit	$(1 \pm 0,1)$ m/min	
Abstand Oberfläche Prüfstück / Mittelpunkt Düsenöffnung	$(8,5 \pm 0,5)$ mm	
Durchmesser Düsenöffnung	$(2,8^{ -0,00}_{ +0,05})$ mm	
Durchfluss	$(46 \text{ bis } 50 \pm 2)$ l/min	
Durchmesser Probekörper	DN 300	
Prüfstrecke	1,50 m zzgl. Vor- und Nachlaufstrecke	
Prüfkörper	Rohrschaft zzgl. Abzweig und Muffe	
Reinigungszyklen	50	

Prüfung mit stationärer Düse

Bei der Prüfung mit stationärer Düse wirkt ein Hochdruckwasserstrahl jeweils für die Dauer von drei Minuten auf einen der insgesamt zehn Prüfpunkte der Rohrrinnenfläche. Die Prüfung wird an einem Probekörper, bestehend aus einem Rohr ohne Abzweig und ohne Muffe der Nennweite DN 300, von mindestens 1,00 m Länge durchgeführt. In Tabelle 10 werden die Randbedingungen für die Prüfung mit stationärer Düse zusammengefasst.

Tabelle 10: Randbedingungen der Prüfung mit stationärer Düse nach [42]

Prüfparamter	Geforderter Wert
Strahlwinkel	$(30 \pm 1)^\circ$
Prüfdruck an der Düse	120 bis 340 bar (nach Angaben des Rohrerstellers)
Abstand Oberfläche Prüfstück / Mittelpunkt Düsenöffnung	$(5,0 \pm 0,5)$ mm
Durchmesser Düsenöffnung	$(1,0 \begin{smallmatrix} -0,00 \\ +0,05 \end{smallmatrix})$ mm
Durchfluss	3,65 bis 8,25 l/min (je nach gewählter Druckstufe)
Durchmesser Probekörper	DN 300
Prüfstrecke	mindestens 1,0 m
Prüfkörper	Rohrschaft ohne Abzweig und ohne Muffe
Anzahl der Einzelprüfungen	10 Einzelprüfungen
Prüfdauer	3 min je Einzelprüfung

2.4.4 Technical Report (TR 14920)

Der Technical Report (TR 14920) [45] ist ein technischer Bericht der europäischen Normungsgruppe TC 165/WG 22. Er beschreibt den Aufbau und die Durchführung von Prüfungen zur Widerstandsfähigkeit von Abwasserkanälen und -leitungen beim Hochdruckspülen. Der Technical Report knüpft an die Vornorm DIN V 19517 an. Die HD-Belastung wird durch einen einzelnen beweglichen Düsenstrahl aufgebracht, eine stationäre Belastung ist allerdings nicht vorgesehen. Zur Beschreibung des HD-Strahls werden folgende Kenngrößen genutzt:

- Spülstrahlleistung
- Spülstrahlleistungsdichte
- Durchflussbeiwert für den Düseneinsatz.

Tabelle 11: Randbedingungen der Prüfung nach TR 14920 [45]

Prüfparameter	Geforderter Wert
Düse	
Druck an der Düse	120 (± 2) bar
Durchfluss	46 ($\pm 0,5$) l/min
Abstrahlwinkel	30 (± 1)°
Anzahl der Düseneinsätze	1 (aus Keramik)
Durchmesser Düseneinsätze	2,8 ($\pm 0,02$) mm
Strahlausbreitungswinkel ω	$\leq 3,3^\circ$
Abstand Oberfläche Prüfstück / Mittelpunkt Düsenöffnung	10,0 mm
Reinigungsgeschwindigkeit	1 m/min
Prüfgeschiebe	
Art/Menge	ohne Zugabe von Prüfgeschiebe
Prüfhaltung	
Prüfstrecke	$\geq 1,50$ m (zuzügl. Vorlauf- und Nachlaufstrecke von 0,15 m)
Durchmesser	keine Angabe
Rohrstöße	1
Anschlüsse	1 Kernbohrung
Allgemeines	
Anzahl Reinigungszyklen	50 Stck.
Stationäre Belastung	keine stationären Versuche

3 Praxiserfahrungen

3.1 Erhebungsumfang

Zur Erfassung der wesentlichen Randbedingungen des Reinigungsprozesses und als Basis für die Auslegung der praxisorientierten Versuche in den IKT-Prüfstrecken wurden Reinigungseinsätze in den Kanalnetzen der beteiligten Netzbetreiber vor Ort begleitet und die Ablagerungseigenschaften auf Grundlage von umfassenden Probenentnahmen untersucht. Im Vordergrund stand dabei insbesondere die Aufnahme von betrieblichen Einflussfaktoren, die in Laborversuchen nur schwer nachzubilden sind, wie Mitarbeiter- und Fahrzeugeinsatz, Reinigungsabläufe und die spezifische Ablagerungs- und Reinigungssituation, wie sie oft erst nach mehrmonatiger Betriebsdauer durch komplexe mechanische und biologische Prozesse entsteht.

Im Einzelnen wurden Untersuchungen in den Netzen der Städte Bochum, Detmold, Gelsenkirchen, Hagen, Holzwickede, München, Ratingen, Recklinghausen, Warendorf, Witten und Wuppertal durchgeführt. In fünf Kommunen wurden Ablagerungsproben aus insgesamt 64 Haltungen entnommen. Bei 11 Netzbetreibern wurden über 100 Reinigungseinsätze begleitet. Dabei wurden 11 verschiedene Fahrzeugtypen und zahlreiche Düsenprodukte eingesetzt. In allen Fällen wurden die vor Ort eingesetzte Gerätetechnik erfasst und das Betriebspersonal bzw. die beteiligten Dienstleister hinsichtlich der üblichen und speziellen Reinigungsmethoden sowie Praxisprobleme und der derzeit umgesetzten Lösungsansätze befragt. Nachfolgend sind die wesentlichen Erfahrungen aus diesen Untersuchungen dargestellt, die auch als Grundlage zur Formulierung konkreter Anforderungen an das Versuchskonzept dienen (vgl. Kapitel 4 ff.).

3.2 Kanalablagerungen

Die örtlichen Netzbedingungen haben einen wesentlichen Einfluss auf Menge und Zusammensetzung von Kanalablagerungen. Zunächst gelangen mineralische und organische Abwasserinhaltsstoffe über verschiedene Einleitungsstellen in das Kanalnetz. Sie stammen aus Straßenabläufen, Abwasserschächten, Grundstücksentwässerungen (Dach-/Hofflächen), gewerblichem, häuslichem und industriellem Abwasser, aber auch aus Einspülungen über Undichtigkeiten des Kanalsystems. Die örtlichen Bauwerksgegebenheiten, wie z.B. Nennweite, Querschnittsprofil, Gefälle, Kanalzustand, Entwässerungssystem und Auslastungsgrad, können dann das Sedimentations- bzw. Haftverhalten dieser Stoffe erheblich beeinflussen. So bereiten in Trennsystemen häufig die Anfangshaltungen, in Mischsystemen dagegen eher die großen Hauptsammler einen besonderen Reinigungsaufwand. Im Folgenden werden typische Ablagerungssituationen und Abflusshindernisse dargestellt, mögliche Ablagerungseigenschaften bestimmt und das Ablagerungsaufkommen beispielhaft in den Netzen von zwei Kanalnetzbetreibern ermittelt.

3.2.1 Leicht lösliche Ablagerungen

3.2.1.1 Lockere Ablagerungen

Nicht bindige Ablagerungen, die ausschließlich aus mineralischen Bestandteilen bestehen, lassen sich i. d. R. leicht lösen und aus dem Netz entfernen. Auch rein organische Ablagerungen sind leicht lösbar, da ihnen die Stabilität aus den mineralischen Kornfraktionen fehlt. Der Reinigungsaufwand für rein organische und insbesondere rein mineralische Ablagerungen ist damit hauptsächlich durch die Ablagerungsmenge bestimmt. Mineralische Ablagerungen herrschen im Allgemeinen vor (vgl. Bild 17).

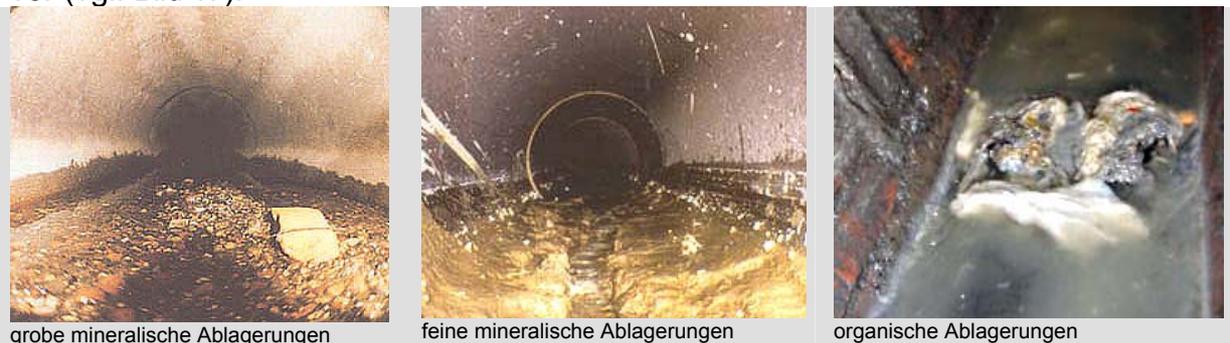


Bild 17: Lockere Ablagerungen, Bildbeispiele

3.2.1.2 Sielhaut

Zur Vorbereitung einer Kamerainspektion zur Kanalzustandserfassung wird der Kanal gereinigt und dabei grundsätzlich auch die Sielhaut entfernt. In der Regel stellt dies keinen besonderen Aufwand dar, allerdings kann bei großen Dimensionen die vergleichsweise geringe Aufprallkraft des Spülstrahls und unzureichende Spülstrahlbreite einer zuverlässigen Entfernung der Sielhaut entgegenstehen (Bild 18).



Bild 18: Sielhaut vor der Reinigung (links), Sielhautstreifen nach der Reinigung, Bildbeispiele (mitte und rechts)

3.2.2 Schwer lösbare Ablagerungen und Hindernisse

3.2.2.1 Verfestigte Ablagerungen

Ablagerungen können Verfestigungsprozessen im Kanalnetz unterliegen oder bereits als feste Massen in das Netz eingetragen werden, z. B. als Fehleinleitungen aus Abscheideanlagen oder Baustellenrückstände (Bild 19). Die Entfernung stark verfestigter Ablagerungen ist i.d.R. zeit- und kostenintensiv. Häufig müssen schneidende oder schlagende Düsen sowie Spezialwerkzeuge eingesetzt werden.



Stück einer verfestigten Ablagerung



Baustellenrückstände aus dem Kanal

Bild 19: Verfestigte Ablagerungen, Bildbeispiele

3.2.2.2 Inkrustationen

Abwasserinhaltsstoffe, die auf der Rohrwandung stark anhaften, können auf Dauer zu sogenannten Inkrustationen führen. In kommunalen Netzen tritt dies vorwiegend im Umfeld von Industrieeinleitungen auf. Netzabschnitte, die in kalk- oder eisenhaltigem Grundwasser liegen, können ebenfalls betroffen sein. Auch gemischte Sedimente aus mineralischem und organischem Material neigen zur Verfestigung und Inkrustationsbildung. Das organische Material stabilisiert das Gemisch und verleiht ihm kohäsive Eigenschaften; der mineralische Anteil verleiht der Ablagerung Festigkeit.



Inkrustation nach erster Reinigung, großflächig



Inkrustation nach erster Reinigung, stellenweise

Bild 20: Inkrustationen, Bildbeispiele

3.2.2.3 Wurzeleinwuchs

Wurzeln dringen durch Muffen, undichte Hausanschluss-Stutzen oder schadhafte Rohrabschnitte in die Kanalisation ein. Dort bilden sie nach anfänglich feinen Haarwurzeln dichte Wurzelbüsche aus, die den Abfluss stark behindern können. Falls die Rohrleitung nicht saniert wird, muss der Rohrquerschnitt regelmäßig frei geschnitten werden.



Bild 21: Wurzeleinwuchs, Bildbeispiele

3.2.2.4 Verzopfungen und Fette

In ständig oder zeitweise vollgefüllten Leitungen, wie Dükern oder großen Stauraumkanälen, können sich verstärkt Ablagerungen im Scheitelbereich bilden, wie „Verzopfungen“ und Fettablagerungen (Bild 23). Die Reinigung dieser Ablagerungen ist dann häufig mit besonderem Aufwand verbunden, da die üblichen, auf der Sohle geführten Reinigungsdüsen diese Bereiche weniger wirksam erreichen.



Bild 22: Stauraumkanal: Verzopfungen (links) und Fettablagerungen im Scheitelbereich (rechts)

3.2.2.5 Verstopfungen/Hindernisse

Verstopfungen gehen meist auf besondere Ursachen zurück. So können u.a. Wurzeln, einragende Bauteile und Hindernisse die im Abwasser enthaltenen Feststoffe auffangen und schließlich zu Verstopfungen führen.



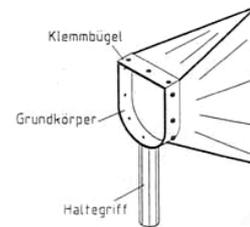
Bild 23: Verstopfungen/Hindernisse, Bildbeispiele

3.2.3 Bestimmung von Ablagerungseigenschaften

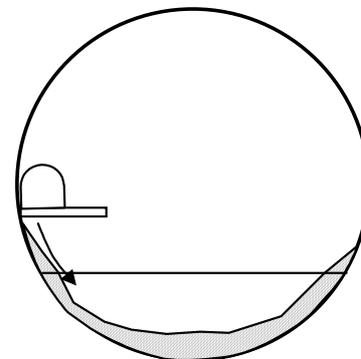
Die Transportfähigkeit von Ablagerungen hängt wesentlich von ihrer Menge, Konsistenz und Zusammensetzung ab [20]. Um die Bandbreite der zu erwartenden Ablagerungsmaterialien näher beschreiben zu können, wurden in den Kanalnetzen der Städte **Bochum, Gelsenkirchen, Hagen, Holzwickede, Recklinghausen und München** über hundert Ablagerungsproben aus 64 Haltungen entnommen und im Labor analysiert.

Bei der Probenentnahme wurde ein Kanalschaber auf die Rohrwandung aufgesetzt und in einem Zug, unter den fließenden Abwasserstrom hindurch, um den gesamten Rohrquerschnitt geführt. Die Schaberkante hatte dabei ständig Kontakt mit der Kanalwandung (vgl. Bild 24). Bei dieser Art der Probenentnahme wird auch die Sielhaut berücksichtigt, so dass das gesamte Schmutzpotential über den Kanalquerschnitt ermittelt werden konnte. Durch die definierte Kantenlänge des

Kanalschabers von 10 cm kann das Ablagerungspotential in einer Haltung pro laufenden Meter bzw. pro Haltung abgeschätzt werden. Voraussetzung dafür ist eine gleichmäßige Verteilung der Ablagerungen über die gesamte Haltung.



Kanalschaber



Vorgehen bei der Probenentnahme

Bild 24: Probenentnahme mit einem Kanalschaber

Insgesamt wurden 114 Proben unmittelbar nach der Entnahme hinsichtlich der Parameter Trockensubstanz (TS), Glühverlust (σ TS), gesamter Chemischer Sauerstoffbedarf (CSB_{tot}) und gelöster Chemischer Sauerstoffbedarf (CSB_{diss}) untersucht [46]. Für die Ermittlung des maximalen CSB-Potentials erfolgt eine Probenaufbereitung durch Homogenisierung bei 13.000 U/min. Durch die Homogenisierung ist eine Probenaufbereitung gewährleistet, die eine zuverlässige Reproduzierbarkeit der Ergebnisse ermöglicht. Nachteilig ist, dass bei diesem Probenaufschlussverfahren durch die hohe mechanische Belastung des Dispersiersystems Stoffstrukturen getrennt oder aufgebrochen werden, die bei einem Abflussereignis nicht unbedingt zerstört werden. Als Folge kann der Messwert für das CSB-Potential höher liegen als tatsächlich unter natürlichen Bedingungen. Zusätzlich ist deshalb ein „reaktives Potential“ (vgl. Tabelle 12) ermittelt worden, bei dem die Probe nicht homogenisiert, sondern in einem Überkopfschüttler aufbereitet wurde. Durch diese mechanische Beanspruchung sollen Abflussverhältnisse vereinfacht nachgebildet werden.

Tabelle 12: Anzahl der analysierten Ablagerungsproben

Kanalnetz	Anzahl Proben	Korngrößenverteilung	TR	OTS	Maximales Potential*		Reaktives Potential**	
					CSB _{tot}	CSB _{diss}	CSB _{tot}	CSB _{diss}
Bochum	4	2	4	4	4	4	4	4
Hagen	3	2	3	3	3	3	3	3
Gelsenkirchen	18	2	18	18	18	18	18	18
Holzwickede	3	-	3	3	3	-	-	-
München	88	2	88	88	88	20	20	20
Summe	116		116	116	116	45	45	45

* Maximales Potential für gesamten Chemischen Sauerstoff Bedarf (CSB_{tot}) und gelösten Chemischen Sauerstoff Bedarf (CSB_{diss}) nach Probenaufbereitung durch Homogenisierung bei 13.000 U/min

** Reaktives Potential für gesamten Chemischen Sauerstoff Bedarf (CSB_{tot}) und gelösten Chemischen Sauerstoff Bedarf (CSB_{diss}) nach Aufbereitung der Proben in einem Überkopfschüttler (ohne vollständig Homogenisierung)

Darüber hinaus wurden im Bodenlabor des IKT die Sieblinien ermittelt (Bild 26). Die Korngrößenverteilung wurde nach DIN 18123 [47] bestimmt. Bei den Proben, bei denen ein hoher Feinanteil (< 0,063) zu erwarten war, wurden die feinen Bestandteile zuvor abgeschlämmt (vgl. Bild 25).



Bild 25: Abschlämmen der feinen Bestandteile

Die ermittelten Sieblinien wurden mit Literaturangaben verglichen. Es bestätigte sich, dass Kanalablagerungen sehr unterschiedliche Kornfraktionen aufweisen können. Auch in der Literatur wird eine große Bandbreite der Korngrößenverteilungen angegeben (vgl. [22], [48]).

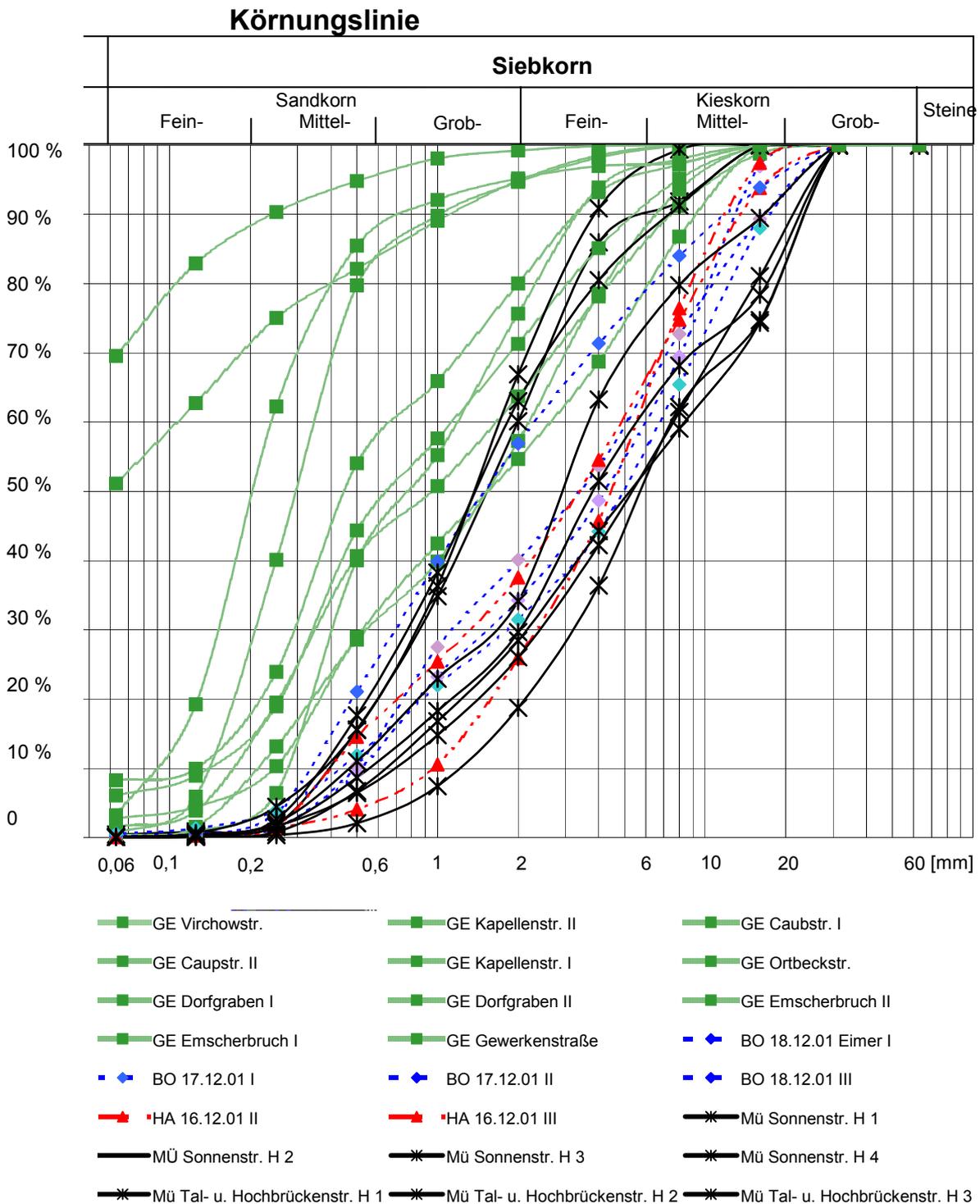


Bild 26: Darstellung der Sieblinien aus den Kanalablagerungsproben

Die Sieblinien der Proben aus München, Hagen und Bochum zeigen einen ähnlichen Verlauf. Dagegen sind sämtliche Proben aus Gelsenkirchen feiner, mit deutlich höher angeordneten Linienvläufen. Zwei der dargestellten Sieblinien weisen einen hohen Feinanteil zwischen 50 und 70 % auf und zeigen nur wenige Partikel (< 10 %) mit einem Durchmesser größer als 1 mm. Bei den übrigen Siebanalysen liegen die

Feinanteile (< 0,063 mm) unter 10 %. Hier liegt eine große Bandbreite an Partikeln vor, die größer als 1 mm sind (7,5 – 90 %). Für den Parameter TS - Trockensubstanz variieren die Messergebnisse in den vier Städten deutlich. Eine Ausnahme bilden die Messungen in der Stadt Bochum (4 Einzelmessungen), die alle in einem sehr engen Bereich liegen (Bild 27). Hier bestätigt sich, dass es sich in diesem Fall um verhältnismäßig ähnliche Probenentnahmestellen handelte.

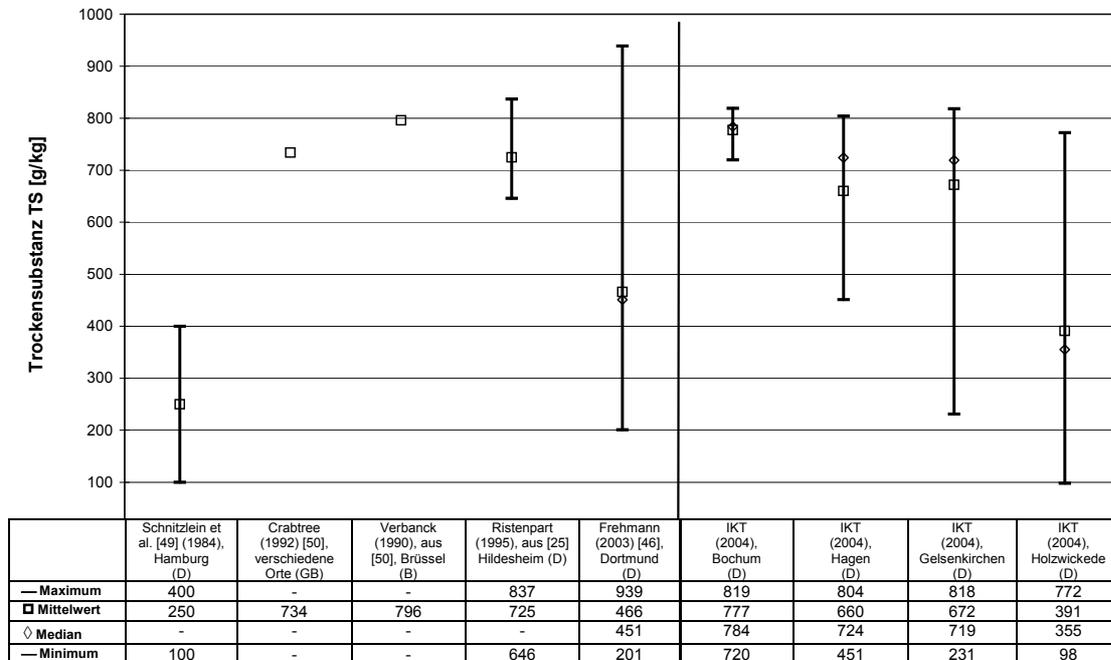


Bild 27: Vergleich der Messungen mit Literaturdaten für den Parameter TS

Für weitere Gegenüberstellungen wurden Literaturangaben mit vergleichbaren Kenngrößen und Einheiten ausgewählt. Verglichen wurden der Glühverlust (GV), der chemische Sauerstoffbedarf (CSB) sowie die Korngrößen und die entsprechenden Verteilungen (Tabelle 13 und Tabelle 14).

Tabelle 13: Gegenüberstellung der untersuchten Werte der Kanalablagerungen

		IKT - Untersuchung			Literaturauswertung				
		Hagen/Bochum	Gelsenkirchen	München	Hildesheim [25]	Dundee [50]		Hamburg [50]	
						Typ A	Typ C	M*	O**
GV [%]	min	2	1,8	1,3	3,6			5	25
	max	36	75	42	11,8			20	60
	Ø	8	12	12	7,6	10	56		
CSB_{tot} [g/kg]	min	5,4	0,5	0,1	10,46	6	14		
	max	33,1 (545,7)	10,1	7,0	134,43	80	450		
	Ø	14,4 (90,3)	3,1	2,6	42,68				
pH-Wert	min			6,2	6,1				
	Max	n. b.	n. b.	7,7	7,8				
	Ø			7,0	6,9				

* Mineralisch ** Organisch n. b. = nicht bestimmt

Insgesamt liegen die IKT-Werte für den pH- Wert und den Trockensubstanzgehalt in den Bereichen, die nach Literaturangaben zu erwarten sind. Die niedrigen IKT-Werte beim Glühverlust lassen einen hohen Anteil mineralischer Ablagerungen vermuten. Das stimmt auch mit der visuellen Einschätzung der entnommenen Ablagerungen überein. Die niedrigen CSB-Werte und die Untersuchungen zur Korngrößenverteilung deuten ebenfalls darauf hin, dass die Ablagerungen über einen sehr hohen mineralischen Anteil verfügen.

Auch der maßgebende und mittlere Durchmesser der untersuchten Ablagerungen waren im Durchschnitt höher, als die aus der Literatur zitierten Werte. Damit bestätigt sich auch hier der sehr hohe Anteil an groben Körnern (vgl. Tabelle 14).

Tabelle 14: Gegenüberstellung der Durchmesser d_{50} und d_m

		d_{50} [mm]	d_m [mm]
Gelsenkirchen	\emptyset	0,9	1,5
	Min	0,2	0,27
	Max	1,6	2,9
Bochum	\emptyset	3,6	5,1
	Min	1,6	3,3
	Max	5	6,4
Hagen	\emptyset	3,5	4,9
	Min	2,4	4,6
	Max	4,5	5,3
München	\emptyset	3,7	6,0
	Min	1,5	1,7
	Max	5,8	8,9
MACKE (1983)	\emptyset		0,357
	Min	n. b.	0,15
	Max		0,6
SCHÜTZ (1983)	Min	0,5	n. b.
	Max	1,5	

n. b. = nicht benannt

Der maßgebende Korndurchmesser d_m , der das Gemisch tendenziell beschreibt und in viele Transportgleichungen eingeht, lag bis zu 17 mal höher als die bei Macke [51] ermittelten Werte. Auch der Durchmesser d_{50} lag bis zu 4,5 mal höher als von Schütz [52] angegeben wird (vgl. Tabelle 14).

Als Fazit kann festgestellt werden, dass die Anteile von organischem und mineralischem Material insbesondere in Mischwasserkanälen sehr unterschiedlich ausfallen und auch jahreszeitlichen Schwankungen unterliegen können. So wurden in vier Haltungen der Stadt München über das gesamte Jahr verteilt mehrfach Proben entnommen. In den Wintermonaten wurde ein erhöhter Eintrag von mineralischem Material, sehr wahrscheinlich Winterstreusplitt, festgestellt. Darüber

hinaus verändern sich einige Eigenschaften der Ablagerungen, wie bspw. die Kohäsion und Lagerungsdichte, mit zunehmendem Alter. Im Einzelfall kann dies evtl. zu einer starken Verfestigung führen. Bild 19 gibt einen Eindruck von einer verfestigten Ablagerung, bei der einzelne Sedimentationsschichten sichtbar sind.

3.2.4 Ablagerungsbildung und -menge

Zur Einschätzung der Ablagerungsbildung und -mengen sowie des Einflusses der Reinigungshäufigkeit wurden weitergehende Untersuchungen in den Kanalnetzen der Stadt München und der Gemeinde Holzwickede in Nordrhein-Westfalen durchgeführt.

Die **Stadtentwässerungswerke München** betreiben ca. 2300 km Kanalnetz. Aus diesen wurden 4 verschiedene Netzstränge (bestehend aus 5 Haltungen) mit ähnlichen Nennweiten, Querschnitten und Netzsituationen (Mischwasser-Hauptsammler) ausgewählt. Insgesamt wurde eine Gesamtlänge von ca. 1,6 km untersucht, um die zeitliche Entwicklung von Ablagerungen zu erfassen. Die begehbaren Kanalstränge wurden nach festgelegten Zeitintervallen mit Hilfe eines Spülschildes (Kanalhunt) vollständig gereinigt (Bild 28). Die geräumten Kanalablagerungen wurden im Schachtbereich zwischengelagert und von dort aus dem Kanal befördert. Die entnommenen Ablagerungsmengen pro Haltung konnten daraufhin gewogen werden.



Bild 28: Kanalreinigung mit dem Spülhant [53]

Insgesamt wurden innerhalb eines Untersuchungszeitraumes von einem Jahr (02/2002-02/2003) 5450 kg Kanalräumgut (siehe Bild 29) auf einer Länge von 1580 m entnommen. Dies entspricht einem Volumen von ca. 3,2 m³ (ermittelte Dichte = 1,7 t/m³). Das entnommene Räumgut, welches innerhalb eines Jahres anfiel, schwankte für den jeweiligen Netzstrang (bestehend aus 4 Haltungen) zwischen 366 kg und 2801 kg. Je Kanalmeter fielen zwischen 1,0 bis 6,1 kg nasser Sedimentmasse an. Durchschnittlich wurden 3,4 kg Ablagerungen pro Kanalmeter entnommen. Die hieraus abgeleiteten Werte zur Trockensubstanz wurden mit Literatur-Werten aus

[19] verglichen (Bild 30). Von der Größenordnung zeigte sich eine gute Übereinstimmung.



Bild 29: Entnommenes Kanalräumgut in München, Bildbeispiel

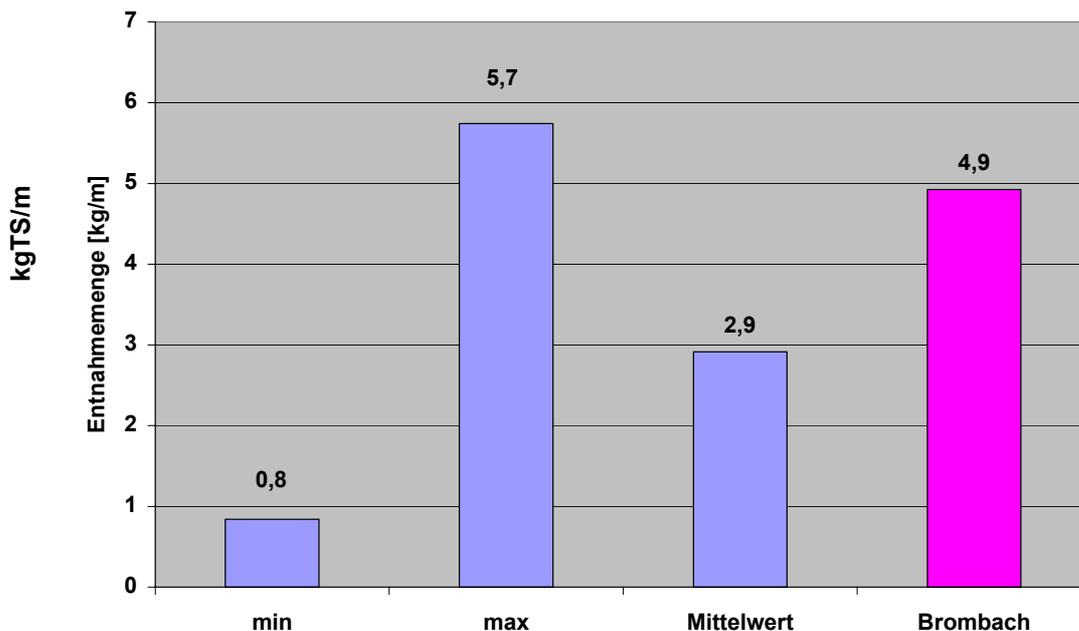


Bild 30: Vergleich der gemessenen Ablagerungsmengen mit den Werten nach Brombach [19]

Der Verschmutzungsgrad, ausgedrückt in Prozent der Querschnittshöhe (rechnerisch über die Haltungslänge gemittelt), lag bei allen Haltungen zwischen 0 und maximal 1,5 %, also deutlich unter den z.B. nach Selbstüberwachungs-verordnung Kanal in NRW maßgebenden Werten von 15 %. Dies bestätigt tendenziell auch die subjektive Einschätzung des Ablagerungsaufkommens durch das Betriebspersonal (Bild 31). Dazu wurde jede Haltung vor der Reinigung

begangen und hinsichtlich der Ablagerungen bewertet. In 75 % der Fälle wurden keine Ablagerungen angetroffen. In 18 % der Fälle wurde das Ablagerungsaufkommen subjektiv als hoch eingeschätzt. Dies steht scheinbar im Widerspruch zu den o.a. niedrigen Durchschnittswerten von maximal 1,5 % Ablagerungsgrad. Jedoch ist dies erklärbar durch das zu beobachtende dünenartige Aufkommen von Ablagerungen auf kurzen Kanalstrecken von wenigen Metern. In der subjektiven Bewertung wirkt eine Haltung aufgrund der punktuellen Anhäufungen sehr verschmutzt, auch wenn sie über die Haltungslänge einen deutlich geringeren Ablagerungsgrad aufweist. In keinem Fall wurde ein Rückstau- oder Verstopfungsrisiko beobachtet.

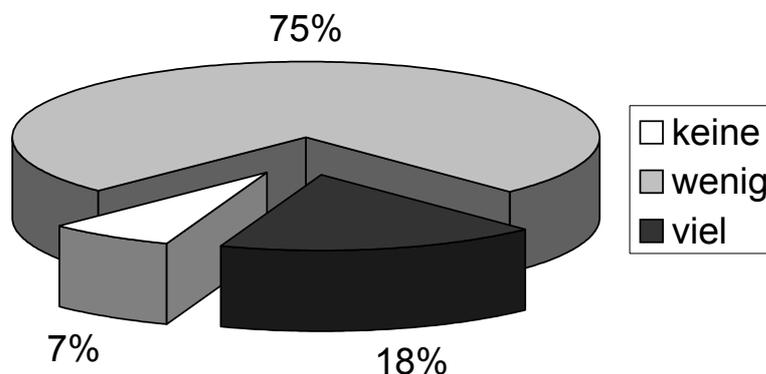


Bild 31: Ablagerungsmenge, Beispielstrecken München; subjektive Einschätzung des Betriebspersonals

Im Kanalnetz der **Gemeinde Holzwickede** (Gesamtlänge ca. 92 km) wurde die Entwicklung der Ablagerungssituation an 2.280 Haltungen (ca. 90 km) über 2 Jahre beobachtet. Ausgangspunkt war die Aufnahme der Ablagerungssituation im Schachtgerinne im Rahmen der nach ATV A 147, Teil 1 [10] geforderten 2-jährlichen Schachtinspektion. Darüber hinaus wurden auch die oberhalb und unterhalb angeschlossenen Haltungen eingesehen - zunächst mit Hilfe der klassischen Methode des Spiegelns (vgl. Bild 32) bzw. im zweiten Untersuchungsjahr auch durch eine speziell für diesen Einsatz entwickelte Schacht-Videokamera (vgl. Bild 33).

Der Spiegel wurde über eine Stange so ausgerichtet, dass der Lichtstrahl der Lampe die Haltung ca. 10 – 15 Meter ausleuchtete und somit über die Schachteinbindung hinaus ein Eindruck über den Verschmutzungs- und Ablagerungszustand erfasst werden konnte. Die Spiegelungen beschränkten sich auf Schachttiefen bis ca. 3,5 m.



Bild 32: Kanalspiegelung von der Straßenoberfläche aus



Bild 33: Ablagerungsbewertung durch Einsatz einer Zoom-Schachtkamera

In Holzwickede wurden die Ergebnisse der Schachtinspektion und Spiegelung optisch eingeschätzt und drei Verschmutzungsklassen zugeordnet: Verschmutzung gering, mittel und stark. Grundlage für diese Einschätzung waren sowohl die nach dem ministeriellen Runderlass [5] maßgebenden Ablagerungshöhen als auch das Fließ- und Strömungsverhalten des Abwassers sowie die Konsistenz und Oberflächenstruktur der Inhaltsstoffe. Insbesondere das Abwasser-Fließverhalten ist ein Anzeichen für die Auswirkung der Ablagerungssituation auf die betriebliche Leistungsfähigkeit des Kanals. Eine Bewertung ist in der Regel vergleichsweise leicht möglich, da das Fließverhalten sowohl in der Schachtsohle als auch in der Haltung gut zu erkennen ist. In Anlehnung an die SüwV Kan NRW [4] bzw. den Runderlass [5] wurde eine Ablagerungshöhe von 15 % der Profilhöhe als Schwelle für einen starken Verschmutzungsgrad gewählt. Die Abgrenzung zwischen geringer und mittlerer Verschmutzung lag hier bei ca. 10% der Profilhöhe (vgl. Tabelle 15).

Tabelle 15: Klassifizierung der Verschmutzungssituation, Bildbeispiele aus der Schachtbesichtigung

Verschmutzungsstufe		
Gering	Mittel	Stark
Höhe der Ablagerungen		
0% - 10%	10% - 15 %	> 15 %
Fließ-/Strömungsverhalten des Abwassers		
gleichmäßig/laminar	unruhig/Verwirbelungen	langsam/ stehend
Konsistenz der Ablagerungen		
feinkörnig/lose	sämig/breiig	steif/ fest/ tonig/ hart
Bildbeispiele		
		
Bild 34: Sichtungsergebnis: Strömung laminar	Bild 35: Sichtungsergebnis: Strömung unruhig	Bild 36: Sichtungsergebnis: Strömung stehend
		
Bild 37: Sichtungsergebnis: Konsistenz feinkörnig	Bild 38: Sichtungsergebnis: Konsistenz sämig/ lose	Bild 39: Sichtungsergebnis: Konsistenz: fest/ tonartig
		
Bild 40: Sichtungsergebnis: Ablagerungshöhe gering	Bild 41: Sichtungsergebnis: Ablagerungshöhe mittel	Bild 42: Sichtungsergebnis: Ablagerungshöhe: hoch

Insgesamt wurden in einem Zeitraum von zwei Jahren 2.280 Haltungen (dies entspricht einer Netzlänge von ca. 100 km) im Rahmen der Schachtinspektion und -spiegelung hinsichtlich des Ablagerungsaufkommens in Anlehnung an die Klassifizierung nach Tabelle 15 bewertet (vgl. Bild 43). Es zeigt sich deutlich, dass der überwiegende Teil (ca. 91%) des untersuchten Netzes als gering verschmutzt bewertet werden kann.

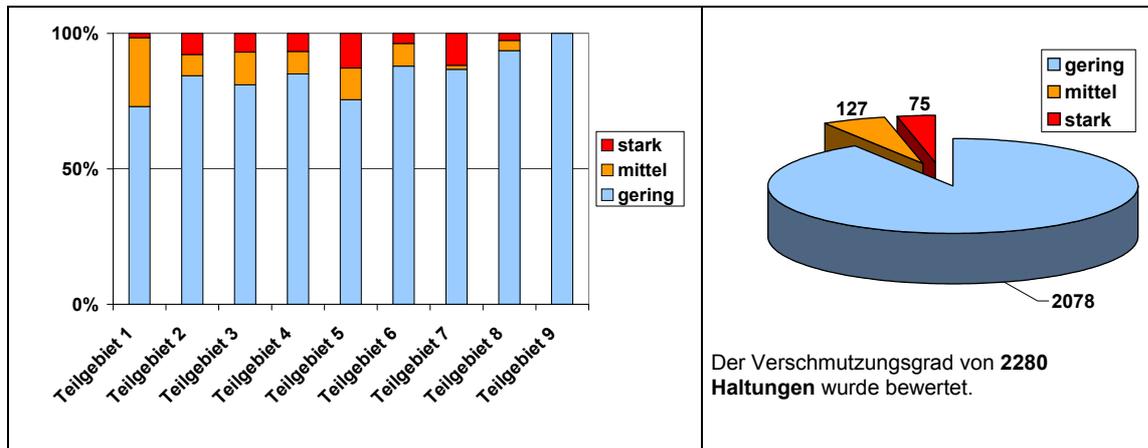


Bild 43: Verschmutzungsgrad der untersuchten Haltungen, nach Teilgebieten (links), Gesamtdarstellung (rechts)

Für 494 der ausgewerteten Haltungen konnte eine weitere Unterscheidung nach Entwässerungssystemen vorgenommen werden. Diese Haltungen waren in ihrer Verteilung auf Entwässerungssysteme grundsätzlich repräsentativ für das Kanalnetz der Gemeinde Holzwickede (56,4 % Mischwasser, 22,1 % Schmutzwasser, 21,5 % Regenwasser, vgl. Tabelle 16). Insgesamt 410 (83 %) der Haltungen wurden als gering, 53 (10,7%) als mittel und lediglich 31 (6,3 %) als stark verschmutzt eingestuft. Regenwasserkanäle waren in keinem Fall stark verschmutzt (vgl. Tabelle 16).

Tabelle 16: Verschmutzungsgrad bezogen auf die Kanalart, im Untersuchungsgebiet

Verschmutzungsgrad	Haltungsanzahl der Kanalart			Gesamt
	Mischwasser	Schmutzwasser	Regenwasser	
gering	228	102	80	= 410
mittel	20	21	12	= 53
stark	17	14	0	= 31
gesamt	265	137	92	= 494
in Prozent	53,64 %	27,73 %	18,62 %	= 100%

Zusammenfassend lässt sich feststellen, dass im betrachteten Untersuchungsgebiet zum Zeitpunkt der eigentlich turnusmäßig geplanten Kanalreinigung der überwiegende Teil der Haltungen als nur gering verschmutzt und somit ohne Reinigungsbedarf bewertet wurde (vgl. Bild 43). Die Literaturangabe [24], dass „im Allgemeinen Ablagerungen in Kanälen nicht als kontinuierliche Fläche, sondern als Dünen auftreten, die Längen zwischen 2 m und 5 m besitzen“, konnte im Rahmen der Untersuchungen bestätigt werden.

Vor dem Hintergrund, dass die Netzbetreiber in NRW im Jahre 2001 ca. 43 % ihres Kanalnetzes reinigten (vgl. [1]), stellt sich die Frage, ob sämtliche Optimierungspotenziale für eine bedarfsorientierte Reinigung flächendeckend genutzt wurden. Im vorliegenden Fall zeigte sich insbesondere, dass das Betriebswissen aus der Schachtspektion den Reinigungsaufwand deutlich senken kann. Große Ablagerungsmengen und hartnäckige Inkrustationen traten hier nur in Ausnahmefällen und fast immer aufgrund von Besonderheiten der örtlichen Netzsituation (z.B. durch seitlich steil angeschlossene Zuläufe, die den Abfluss im Hauptkanal einschränken) auf.

3.3 Fahrzeug- und Werkzeugeinsatz

Hochdruck-Reinigungsfahrzeuge werden für den jeweiligen Anwendungsfall in Abhängigkeit der Rangiermöglichkeiten, der benötigten Pumpenleistung und Schlauchlänge sowie der spezifischen Netzbedingungen (z.B. erwartete Räumgutmengen, Kanalnennweiten, Haltungslängen) ausgewählt. Besondere Möglichkeiten bietet die Wasserrückgewinnungstechnik, da hier als Spülmedium nicht nur Trinkwasser sondern auch Abwasser genutzt werden kann. Insbesondere in größeren Kanälen mit ausreichendem Kanalabfluss wird diese Technik eingesetzt. Aber auch bei geringen Kanalabflüssen oder wenn das Fahrzeug am Arbeitsort verbleiben muss (z.B. Einsatzort Schnellverkehrsstraße) ist ein Einsatz möglich, indem mit Hilfe einer Absperrblase Abwasser aufgestaut und als Spülwasser aufgenommen wird.

An Hochdruckreinigungsfahrzeugen können Pumpendruck und Motordrehzahl (U/min) i.d.R. über eine analoge Anzeige abgelesen werden. In den Druckleitungen auf dem Fahrzeug und dem HD-Schlauch treten allerdings Reibungsverluste auf. Die für die Reinigung tatsächlich nutzbare Strahlleistung kann damit nur über den Druck und den Durchfluss des Spülwassers *unmittelbar vor der Düse* ermittelt werden. Vor diesem Hintergrund wurden die Leistungsfähigkeit der HD-Pumpen und die geeignete Abstimmung von Düsen und Düseneinsätzen auf die Pumpenleistung und Schlaucheigenschaften bei üblichen Reinigungsfahrzeugen der Netzbetreiber und Dienstleister überprüft und die in der Praxis zu erwartenden Reinigungsparameter eingeschätzt.

Als Messtechnik wurden ein MID - magnetisch induktives Durchflussmessgerät und ein digitales Druckmanometer eingesetzt. Die Fahrzeugdaten wurden vor Ort

aufgenommen und die Messdaten in einem Messdiagramm in Abhängigkeit der Zeit dargestellt (vgl. Bild 44).



Eine Übersicht zu den an elf HD-Fahrzeugen gemessenen Reinigungsparametern Druck und Durchfluss an der Düse ist in Bild 45 dargestellt. Die dargestellten Kennwerte wurden bei hoher Motorleistung mit der Düse D1 (8x30°) (vgl. Tabelle 18) und unveränderten Düseneinsätzen gemessen. Der Druck an der Düse bewegte sich im Hochlastbereich der Pumpe in einem sehr breiten Spektrum zwischen 65 und 160 bar. Jedes zweite Fahrzeug erreichte dabei Pumpendrucke über 120 bar.

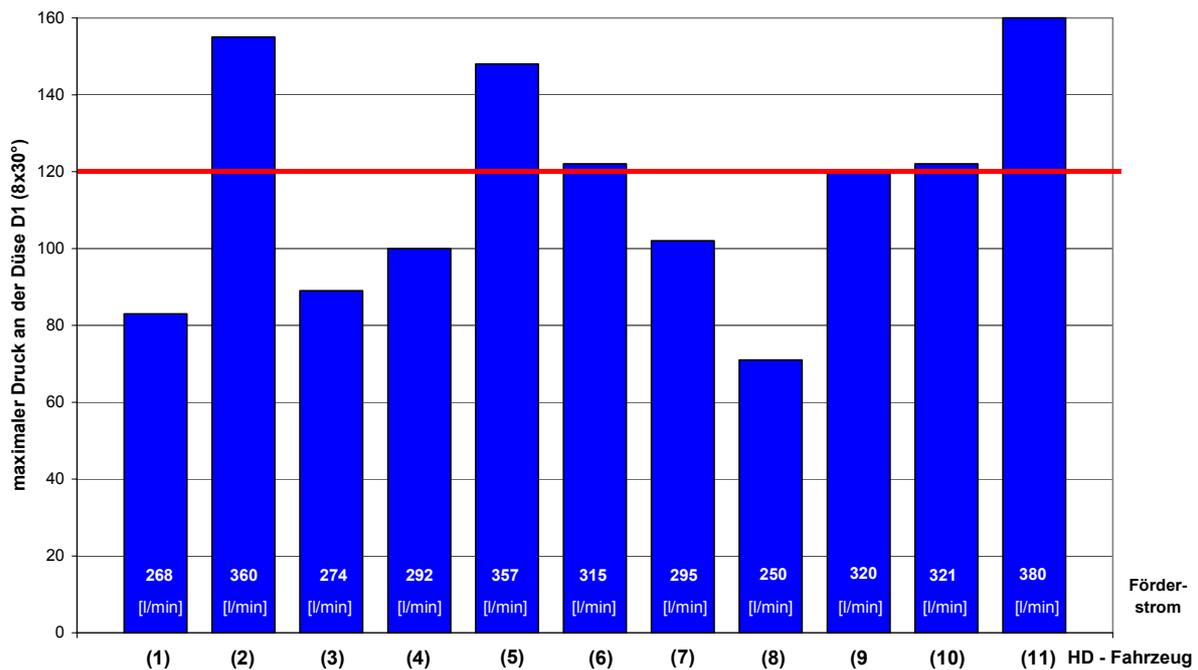


Bild 45: Druck an der Düse und Förderstrom unter hoher Motorleistung bei Einsatz der Düse D1 (8x30°) (vgl. Tabelle 18)

Die Schlauchlänge variierte von 120 bis 240 Metern. Kanalbetriebe, die Kunststoffschläuche verwenden, haben gute Erfahrungen damit gemacht, die ersten 10 – 20 Schlauchmeter als Gummischlauch auszuführen. Dies erleichtert die Handhabung im Arbeitseinsatz, da der Gummischlauch weniger steif ist und sich leichter führen lässt. Grundsätzlich werden Schlauchführungen genutzt, um den Schlauchwerkstoff im Knickbereich (im Schacht am Rohrscheitel des Zulaufrohres) zu schonen. Umlenkrollen halten den Düsenkörper tief auf der Rohrsohle, wenn dieser sich dem Entnahmeschacht nähert. Die Aerosolbildung ist dadurch reduziert. Nach Betreibererfahrungen erzeugen bananenförmige Umlenkstücke hohe Reibungskräfte zwischen Schlauch und Umlenkstück. Bewegliche Umlenkrollen sind vorzuziehen (vgl. Bild 46).



Bild 46: A) Schlauchbeschädigung. B) Umlenkrollen. C) Umlenkstück.

Um die Entnahme des Räumgutes und die Saugleistung zu verbessern, werden Saugunterstützungen verwendet. Auch Ejektoren können den Saugvorgang bei größeren Schachttiefen unterstützen. Bohrungen im oberen Bereich des Saugstutzens verbessern ebenfalls nach dem Ejektor-Prinzip die Saugleistung. Ejektoren können auch eingesetzt werden, um Spülwasser aus dem Vorfluter in das Fahrzeug zu saugen (vgl. Bild 47). Hierzu ist jedoch i.d.R. eine wasserrechtliche Genehmigung einzuholen.

Darüber hinaus ist insbesondere bei Fahrzeugen mit Wasseraufbereitungstechnik der Einsatz eines sogenannten Saugfalter vorteilhaft (vgl. Bild 48). Der Saugfalter verschließt einen großen Teil des Schachtgerinnes und verhindert das schnelle Abfließen von Verschmutzungen und Spülwasser. So kann mit Hilfe der Wasserrückgewinnungstechnik der Wasserverlust im Spülkreislauf verringert werden.



Bild 47: Ejektoren zum Ansaugen von Spülwasser aus einem Vorfluter



Bild 48: Saugfalter

Um ein Abdrehen des Düsenkörpers vom Schlauch auszuschließen, muss ein Drehgelenk zwischen Schlauch und Düse gesetzt werden. Um ein Umkehren der Düse im Kanal und deren unkontrolliertes Austreten aus dem Startschacht zu verhindern, kann darüber hinaus ein starres Rohrstück zwischen Düse und Spülschlauch montiert werden. Es hat die Nennweite des verwendeten Spülschlauchs und entspricht in der Länge mindestens dem Durchmesser des zu reinigenden Kanalabschnitts.

Der Einsatz von Verkleidungen zur Minderung von Geräuschemission bzw. zum Schutz vor Frosteinwirkungen sowie der Einbau weiteren schweren Geräts auf den Fahrzeugen (z.B. Schlauchkassetten) setzt voraus, dass auch bei Behältervöllfüllung weiterhin die zulässige Nutzlast eingehalten wird.

3.4 Reinigungsabläufe

3.4.1 Hintergrund

Um die Abläufe bei der HD-Reinigung in der Praxis zu erfassen und mögliche Problemschwerpunkte zu identifizieren, wurden Reinigungseinsätze des Betriebspersonals in den Städten Bochum, Geldern, Gelsenkirchen, Hagen, Holzwickede, München, Ratingen, Recklinghausen, Warendorf, Witten und Wuppertal begleitet.

Grundsätzlich wurden die eingesetzten Geräte, wie HD-Fahrzeug, HD-Pumpe, HD-Schlauch und weitere Reinigungswerkzeuge in Abhängigkeit der Bauwerks- und Netzbedingungen sowie der zu erwartenden Ablagerungssituation durch das Betriebspersonal ausgewählt und die HD-Reinigung stets in Abwasserfließrichtung durchgeführt. Der eigentliche Reinigungsablauf vor Ort am Arbeitsschacht gliederte sich dann in der Regel in die folgenden Arbeitsschritte:

- **Herablassen** der HD-Düse in den Schacht und **Einschwenken** in den Zulauf
- **Einspülen** von Schlauch und HD-Düse in die Haltung bis zum Zielschacht bei Regelung der Motorleistung (U/min) bzw. des Förderdruckes der Pumpe
- **Rückzug** von Schlauch und HD-Düse über eine steuerbare Motorhaspel
- **Absaugen** des Spülwassers mit den gelösten Ablagerungen in den Schlammbehälter eines Reinigungsfahrzeugs.

3.4.2 Herablassen und Einschwenken

Dem kontrollierten Herablassen und Einschwenken der Düse in den Kanal kommt eine besondere Bedeutung zu, da hier in den kritischen Einbindungsbereichen zwischen Schacht und Kanalrohr sowie an der Schachtsohle ein hohes Schädigungsrisiko besteht. Wird die HD-Düse zu schnell in den Schacht herabgelassen, kann der Düsenkörper auf das Schachtgerinne aufschlagen und den Werkstoff bis zur Schädigung beanspruchen. Die HD-Düse sollte daher stets kontrolliert über die Motorhaspel herabgelassen werden. Die Düse lässt sich dann in der Regel sicher durch Schlauchbewegungen in Richtung des Zulaufs ausrichten bzw. in die Haltung einschwenken. Letzteres empfiehlt sich insbesondere mit Blick auf das schon bei Reinigungsbeginn entstehende Spritzwasser und die damit verbundene mögliche Aerosolbelastung für das Betriebspersonal.

3.4.3 Einspülen

Das Einspülen des Düsenkörpers wird durch die Umlenkung der Wasserstromes im Düsenkörper und die daraus resultierende Vortriebskraft erzielt. Die Geschwindigkeit und die Reichweite, bis zu der eine HD-Düse eingespült werden kann, hängen damit wesentlich von dem Durchfluss, dem Winkel der Strahlumlenkung, dem Düsen- und Schlauchgewicht sowie dem Füllungsgrad der Leitung bzw. auch der Rauigkeit der Rohrsohle ab.

Insbesondere wenn die Reinigungsarbeit nach bearbeiteten Metern vergütet wird und keine besonderen Anforderungen an die Reinigungsqualität gestellt werden, wächst die Motivation, schnell auch längere Strecken in einem einzigen Arbeitsgang zu reinigen. Als Folge wird eine hohe Zugkraft bzw. Düsen-Einlassgeschwindigkeit angestrebt. In der Regel wird dann die Pumpenleistung vollständig ausgenutzt und auf extreme Reinigungsparameter (Druck und Durchfluss) zurückgegriffen.

Bei größeren Verschmutzungsmengen wird häufig abschnittsweise gereinigt. Wenn Reinigungsabschnitte zu lang gewählt wurden, verbleiben nach Praxiserfahrungen aus Kontrollinspektionen nicht selten große Ablagerungsmengen im Kanal. In diesem Fall werden durch den Reinigungsvorgang die Ablagerungen lediglich zu Dünen aufgeschoben. Jedoch sind erst Extremfälle für das Bedienpersonal erkennbar, wenn bspw. eine Kanalverstopfung oder auch ein Festsetzen von Schlauch und Düse in den Ablagerungen daraus resultieren.



Bild 49: Praxisbeispiel: Durch Hochdruckreinigung aufgebaute Verstopfung, bei der sich Schlauch und Düse in den Ablagerungen festsetzten.

Um die Einlassgeschwindigkeit über die Motorleistung zu steuern und der örtlichen Ablagerungssituation anzupassen, orientiert sich das Reinigungspersonal überwiegend an

- **Geräuschen**, wie Klappern oder Schlagen von Steinen oder verfestigten Ablagerungen gegen die Schlauchwandung bzw. entsprechende Auffälligkeiten im Absaugschacht,
- **optischen Eindrücken**, indem die Trübung des angespülten Wassers sowie die darin enthaltenen Feststoffe beobachtet und das Abwickelverhalten des Schlauches kontrolliert werden.

3.4.4 Rückziehen der Düse

Mit dem Rückziehen der Düse wird das Lösen der Ablagerungen von der Rohrwandung fortgesetzt und der Transport der gelösten Ablagerungen zum Zielschacht setzt ein. Während des Rückzugvorganges kontrolliert das Bedienpersonal die Druckanzeige am Manometer des Hochdruckspülfahrzeugs, die Schlauchaufwicklung, das abfließende Spülwasser und Räumgut, den Saugschlauch sowie die Situation im Verkehrsraum. Überwiegend wird mit einem Druck am Fahrzeug von 120 – 160 bar gearbeitet. In Extremsituationen, z.B. bei einer Verstopfung eines Düseneinsatzes oder einer Intensivreinigung zur Vorbereitung einer Sanierung, können auch Drücke von 180 bar auftreten bzw. angewendet werden. Näherungsweise können nach [38] die Reibungsverluste je Schlauchmeter zu 0,4 bar angenommen werden, d.h. bei ca. 120 m Schlauchlänge betragen die Reibungsverluste ca. 50 bar. Die Durchmesser der Einsätze der Düsen werden i.d.R. so gewählt, dass der maximale Förderstrom noch vor dem maximalen Betriebsdruck der Pumpe erreicht wird, d.h. bevor das Überdruckventil Wasser zurück in den Tank fördert. In der Regel sind Pumpensysteme mit Förderraten von 260, 320, 390 und in Sonderfällen auch bis über 600 l/min verfügbar. Die tatsächlich gewählten Reinigungsparameter resultieren zum einen aus den Erfahrungen des Betriebspersonals mit den erzielten Reinigungsergebnissen vor Ort, zum anderen aber auch aus den o.a. maschinentechnischen Gegebenheiten.

Die Praxiserfahrungen lassen vermuten, dass das Reinigungsergebnis wesentlich von der Rückzugsgeschwindigkeit der Düse abhängt. Wird zu schnell eingefahren, bleiben Ablagerungsreste in der Sohle zurück und ein weiterer Spülgang ist notwendig. Einige Betreiber fürchten bei höherer Geschwindigkeit des Düsenkörpers die Gefahr von Beschädigungen des Rohrkörpers und der Anschlussbereiche. Allerdings sind an den Fahrzeugen häufig nur grobe Geschwindigkeitsangaben (langsam/schnell, ohne Einheit) verfügbar, so dass die tatsächliche Rückzugsgeschwindigkeit kaum bekannt ist und deren Einstellung allein auf die Einschätzung des Reinigungspersonals zurückgeht.

Ist die gesamte Rohrwandung als Vorbereitung für eine TV-Inspektion oder eine Sanierungsmaßnahme zu reinigen, werden nach Angaben des Personals üblicherweise 2 bis 3 Reinigungszyklen mit einer vergleichsweise geringen Rückzugsgeschwindigkeit durchgeführt. Im ersten Reinigungszyklus wird dann

bereits ein Großteil der Ablagerungsmasse heraustransportiert und ab dem zweiten Reinigungszyklus die gesamte Rohrwandung durch Einsatz von HD-Düsen mit großem Abstrahlwinkel (z.B. 30°) oder auch Rotationsdüsen von Ablagerungen befreit. Im Ergebnis sinkt die Gefahr von Reklamationen und Stillstandszeiten bei der TV-Inspektion oder Sanierung.

3.5 Reinigungssituationen

Vor dem Hintergrund der Ergebnisse aus den Abschnitten 3.2 bis 3.4 bzw. der zahlreichen vor Ort begleiteten Reinigungseinsätze sowie der intensiven Gespräche mit den beteiligten Netzbetreibern lassen sich die für das Hochdruckspülverfahren in der Praxis beobachteten Reinigungssituationen in 9 Einzelsituationen gliedern (Tabelle 17). Diese lassen sich wiederum zusammenfassen in drei Grundsituationen:

- **Standardsituationen**, wie sie z.B. im Rahmen der betrieblichen Wartung als Unterhaltungsreinigung oder bei der Reinigung zur Vorbereitung einer Inspektion auftreten. Der Düsendruck beträgt weniger als 120 bar. Der Durchfluss ist angepasst an Kanalnenweite, Wasserstand im Rohr, Ablagerungsgrad und -menge. Die Düse bewegt sich in moderatem Tempo (Düsenrückzugsgeschwindigkeit ca. 5 - 30 m/min) mittig in der Sohle. Bei rundumstrahlenden Düsen beträgt der Strahlwinkel weniger als 30°.
- **Ausnahmesituationen**, wie sie z.B. bei einer Intensiv-Reinigung zur Lösung von hartnäckigen Inkrustationen oder zur Vorbereitung einer Sanierungsmaßnahme zu beobachten sind, aber auch bei übersteuerten HD-Strahlen durch verstopfte Düseneinsätze oder ungeeignete Abstimmung des Durchmessers der Düseneinsätze auf Pumpenleistung, Schlauchlänge und Düsentyp auftreten können. Die Ausnahmesituation ist gekennzeichnet durch extreme Strahleigenschaften, z.B. hinsichtlich Druck, Durchfluss und Strahlwinkel. Darüber hinaus kann es in Ausnahmesituationen, bspw. bei einer Kanalverstopfung, zum Stillstand der Düse und damit verbunden zu einer stationären Belastung des Rohrwerkstoffs kommen.
- **Anwendungsfehler**, die zwar derzeit in der betrieblichen Praxis auftreten, aber grundsätzlich zu übermäßigen Beanspruchungen der Rohrsubstanz führen und daher durch geeignete Personalunterweisung und entsprechenden Geräteeinsatz vermieden werden sollten. Hier sind bspw. extreme Einlass- und Rückzugsgeschwindigkeiten ($\gg 30$ m/min), insbesondere zur Verringerung des Zeitaufwandes für die Reinigung ohne Rücksicht auf den Kanalzustand und mögliche Belastungen der Bausubstanz durch den Düsenkörper, zu nennen. Dabei ist es auch möglich, dass eine Düse durch ein Hindernis kurzzeitig gebremst wird, während der Hochdruckschlauch weiterhin von der Haspel abläuft. Sobald die Düse das Hindernis überwunden hat, wird sie unkontrolliert beschleunigt, bis der Schlauch wieder gespannt ist. Bei

diesem sogenannten „Freilauf“ der Düse erhöht sich das Risiko für ein Abheben und Fallen der Düse auf die Rohrsohle. Ein besonderer Anwendungsfehler mit hohem Risiko für Rohrschäden ist dabei auch der „Düsen-Freilauf“ zum Durchstoßen einer Verstopfung. Darüber hinaus stellt das Aufprallen des Düsenkörpers, z.B. beim Herablassen der Düse in den Schacht und Einschwenken in die Haltung einen vermeidbaren Anwendungsfehler dar.

Tabelle 17: Praxiserfahrungen: Reinigungssituationen

REINIGUNGSSITUATION	
	Standardsituation
	Ausnahmesituation
	Anwendungsfehler
Unterhaltungsreinigung, im Rahmen der betrieblichen Wartung des Kanalnetzes oder zur Vorbereitung einer Inspektion.	
Häufiges Reinigen, z.B. von Haltungen mit hohem Ablagerungsaufkommen.	
Grobe, ggf. scharfkantige Inhaltsstoffe, z.B. Winterstreusplitt oder Schottermaterial aus Baumaßnahmen.	
Intensiv-Reinigung, z.B. bei Inkrustationen, Wurzeleinwuchs oder zur Vorbereitung von Sanierungsmaßnahmen, auch mit extremen Reinigungsparametern (Druck, Durchfluss, Strahl u.a.).	
Stillstand des Düsenkörpers, im Spülbetrieb, z.B. bei der Beseitigung von Verstopfungen oder Störung der Schlauchabwicklung.	
Übersteuerte Hochdruckstrahlen, z.B. durch verstopfte Düseneinsätze oder ungeeignete Abstimmung des Durchmessers der Düseneinsätze auf Pumpenleistung, Schlauchlänge und Düsentyp, auch mit extremen Strahleigenschaften, z.B. hinsichtlich Druck, Durchfluss und Strahlwinkel.	
Freilauf einer Düse, zum „Durchstoßen“ einer Verstopfung, ggf. auch unplanmäßiger Düsen-Freilauf bei Unachtsamkeit des Bedienpersonals.	
Extreme Einlass- und Rückzugsgeschwindigkeiten, >> 30 m/min, insbesondere zur Verringerung des Zeitaufwandes für die Reinigung ohne Rücksicht auf den Kanalzustand und mögliche Belastungen der Bausubstanz durch den Düsenkörper.	
Aufprallen des Düsenkörpers, z.B. beim Herablassen der Düse in den Schacht und Einschwenken in die Haltung.	

4 Düsenwirkung

4.1 Hintergrund und Vorgehensweise

Aufbauend auf den in Kapitel 3 dargestellten Praxiserfahrungen wurden Laborversuche mit der heute am Markt verfügbaren Kanalreinigungstechnik zur Hochdruckspülung durchgeführt. Im Vordergrund dieser praxisorientierten Untersuchungen stand die Identifizierung und Beobachtung der wesentlichen Einflussfaktoren (vgl. Bild 50) für die Reinigungswirkung von Hochdruckdüsen und deren Wechselwirkungen mit der Kanalrohr-Beanspruchung. Im Vordergrund der Untersuchungen standen dabei rundumstrahlende und flachstrahlende Düsen, da diese in der Betriebspraxis, in den Standardsituationen der Unterhaltungsreinigung (vgl. Tabelle 17), am häufigsten eingesetzt werden.

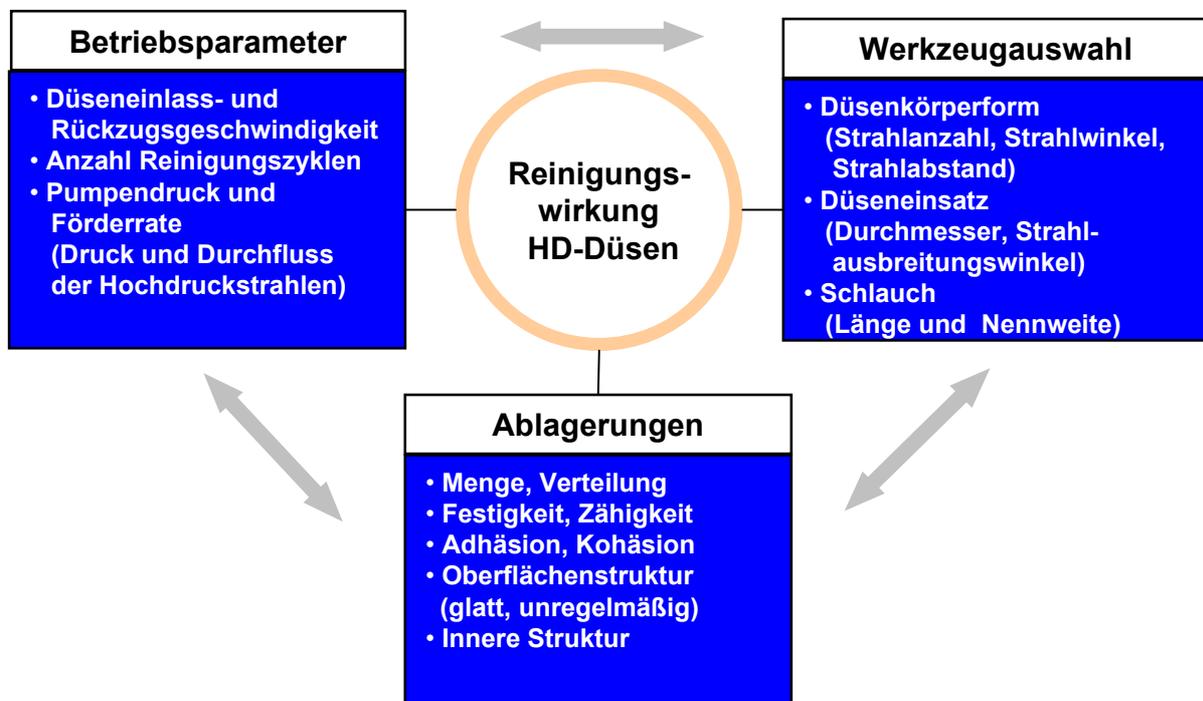


Bild 50: Einflüsse auf die Reinigungswirkung von HD-Düsen

Das Untersuchungsprogramm zur Ermittlung der Düsenwirkung setzte drei wesentliche Schwerpunkte:

- Die **Düsenbewegungen** wurden während des Reinigungsprozesses insbesondere in Extremsituationen bei starker Beschleunigung betrachtet.
- Die **Transport- bzw. Räumleistung** der Düsen wurde in Versuchen mit unterschiedlichen Druck- und Durchflussszenarien untersucht. Insbesondere dem Förderstrom der HD-Pumpe und der Düsen-Rückzugsgeschwindigkeit kamen dabei eine besondere Bedeutung zu. Voraussetzung für eine vergleichende

Betrachtung war die Herstellung von reproduzierbaren Ablagerungssituationen in den oberirdischen Versuchsstrecken.

- Die Aggressivität der Hochdruckstrahlen und ihr Einfluss auf das **Lösen von Ablagerungen** von der Rohrwandung wurden abgeschätzt und Ansatzpunkte für eine vergleichende Betrachtung der Düsenwirkung erarbeitet.

4.2 Auswahl der HD-Düsen

Durch eine Recherche bei den Herstellern und Anbietern von Düsen wurde das aktuelle Düsenangebot erfasst und als **IKT-Marktübersicht „HD-Düsen“** auf der Internetseite www.ikt.de [54] veröffentlicht. Die verschiedenen Düsenprodukte wurden Anwendungs- bzw. Wirkungsbereichen (vgl. Bild 51) zugeordnet und im Gesamtüberblick dargestellt.

HD-REINIGUNGSWERKZEUGE					
					
rundumstrahlende Düse	rotierendstrahlende Düse	flachstrahlende Düse (Sohlenreiniger)	Ejektor-düse	vorstrahlende (Stoher-) Düse	Kettenschleuder/ Kanalfräse

Bild 51: HD-Reinigungs-Werkzeuge

Über das Startmenü der Marktübersicht können Informationen zu den dargestellten Düsenkategorien ausgewählt werden. Bei der Auswahl einer Kategorie erscheint ein Übersichts-Datenblatt mit sämtlichen Produkten der in der Marktübersicht erfassten Hersteller und Anbieter. Auf dem nachfolgenden Datenblatt sind die technischen Parameter (Gewicht, Maße, Abstrahlwinkel etc.) und Kontaktinformationen des Herstellers angegeben (vgl. Bild 52 und Bild 53).

IKT - Marktübersicht „HD-Düsen“

www.ikt.de



Recherche-Beispiel

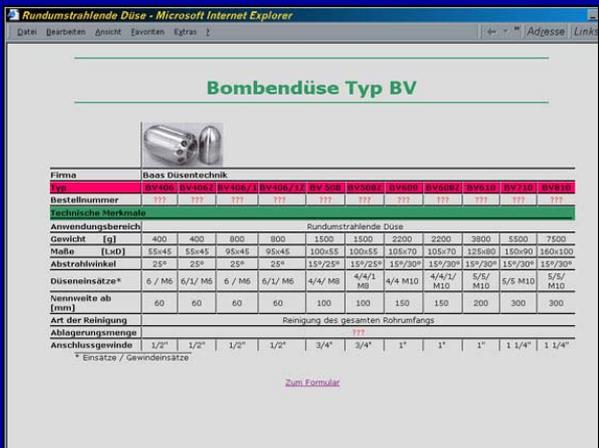


Bild 52: Darstellung einer Düsenkategorie

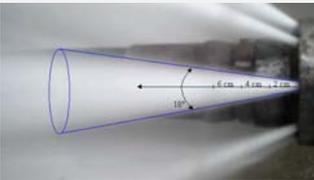
Bild 53: Detailbeschreibung einer Düse

Auf Basis der IKT-Marktübersicht „HD-Düsen“ wurden 20 Düsen für das Untersuchungsprogramm ausgewählt (vgl. Tabelle 18). Die Zuordnung der einzelnen Düsentypen zu den verschiedenen Arbeitsschritten des Prüfprogramms, vgl. Abschnitte 4.3 bis 5.4, ist in Tabelle 19 dargestellt.

Tabelle 18: Übersicht zu den untersuchten HD-Düsen

Nr.	Typ	Bezeichnung	Technische Kennwerte
D1	 rundumstrahlende Düse	D1 (8x30°)	8 Einsätze, Winkel 30°
D2	 rundumstrahlende Düse	D2 (5x20°, 5x30°)	10 Einsätze, Winkel 20° u. 30°
D3	 rundumstrahlende Düse	D3 (4x3°, 4x7°, 4x15°, 4x25°)	16 Einsätze, Winkel 3°, 7°, 15° und 25°
D4	 rundumstrahlende Düse	D4 (5x10°, 5x20°)	10 Einsätze, Winkel 10° u. 20°
D5	 rundumstrahlende (Vorstrahl-)Düse	D5 (4x15°, 8x20°)	12 Einsätze, Winkel 15° und 20°
D6	 rundumstrahlende Düse	D6 (4x6°, 4x12°)	8 Einsätze, Winkel 6° u. 12°
D7	 rundumstrahlende Düse	D7 (5x15°, 5x30°)	10 Einsätze, Winkel 15° u. 30°
D8	 flachstrahlendeDüse	D8 (8x4°)	8 Einsätze, Winkel 4°
D9	 flachstrahlendeDüse	D9 (6x10,5°)	6 Einsätze, Winkel 10,5°
D10	 rundumstrahlende Düse	D10 (5x3°, 5x7°, 5x15°, 5x25°)	20 Einsätze, Winkel: 3°, 7°, 15° und 25°
D11	 rundumstrahlende Düse	D11 (6x10°)	6 Einsätze. Winkel 10°
D12	 rundumstrahlende Düse	D12 (4x15°, 4x30°)	8 Einsätze, Winkel 15° und 30°
D13	 rotierendstrahlende Düse	D13 (4x40°, 3x70°)	7 Einsätze, Winkel 40° u. 70°
D14	 flachstrahlendeDüse	D14 (11x8°)	11 Einsätze, Winkel 8°
D15	 flachstrahlendeDüse	D15 (2x0°, 2x5°, 2x25°)	6 Einsätze, Winkel 0°, 5°, 25°
D16	 flachstrahlendeDüse	D16 (2x4°, 2x30°, 2x45°)	6 Einsätze, Winkel 4°, 30°, 45°
D17	 rotierendstrahlende Düse	D17 (6x20°, 5x20°, 1xVorstrahl)	12 Einsätze, einschließlich Vorstrahl, Winkel 20°
D18	 rundumstrahlende Düse	D18 (6x22°, 6x32°)	12 Einsätze, Winkel 22° u. 32°
D19	 rundumstrahlende Düse	D19 (8x20°)	8 Einsätze, Winkel 20°
D20	 1-strahlige Düse, gefertigt für Werkstoffuntersuchungen (vgl. Abschnitt 5.3.2, [42])	D20 (1x30°)	1 Bohrung, Winkel 30°

Tabelle 19: Zuordnung der untersuchten HD-Düsen zum Prüfprogramm

HD-DÜSEN	Typ	Kurzbezeichnung	Technische Kennwerte	
Abschnitt 4.4.2 und 4.4.3: Räumversuche  Prüfstrecke DN 300		rundumstrahlende Düse	D1 (8x30°)	8 Einsätze, Winkel 30°
		rundumstrahlende Düse	D2 (5x20°, 5x30°)	10 Einsätze, Winkel 20° u. 30°
		rundumstrahlende Düse	D3 (4x3°, 4x7°, 4x15°, 4x25°)	16 Einsätze, Winkel 3°, 7°, 15° und 25°
		rundumstrahlende Düse	D4 (5x10°, 5x20°)	10 Einsätze, Winkel 10° u. 20°
		vorstrahlende Düse	D5 (4x15°, 8x20°)	12 Einsätze, Winkel 15° u. 20°
		rundumstrahlende Düse	D6 (4x6°, 4x12°)	8 Einsätze, Winkel 6° u. 12°
 Prüfstrecke DN 800		rundumstrahlende Düse	D7 (5x15°, 5x30°)	10 Einsätze, Winkel 15° u. 30°
		flachstrahlende Düse	D8 (8x4°)	8 Einsätze, Winkel 4°
		flachstrahlende Düse	D9 (6x10,5°)	6 Einsätze, Winkel 10,5°
		rundumstrahlende Düse	D10 (5x3°, 5x7°, 5x15°, 5x25°)	20 Einsätze, Winkel 3°, 7°, 15° u. 25°
Abschnitt 4.3: Reinigungseinsätze im Kanalbetrieb  		rundumstrahlende Düse	D11 (6x10°)	6 Einsätze, Winkel 10°
		rundumstrahlende Düse	D12 (4x15°, 4x30°)	8 Einsätze, Winkel 15° u. 30°
		rotierendstrahlende Düse	D13 (4x40°, 3x70°)	7 Einsätze, Winkel 40° u. 70°
		rundumstrahlende Düse	D1 (8x30°)	8 Einsätze, Winkel: 30°
		rundumstrahlende Düse	D2 (5x20°, 5x30°)	10 Einsätze, Winkel 20° u. 30°
		rundumstrahlende Düse	D3 (4x3°, 4x7°, 4x15°, 4x25°)	16 Einsätze, Winkel 3°, 7°, 15° und 25°
		rundumstrahlende Düse	D4 (5x10°, 5x20°)	10 Einsätze, Winkel 10° u. 20°
		rundumstrahlende Düse	D7 (5x15°, 5x30°)	10 Einsätze, Winkel 15° u. 30°
		rundumstrahlende Düse	D9 (6x10,5°)	6 Einsätze, Winkel 10,5°
		rundumstrahlende Düse	D10 (5x3°, 5x7°, 5x15°, 5x25°)	20 Einsätze, Winkel 3°, 7°, 15° und 25°
		flachstrahlende Düse	D14 (11x8°)	11 Einsätze Winkel 8°
		flachstrahlende Düse	D15 (2x0°, 2x5°, 2x25°)	6 Einsätze Winkel 0°, 5° u. 25°
		flachstrahlende Düse	D16 (2x4°, 2x30°, 2x45°)	6 Einsätze Winkel 4°, 30° u. 45°
		rotierendstrahlende Düse	D17 (6x20°, 5x20°, 1xVorstrahl)	12 Einsätze, einschließlich Vorstrahl, Winkel 20°
Abschnitt 4.5: Lösen 		rundumstrahlende Düse	D18 (6x22°, 6x32°)	12 Einsätze, Winkel 22° u. 32°
		rundumstrahlende Düse	D1 (8x30°)	8 Einsätze, Winkel: 30°
		rundumstrahlende Düse	D2 (5x20°, 5x30°)	10 Einsätze, Winkel 20° u. 30°
		rundumstrahlende Düse	D11 (6x10°)	6 Einsätze, Winkel 10°
Abschnitt 5: Belastungen aus HD-Düsenanwendung 		rundumstrahlende Düse	D19 (8x20°)	8 Einsätze, Winkel 20°
		Einstrahl-Düse	D20 (1x30°)	1 Bohrung, Winkel 30°
		rundumstrahlende Düse	D1 (8x30°)	8 Einsätze, Winkel 30°
		rundumstrahlende Düse	D2 (5x20°, 5x30°)	10 Einsätze, Winkel 20° u. 30°
		rundumstrahlende Düse	D4 (5x10°, 5x20°)	10 Einsätze, Winkel 10° u. 20°

4.3 Betriebsprozesse und Düsenbewegungen

Im ersten Schritt des Versuchsprogramms wurde die Anwendung der Düsensysteme im Betriebsprozess, d.h. bei Reinigungseinsätzen im Kanalnetz bzw. Zusatzuntersuchungen in der Versuchsstrecke, beobachtet. Insgesamt wurde das Verhalten von 13 unterschiedlichen Düsensystemen (vgl. Tabelle 19) bei Reinigungseinsätzen in 7 Kanalnetzen in Kanälen der Nennweiten DN 250, DN 300, DN 400, DN 500, DN 600, DN 700, DN 800 und DN 1000 betrachtet. Im Vorfeld dieser In-situ-Untersuchungen wurden die Reinigungsparameter Düsendruck und -durchfluss bestimmt (vgl. Abschnitt 2.3.2). Anschließend wurden die „realen“ Reinigungseinsätze im Kanalnetz mit einer TV-Inspektionskamera begleitet (vgl. Bild 54). So konnte das Verhalten der verschiedenen Düsen in Praxissituationen beobachtet werden.



Bild 54: Betrachtung der Strahleigenschaften von HD-Düsen vor Ort im Kanalnetz

Zur Auswahl der Reinigungsorte wurden bei den Kanalbetrieben aus der Betriebspraxis bekannte Kanalstrecken mit hohem Ablagerungsaufkommen angefragt. Vor Ort wurden jedoch verhältnismäßig wenig Ablagerungen angetroffen, darüber hinaus waren diese dünenartig über lediglich 3 – 6 Meter verteilt, so dass die Räumleistung verschiedener Düsen im Kanalnetz nicht vergleichend betrachtet werden konnte. Aus den Düsenbeobachtungen im Kanalnetz konnten jedoch wertvolle Hinweise zur Düsenbewegung und Lösewirkung von HD-Strahlen (vgl. Abschnitt 4.5) gewonnen werden.

Nach Auskunft des Betriebspersonals kann die Rückzugsgeschwindigkeit der Düse das Reinigungsergebnis erheblich beeinflussen. Auch gibt es an einigen Fahrzeugen nur undefinierte Geschwindigkeitseinstellungen von „langsam“ bis „schnell“. Daher wird die Rückzugsgeschwindigkeit in der Praxis im Wesentlichen aufgrund von Erfahrungswerten des Reinigungspersonals eingestellt. Dieses orientiert sich überwiegend an hörbaren Effekten, z.B. Geräuschen wie Klappern oder Schlagen

von Steinen oder verfestigten Ablagerungen gegen die Rohrwandung, sowie am visuellen Eindruck, z.B. anhand der Trübung des angespülten Wassers und der darin enthaltenen Feststoffe.

Ist nach diesen Anzeichen ein hohes Ablagerungsaufkommen zu erwarten, wird nach Angaben des Betriebspersonals eine langsame Einlassgeschwindigkeit gewählt, um das Material bereits in dieser Phase zu lösen und die Transporteigenschaften zu verbessern. Bei extremen Ablagerungsmengen kann es sogar notwendig sein, den Kanal in kürzeren Abschnitten zu reinigen. Im Rahmen der IKT-Recherche [6] aus dem Jahr 2000 schätzten 95 % der befragten Netzbetreiber die durchschnittliche Düsenrückzugsgeschwindigkeit mit kleiner als 0,1 m/sec bzw. 6 m/min ein. Zeitmessungen im Rahmen der in den Kanalbetrieben begleiteten Reinigungseinsätze ergaben Düsenrückzugsgeschwindigkeiten zwischen ca. 3 und 30 m/min.

Gibt es keine Anzeichen für ein hohes Ablagerungsaufkommen, so wird die Düse nach Auskunft des Betriebspersonals üblicherweise mit einer hohen Einlassgeschwindigkeit zum Zielschacht vorgetrieben. Die Wahl der Einlass- und Rückzugsgeschwindigkeit ist dabei jedoch nicht nur unter dem Aspekt der Reinigungsleistung sondern auch vor dem Hintergrund des Risikos von Rohrschäden zu betrachten. Grundsätzlich kann an dieser Stelle allerdings konstatiert werden, dass im Rahmen der gesamten Untersuchung vor Ort ein plötzliches „Schlagen“ von Düsen auf die Rohrwandung durch Schlauchverdrehungen oder Druckschwankungen im Schlauch nicht beobachtet werden konnte. Prinzipiell ist dies auch nicht zu erwarten, da bei einer Reinigungsdüse die HD-Strahlen entgegen der Fließrichtung umgelenkt werden. Dies führt - anders als bspw. bei einem Gartenschlauch - zu einer gerichteten Zugkraft an dem HD-Schlauch und einer stabilen Düsenposition. Darüber hinaus können durch ein Drehgelenk zwischen Düse und Schlauchende auch Zwängungen zwischen Schlauch und Düse aufgrund evtl. Schlauchverdrehungen vermieden werden.

Allerdings wurden sowohl im Kanalnetz als auch später in den Versuchsstrecken andere auffällige Düsenbewegungen beobachtet. In einzelnen Fällen blieben dabei die Düsen nicht in der Mitte der Rohrsohle positioniert, sondern schwebten im Rohr oder bewegten sich aus der Mitte der Sohle heraus, an der Rohrwandung entlang, bis auf Höhe des Kämpfers (vgl. Bild 55). Es ist daher denkbar, dass der Rohrwerkstoff durch das Zurückfallen schwebender Düsen auf die Rohrsohle beansprucht werden kann.

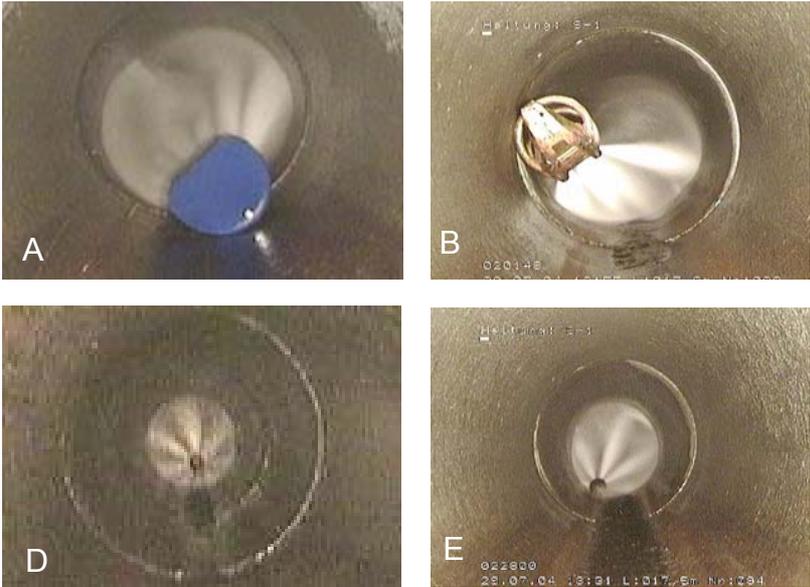


Bild 55: Schwebende Düsen, Bild-Beispiele aus Labor-Versuchen und In-situ-Beobachtungen

Vor diesem Hintergrund wurden die Düsenbewegungen verschiedener Düsensysteme in Standard- und Extremsituationen auch weitergehend im Kanalnetz beobachtet (vgl. Tabelle 20). Die Versuche wurden mit einem HD-Spülfahrzeug (Jet Master F 120 V, Firma Müller Umwelttechnik GmbH und Co.) durchgeführt. Auf dem Fahrzeug waren zwei HD-Pumpen der Bauart KD 716/55 installiert. Die Schlauchnennweite betrug 1¼ Zoll bei einer Schlauchlänge von 120 Metern. Zur Erfassung und Dokumentation der Düsenbewegungen wurde ein TV-Inspektionsfahrzeug eingesetzt. Zunächst wurde das Verhalten der Düsen bei einer gleichmäßigen Einlass- und Rückzugsgeschwindigkeit von ca. 20 m/min durch die „mitfahrende“ TV-Inspektionskamera dokumentiert. Anschließend wurden die Düsenbewegungen in der Situation des Düsen-Freilaufs (extreme Beschleunigung der Düse, vgl. Abschnitt 3.5) beobachtet. Die Erfahrungen aus den begleiteten Reinigungseinsätzen im Kanalnetz und den IKT-Versuchen in Prüfstrecken konnten durch diese ergänzenden Versuche bestätigt werden. So wurden hier ebenfalls schwebende Düsen beobachtet. Bei plötzlicher Zurücknahme der Motorleistung fielen die Düsen zurück auf die Rohrsohle.

Darüber hinaus wurden instabil schwebende Düsen in der Situation des Düsen-Freilaufs stark beschleunigt. Dies führte zu unkontrollierten Düsenbewegungen, so dass dabei auch ein Prallen gegen die Rohrwandung auftrat. Darüber hinaus wurde das Kippen von Sohlenreinigern beobachtet. Aus dieser Position können sich Sohlenreiniger in der Haltung nicht wieder in die richtige Position zurückstellen. Gekippte Sohlenreiniger verfügen über nahezu keine Reinigungswirkung mehr. Für den Operator am Reinigungsfahrzeug war der gekippte Zustand des Sohlenreinigers nicht feststellbar. In einem Fall verhakte sich ein umgekippter Sohlenreiniger beim Zurückziehen an einem Muffenversatz. Durch den begleitenden Kameraeinsatz wurde dies sofort bemerkt. Durch wiederholtes Vor- und Zurückfahren konnte das Hindernis überwunden werden.

Tabelle 20: Beobachtungen zu Düsenbewegungen in Testsituationen bei gleichmäßigem Düsentempo und bei extremer Beschleunigung

	Düsentyp (vgl. auch Tabelle 19)	Düseneinlass/Düsenrückzug (gleichmäßig mit ca. 30 m/min)	Düsen-Freilauf und übersteuerte HD-Strahlen, (extreme Beschleunigung)
Sohlenreineriger	D14 (11x8°) 11 Düseneinsätze Winkel 8°	keine Auffälligkeiten	Die Düse verdrehte sich und blieb auf der Oberseite liegen (vgl. Bild 56 A). Beim Rückzug verhakte sie sich dann an einem Rohrversatz.
	D15 (2x0°, 2x5°, 2x25°) 6 Düseneinsätze Winkel 4°, 30°, 45°	Die Düse löste sich schon beim Einfahren von der Rohrsohle und bewegte sich an der Rohrwandung entlang bis auf Kämpferhöhe. Nach dem Abschalten der Pumpe fiel die Düse auf die Rohrsohle (vgl. Bild 56 B).	Die Düse bewegte sich unkontrolliert durch den Kanal und prallte gegen die Rohrwandung. Am Ende des Düsen-Freilaufs schwebte die Düse im Rohrscheitel (vgl. Bild 56 C).
	D16 (2x4°, 2x30°, 2x45°) 6 Düseneinsätze Winkel 4°, 30°, 45	keine Auffälligkeiten	keine Auffälligkeiten
rundumstrahlende Düse	D1 (8x30°) 8 Düseneinsätze Winkel 30°	Die Düse positionierte sich bei dem Einlass- und Rückzugsvorgang nicht mittig in der Sohle.	Die Düse löste sich kurzzeitig ca. 10 cm von der Rohrsohle und senkte sich nach der Extrem-Beschleunigung auf die Sohle zurück (vgl. Bild 56 D).
	D19 (8x20°) 8 Düseneinsätze Winkel 20°	keine Auffälligkeiten	keine Auffälligkeiten
	D13 (4x40°, 3x70°) 7 Düseneinsätze Winkel 40°, 70°	keine Auffälligkeiten	keine Auffälligkeiten
			<p>Bild 56: Bildbeispiele zu beobachteten Düsenbewegungen</p> <p>A) umgekippte flachstrahlende Düse D14 (11x8°)</p> <p>B) an der Rohrwandung aufgestiegene Düse D15 (2x0°, 2x5°, 2x25°)</p> <p>C) im Rohrscheitel schwebende Düse D15 (2x0°, 2x5°, 2x25°)</p> <p>D) schwebende Düse D1 (8x30°)</p> <p>E) außermittige Düse D19 (8x20°)</p>

Bereits die o.a. Beobachtungen lassen einige grundsätzliche Schlussfolgerungen zum **Bewegungsverhalten der Düsen** zu:

- Unter üblichen Betriebsbedingungen wiesen nahezu alle Düsensysteme ein **gleichmäßiges Bewegungsverhalten** auf. Nur bei extremen Betriebsparametern bzw. übersteuerten HD-Strahlen zeigten einzelne Düsen Auffälligkeiten bis hin zum Schweben des Düsenkörpers im Rohrscheitel. In keinem Fall wurde ein unkontrolliertes Schlagen der Düse gegen die Rohrwandung beobachtet. Durch den rückwärts gewandten Düsenstrahl wird der Düsenkörper - auch im Schwebezustand - stabilisiert.
- Insbesondere an **Muffenversätzen** können sich Düsen beim Rückzug **verhaken**. Bei hohen Düsengeschwindigkeiten ist in diesem Zusammenhang eine besondere mechanische Belastung des Rohrwerkstoffs nicht auszuschließen.
- Beim Einsatz von **Sohlenreinigern** besteht, insbesondere bei unausgewogenen Strahlbildern und Hindernissen, die **Gefahr des Kippens** des Düsenkörpers mit nahezu vollständigem Verlust der Reinigungswirkung.
- Ein **Freilauf der Düse**, z.B. zur Beseitigung von Verstopfungen, ist grundsätzlich als Anwendungsfehler zu bewerten und im Betrieb auszuschließen. Ansonsten besteht die Gefahr, dass der Düsenkörper durch den HD-Strahl getrieben mit hoher Geschwindigkeit auf die Rohrwandung und Anschlüsse prallt und dabei enorme Kanalschäden verursacht (vgl. [55], „Crash-Tests“).

Um frühzeitig zu erkennen, ob Düsen in der Praxis zu auffälligen Bewegungen neigen, empfiehlt es sich, das Laufverhalten der Düsen bereits vor dem Kauf zu testen, z.B. durch Probeeinsätze unter Praxisbedingungen und Kamerabeobachtung im jeweiligen Kanalnetz.

4.4 Transportleistung

Bisher gibt es kaum gesicherte Kenntnisse darüber, welche Düsen zum Transport großer Ablagerungsmengen geeignet sind (vgl. [6]). Im Nennweitenbereich von DN 500 bis DN 1200 werden z.B. in der Praxis sowohl rundumstrahlende Düsen als auch Sohlenreiniger eingesetzt. Darüber hinaus hängt auch die Auswahl wichtiger Reinigungsparameter, wie Pumpendruck, Förderrate sowie Einlass- und Rückzugsgeschwindigkeit der Düse, in der Regel allein von den Erfahrungen und subjektiven Einschätzungen der Verantwortlichen vor Ort ab. Vor diesem Hintergrund wurde das Reinigungs- und Transportvermögen verschiedener Düsensysteme in eigens dafür aufgebauten oberirdischen Versuchsstrecken untersucht.

4.4.1 Untersuchungsprogramm

4.4.1.1 Versuchskonzept

Der Transport von Feststoffen durch den Einsatz von HD-Düsen hängt von zahlreichen Einflussfaktoren ab. Im Überblick sind dies:

- **Netzbedingungen**
(z.B. Haltungslänge, Querschnitt, Nennweite, Gefälle, Versätze, seitliche Zuläufe)
- **Ablagerungen**
(z.B. Art, Zusammensetzung, Grad, Aufkommen)
- **Düsenauswahl**
(z.B. Düsentyp, Düseneinsätze, Strahlwinkel)
- **Reinigungsparameter**
(z.B. Düsendruck, Förderstrom, Düseneinlass- und Rückzugsgeschwindigkeit)

Um unterschiedliche **Netzbedingungen** in den Versuchen betrachten zu können, wurden oberirdisch zwei Versuchsstrecken mit deutlich unterschiedlichen Nennweiten, DN 300 und DN 800, eingerichtet (vgl. Bild 57).



Bild 57: IKT-Prüfstrecken DN 300 (Plexiglas) und DN 800 (PVC)

Mit der Nennweite DN 300 wurde ein in Nebensträngen weitverbreiteter Kanalquerschnitt ausgewählt (vgl. [26], [28]), der auch Grundlage für Düsentests nach [42] ist. Um auch die Transportvorgänge des Materials während des Reinigungsprozesses beobachten zu können, wurde diese Versuchsstrecke in Plexiglas ausgeführt. Die Nennweite DN 800 stellt die Obergrenze des nichtbegehbaren Bereichs dar, so dass hier bereits besondere hydraulische Bedingungen, ähnlich größerer Kanäle, vorherrschen, während nur ferngesteuerte Techniken zum Einsatz kommen dürfen.

Um den Einfluss von Netzbedingungen, Ablagerungsgraden, Düsenauswahl und Reinigungsparametern auf die Transportleistung von Feststoffen vergleichend betrachten zu können, war die Herstellung von reproduzierbaren **Ablagerungssituationen** notwendig. In einem ersten Schritt wurden daher Untersuchungen zur Herstellung von Modellsedimenten durchgeführt, um die Ablagerungssituationen reproduzierbar, hygienisch unbedenklich, aber auch praxisnah herstellen zu können. Aufgrund der Betriebserfahrungen der beteiligten Netzbetreiber und der Untersuchungsergebnisse zur Häufigkeit und Konsistenz von Kanalablagerungen (vgl. 3.2.4) sind zwei wesentliche Ablagerungssituationen zu unterscheiden:

- Regelfall: lockere bis leicht verfestigte Ablagerungen, *leicht lösbar*.
- Ausnahme: Verfestigungen und hartnäckige Inkrustationen, *schwer lösbar*.

Die Reinigungsversuche im Kanalnetz und langjährige Betriebserfahrungen von Netzbetreibern belegen, dass sich auch leicht verfestigte Ablagerungen durch HD-Reinigung i.d.R. einfach lösen lassen. Die Reinigungsleistung zur Beseitigung von Ablagerungen dieser Kategorie wird vornehmlich durch die Menge der zu transportierenden Ablagerungen beeinflusst. Bei der Erstellung von Modellsedimenten zur Nachbildung lockerer bis leicht verfestigter Ablagerungen wurde daher auf eine aufwändige und nur schwer zu reproduzierende Nachbildung der kohäsiven Eigenschaften weitgehend verzichtet, dies auch vor dem Hintergrund, dass eine große Vielfalt an Kombinationen in der Zusammensetzung von Ablagerungen im Kanalnetz anzutreffen ist (vgl. Abschnitt 3.2.3). Um die **leicht lösbaren Ablagerungen** nachzubilden, wurde ein Kies-/Sandgemisch 0-16 mm gewählt (vgl. Bild 58, rote Linie), das als repräsentativ für die vor Ort ermittelten Sieblinien angesehen werden kann.

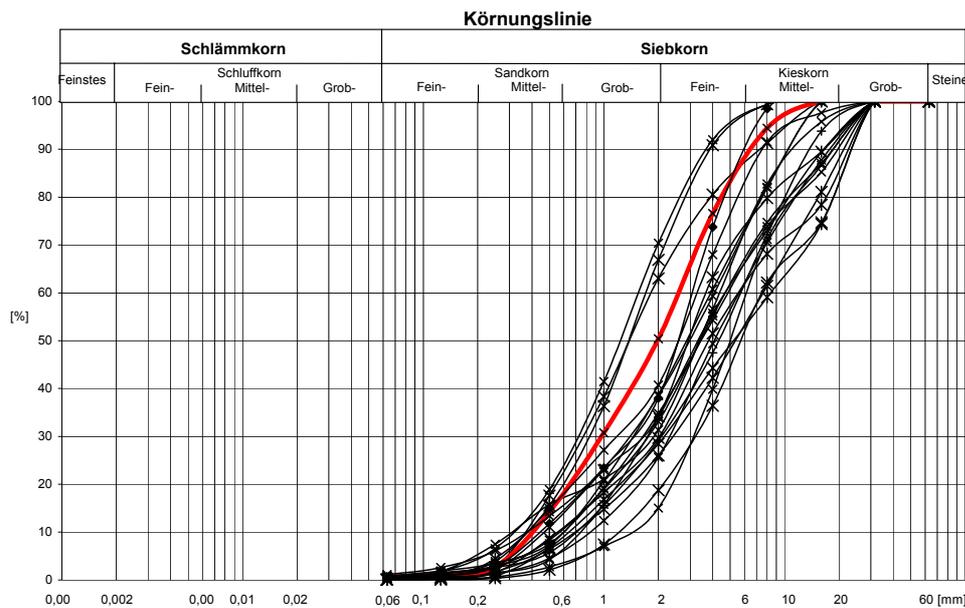


Bild 58: Sieblinie der Modellsedimente (rot), übrige Sieblinien aus realen Ablagerungsproben nach Abschnitt 3.2.3 (ohne Gelsenkirchen)

In der Betriebspraxis werden die **Düsen** und die **Reinigungsparameter** nach den zu reinigenden Haltungslängen (Schlauchlänge), den Netzbedingungen, der Ablagerungssituation sowie dem Reinigungsziel ausgewählt. Grundsätzlich gilt, je höher der **Förderstrom** der Pumpe ist, desto höher ist zum einen die Zugleistung beim Düsen-Einlass (insbesondere in langen Kanalstrecken vorteilhaft) und zum anderen die Transportleistung gelöster Ablagerungen beim Düsen-Rückzug. Bezogen auf eine Zeiteinheit bedeutet ein höherer Förderstrom jedoch gleichzeitig auch einen höheren Verbrauch an Betriebsstoffen (Diesel, Wasser) und eine höhere Belastung der zu reinigenden Bauteiloberflächen. Unter wirtschaftlichen Gesichtspunkten gibt es demnach für die jeweilige Reinigungssituation einen optimalen Bereich für die Wahl des Förderstroms und der Düsen-Rückzugsgeschwindigkeit. Vor diesem Hintergrund wurden zwei Versuchsserien, mit einer „langsamen“ (12 m/min) und einer vergleichsweise „schnellen“ (24 m/min) **Düsenrückzugsgeschwindigkeit**, unter Variation der Förderströme der HD-Pumpe (200, 240, 280 und 320 liter/min) durchgeführt. Die Düseneinlassgeschwindigkeit wurde in den Versuchen nicht variiert und betrug ca. 24 m/min. Beim Überfahren der Ablagerungen reduzierte sich diese Geschwindigkeit geringfügig. Für beide Düsenrückzugsgeschwindigkeiten wurden vergleichbare Ablagerungssituationen in den Versuchskanal eingebracht und jeweils dieselben HD-Düsen eingesetzt. Im Rahmen der Auswertung lag dabei ein Schwerpunkt in der Erfassung der benötigten **Reinigungszyklen**, um den Versuchskanal vollständig zu reinigen.

Im Folgenden werden nach Darstellung von Versuchsaufbau und -ablauf die Versuchsergebnisse getrennt für die beiden Versuchsstrecken DN 300 und DN 800 im Hinblick auf den Einfluss von Ablagerungsgrad, Förderstrom, Düsenrückzugsgeschwindigkeit und Düsenauswahl ausgewertet.

4.4.1.2 Versuchsaufbau

Unter Berücksichtigung der zusammengetragenen Praxiserfahrungen wurden repräsentative Ablagerungssituationen in den Versuchsstrecken - Nennweite DN 800 (PVC) bzw. DN 300 (Plexiglas), jeweils ca. 35 m Länge - nachgestellt. So konnte die Reinigungsleistung unterschiedlicher Düsenbauformen in Abhängigkeit

- vom Wasserdruck an der Düse bzw. des **Förderstroms** ($Q = 200, 240, 280, 320$ liter/min),
- der **Düsenrückzugsgeschwindigkeit** (Düsenrückzugsgeschwindigkeit $v = 12$ bzw. 24 m/min)
- sowie des **Verschmutzungsgrades** bzw. der Ablagerungsmenge (Verschmutzungsgrad = 15, 30, 45, 100 % von der Querschnittshöhe)

beobachtet werden. Die Reproduzierbarkeit der Versuchsergebnisse wurde durch stichprobenartige Versuchswiederholungen überprüft.

Die Modellsedimente wurden in den Versuchen auf einer Prüfstreckenlänge von ca. vier, sieben und in Einzelfällen sogar 35 Meter Länge eingebaut. Die Einbauhöhe bzw. der Verschmutzungsgrad betrug dabei 15%, 30%, 45% bzw. auch 100 % (Verstopfung) des Rohrdurchmessers. In den Versuchsstrecken DN 300 und DN 800 wurden 10 unterschiedliche Düsen-Systeme unter Variation der Reinigungsparameter Düsendruck, -durchfluss und -geschwindigkeit betrachtet (vgl. Tabelle 19). Sämtliche der ausgewählten Düsen waren nach Herstellerangaben für die jeweilige Anwendung im Versuchskanal DN 300 bzw. DN 800 geeignet. Die Ausstattung der Düsensysteme mit Düseneinsätzen erfolgte nach Herstellerangaben. Im Versuchskanal DN 800 kamen neben rundumstrahlenden Düsen auch Sohlenreiniger zum Einsatz.



Bild 59: Versuchsstrecke DN 800: Befüllen der Versuchsstrecken mit Modellsedimenten (links), Füllstandskontrolle (rechts)

Vor Beginn einer Versuchsreihe wurde für die jeweilige Düse eine Kennlinie (Druck und Durchfluss) an der Düse in Abhängigkeit der Motordrehzahl und des am Fahrzeug gemessenen Drucks messtechnisch erfasst. Die Einlass- und Rückzugsgeschwindigkeit wurden mit Hilfe einer Stopp-Uhr überwacht.

Die in den Reinigungsversuchen eingesetzten Hochdruck-Spülfahrzeuge (vgl. Bild 60) sollten es erlauben, die Einlass- und Rückzugsgeschwindigkeit zuverlässig zu steuern und die maximale Förderleistung von 320 liter/min dauerhaft über mehrere Stunden am Tag abzurufen. Die von Dienstleistern angebotenen Fahrzeuge genügten diesem Anspruch nur selten. Auch mussten während des umfangreichen Versuchsprogramms die eingesetzten Fahrzeuge mehrfach repariert bzw. sogar ausgetauscht werden.



Bild 60: Einsatz von HD-Spülfahrzeugen im Versuch (links); Messung der Betriebsparameter (Druck und Durchfluss) mit MID-Durchflussmessgerät und Druckaufnehmer (rechts)

4.4.1.3 Versuchsablauf

Der Versuchsablauf wurde standardisiert. Zu Beginn wird die Düse am Anfang der Versuchsstrecke positioniert und es werden die Reinigungsparameter am Hochdruckspülfahrzeug (Pumpendruck/Motordrehzahl) auf die jeweils vorgesehene Leistung eingestellt. Erst danach fährt die Düse in die Versuchshaltung ein (Bild 61). Der gesamte Reinigungsvorgang wird dabei über eine am Haltungsende positionierte Videokamera dokumentiert. Hierbei wird auch auf ein eventuelles Schlagen/Pendeln der Düse in der Rohrsohle geachtet. Trifft die Düse auf die Modellsedimente, sollen diese möglichst schnell überwunden werden. Dabei gleitet die Düsen teilweise über die Ablagerungen hinweg, teilweise werden schon jetzt Ablagerungen aufgewirbelt und abtransportiert (Bild 62). Nachdem die Düse das Haltungsende erreicht hat, wird die Hochdruckspülpumpe abgeschaltet und die Ablagerungssituation begutachtet und mit der Videokamera dokumentiert. Danach wird der Pumpendruck wieder aufgebaut und die Düse bis zur Ausgangsposition am Anfang der Versuchsstrecke zurückgezogen. Erneut erfolgt eine visuelle Begutachtung der Versuchsstrecke. Bei

unbefriedigendem Reinigungsergebnis, d.h. wenn Modellsedimente in der Versuchsstrecke verblieben sind, wird dies dokumentiert und im Anschluss ein weiterer Reinigungszyklus durchgeführt. Der Vorgang wird solange wiederholt, bis die Versuchsstrecke vollständig leergeräumt ist (Bild 63).



Bild 61: Einspülen der Düse



Bild 62: Ablagerungen transportieren



Bild 63: Freigespülte Strecke

Für jeden Versuch wurde Folgendes dokumentiert:

- Bewegungsverhalten der Düse,
- die Zugleistung bzw. das Vermögen, die Ablagerungen zu überwinden,
- die Anzahl der notwendigen Reinigungszyklen zur vollständigen Reinigung der Versuchsstrecke und
- evtl. auftretende Besonderheiten.

Tabelle 21 gibt einen Überblick zu den Versuchsrandbedingungen und den im Rahmen der Versuche durchgeführten Parametervariationen. Insgesamt wurden über 600 Einzelversuche (einschließlich Vorversuche) durchgeführt und in 359 Versuchen gezielte Parametervariationen vorgenommen. Die hierzu ausgewählten Düsen und das detaillierte Versuchsprogramm mit Ergebnissen sind in den folgenden Abschnitten dargestellt.

Tabelle 21: Versuchsablauf und Randbedingungen

Randbedingung	Beschreibung
Versuchszahl	614 (359 Hauptversuche + 255 Vorversuche)
Versuchsstrecken	DN 800 PVC, DN 300 Plexiglas
Gesamtlänge	jeweils ca. 35 m
Gefälle	ca. 3 ‰
Ablagerungen	Kies-/Sandgemisch 0/16 mm
Ablagerungshöhe	15, 30, 45 und 100 % des Rohrdurchmessers auf einer Länge von ca. 4,20 m bzw. 7,20 m (4,20 m + 3 m).
Düsensystem und Betriebsparameter	rundumstrahlende Düsen, flachstrahlende Düsen (Sohlenreiniger)
Prüfdruck	in Abhängigkeit des Durchflusses (max. 120 bar bei 320 liter/min)
Durchfluss	je untersuchter Düse mit Q=200, 240, 280, 320 [l/min]
Rückzugsgeschwindigkeit	langsam: v=12 [m/min] schnell: v=24 [m/min]
Spüldurchgänge	Dokumentation der notwendigen Reinigungszyklen zur vollständigen Reinigung (Hin- und Rückfahren der Düse = 1 Zyklus)

4.4.2 Versuche DN 300

4.4.2.1 Untersuchungsumfang und -ergebnisse

Die Untersuchungen zur Räumleistung von Düsen in kleineren Kanälen wurden in einem durchsichtigen, 35 m langen Plexiglaskanal der Nennweite DN 300 durchgeführt. Insgesamt wurden 6 verschiedene rundumstrahlende Düsen, die nach Herstellerangaben für die gewählte Reinigungssituation geeignet waren, eingesetzt.

Tabelle 22: Eingesetzte Düsensysteme, Transportversuche, DN 300

<p>D1 (8x30°) 8 Düseneinsätze Winkel 30°</p>			
<p>D2 (5x20°, 5x30°) 10 Düseneinsätze Winkel 20°, 30°</p>			
<p>D3 (4x3°, 4x7°, 4x15°, 4x25°) 16 Düseneinsätze Winkel 3°, 7°, 15°, 25°</p>			
<p>D4 (5x10°, 5x20°) 10 Düseneinsätze Winkel 10°, 20°</p>			
<p>D5 (4x15°, 8x20°) 12 Einsätze, 4 Vorstrahlen Winkel 15°, 20°</p>			
<p>D6 (4x6°, 4x12°) 8 Düseneinsätze Winkel 6°, 12°</p>			

Die Transportleistung von HD-Düsen wird wesentlich durch die Betriebsparameter Düsendruck- und durchfluss sowie die Düsenrückzugsgeschwindigkeit beeinflusst. Darüber hinaus ist der Ablagerungsgrad bzw. die zu transportierende Ablagerungsmenge von besonderer Bedeutung. Intensive Vorversuche waren notwendig, um die Parametervariationen für das systematische Versuchsprogramm festzulegen. Zur vergleichenden Betrachtung der Düsensysteme wurden diese bis an die Grenzbereiche ihrer Leistungsfähigkeit eingesetzt. Nach einer unvollständigen Reinigung wurde solange erneut gereinigt, bis die Teststrecke ablagerungsfrei war. Die Anzahl der zur vollständigen Reinigung der Teststrecke benötigten Reinigungszyklen war vor diesem Hintergrund ein maßgebliches Kriterium zur Leistungsbewertung der Düsensysteme.

Der Transportvorgang des Materials konnte in dem durchsichtigen Kanal DN 300 beobachtet und charakteristische Prozessphasen ermittelt werden. So ist im Bild 64 bspw. die „Wurfweite“ einer Düse erkennbar. Bis zu einer Weite von ca. 2 Metern wird in diesem Fall das Modellsediment aufgewirbelt und in Fließrichtung geschleudert. Danach folgt ein Bereich in dem sich die Modellsedimente dünenartig über eine Länge von ca. 4 Metern absetzen. Sie werden dabei stark entmischt. Über den Rohrquerschnitt betrachtet setzt sich das Grobkorn nach unten ab und darüber lagert sich das Feinkorn an. Beim Zurückziehen der Düse wandert die Düne in Fließrichtung mit. Ist die Düse an der Leistungsgrenze, kann sie nicht mehr genügend Material transportieren. Im Wurfbereich kommt es zu Wasserrückstau. Hierdurch wird die Leistungsfähigkeit zusätzlich herabgesetzt. Ein Großteil der Wirkung wird im rückgestauten Wasser gedämpft. Mit der Folge, dass die Düse die Modellsedimente überfährt und in der Teststrecke zurückklässt. Wird die Düse mit hoher Geschwindigkeit zurückgezogen, ist ihre Leistungsgrenze schneller erreicht und der o.a. Vorgang setzt frühzeitiger ein. In allen Fällen wurde das Sediment während des Transportvorganges in kleine und größere Kornfraktionen entmischt.



Bild 64: Beobachtung des Transportvorgangs in einem durchsichtigen Kanal DN 300

Tabelle 23 gibt einen Überblick über das Versuchsprogramm und die -ergebnisse. Es wurden bereichsweise Ablagerungen von 15 %, 30 %, 45 % und 100 % (Verstopfungssituation) der Querschnittshöhe in die Teststrecke DN 300 eingebaut. Die Düsenrückzugsgeschwindigkeiten lagen bei 12 bzw. 24 m/min.

Tabelle 23: Untersuchungsprogramm und -ergebnisse (Reinigungszyklen) zur Transportleistung im Test-Kanal DN 300

ARBEITSPROGRAMM		ANZAHL DER BENÖTIGTEN REINIGUNGSZYKLEN																			
Ablagerungslänge		ca. 7,20* m						ca. 4,20 m													
Düsenrückzugsgeschwindigkeit		12 m/min						12 m/min						24 m/min				Ø			
Ablagerungsgrad [%]		100	100	100	100	Ø	100	100	100	100	Ø	45	30	15	Ø	100	45	30	15	Ø	Gesamt
Düse D1	Q ₁	200	2	2	—	n.a.	—	—	—	n.a.	2	1	1	n.a.	4	3	2	1	n.a.	n.a.	
	Q ₂	240	3	3	3	n.a.	2	2	2	2	1	1	1	1,25	3	2	1	1	1,75	1,5	
	Q ₃	280	3	3	3	n.a.	2	2	2	2	1	1	1	1,25	2	1	1	1	1,25	1,25	
	Q ₄	320	2	—	2	n.a.	2	2	2	2	1	1	1	1,25	2	1	1	1	1,25	1,25	
	Ø	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	2	2	2	2	1	1	1	1,25	2,33	1,33	1	1	1,42	1,33	
Düse D2	Q ₁	200	—	—	—	n.a.	—	—	—	n.a.	2	1	1	n.a.	3	2	2	1	n.a.	n.a.	
	Q ₂	240	3	3	3	n.a.	2	2	2	2	1	1	1	1,25	3	2	1	1	1,75	1,5	
	Q ₃	280	2	2	3	n.a.	2	2	2	2	1	1	1	1,25	2	1	1	1	1,25	1,25	
	Q ₄	320	2	2	2	n.a.	2	2	2	2	1	1	1	1,25	2	1	1	1	1,25	1,25	
	Ø	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	2	2	2	2	1	1	1	1,25	2,33	1,33	1	1	1,42	1,33	
Düse D3	Q ₁	200	—	—	—	n.a.	2	2	2	n.a.	1	1	1	n.a.	2	1	1	1	n.a.	n.a.	
	Q ₂	240	2	—	—	n.a.	1	1	1	1	1	1	1	1	2	1	1	1	1,25	1,13	
	Q ₃	280	2	—	—	n.a.	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	
	Q ₄	320	2	—	—	n.a.	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	
	Ø	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	1	1	1	1	1	1	1	1	1,33	1	1	1	1,08	1,04	
Düse D4	Q ₁	200	—	—	—	n.a.	2	2	2	n.a.	1	1	1	n.a.	2	1	1	1	n.a.	n.a.	
	Q ₂	240	2	—	—	n.a.	1	1	1	1	1	1	1	1	2	1	1	1	1,25	1,13	
	Q ₃	280	2	2	2	n.a.	1	1	1	1	1	1	1	1	2	1	1	1	1,25	1,13	
	Q ₄	320	2	1	1	n.a.	1	1	1	1	1	1	1	1	2	1	1	1	1,25	1,13	
	Ø	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	1	1	1	1	1	1	1	1	2	1	1	1	1,25	1,13	
Düse D5	Q ₁	200	—	—	—	n.a.	2	2	2	n.a.	1	1	1	n.a.	2	2	1	1	n.a.	n.a.	
	Q ₂	240	3	—	—	n.a.	2	2	2	2	1	1	1	1,25	2	1	1	1	1,25	1,25	
	Q ₃	280	3	—	—	n.a.	2	2	2	2	1	1	1	1,25	2	1	1	1	1,25	1,25	
	Q ₄	320	2	3	—	n.a.	2	2	2	2	1	1	1	1,25	2	1	1	1	1,25	1,25	
	Ø	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	2	2	2	2	1	1	1	1,25	2	1	1	1	1,25	1,25	
Düse D6	Q ₁	200	—	—	—	n.a.	—	—	—	n.a.	1	1	1	n.a.	2	1	1	1	n.a.	n.a.	
	Q ₂	240	—	—	—	n.a.	1	1	1	1	1	1	1	1	2	1	1	1	1,25	1,13	
	Q ₃	280	—	—	—	n.a.	1	1	1	1	1	1	1	1	2	1	1	1	1,25	1,13	
	Q ₄	320	—	—	—	n.a.	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	
	Ø	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	1	1	1	1	1	1	1	1	1,67	1	1	1	1,17	1,09	
Ø GESAMT	Q ₁	200	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	
	Q ₂	240	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	1,5	1,5	1,5	1,5	1	1	1	1,13	2,33	1,33	1	1	1,42	1,28	
	Q ₃	280	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	1,5	1,5	1,5	1,5	1	1	1	1,13	1,83	1	1	1	1,21	1,17	
	Q ₄	320	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	1,5	1,5	1,5	1,5	1	1	1	1,13	1,67	1	1	1	1,17	1,15	
	Ø	Ø	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	1,5	1,5	1,5	1,5	1	1	1	1,13	1,94	1,11	1	1	1,27	1,2	

n.a. = nicht ausgewertet

* Ablagerungslänge ca. 7,20m = ca. 4,2 m + ca. 3 m.

Es zeigte sich bereits in ersten Reinigungsversuchen, dass bei Füllgraden von 15 % sämtliche Reinigungssysteme die Prüfstrecke zuverlässig in einem Reinigungsgang reinigten. Es wurden daher vorwiegend Ablagerungshöhen mit einem Füllgrad von 30 %, 45 % bis hin zu einer Vollverstopfung (Füllgrad 100 %) in die Versuchshaltung auf einer Länge von 4,20 m eingebaut. Darüber hinaus wurden über eine zweite Befüllstation, ca. fünf Meter vor der ersten, weitere Ablagerungen (ebenfalls 100%) auf einer Länge von ca. drei Metern eingebaut. Allerdings ließ sich auch hier die Versuchstrecke i.d.R. mit 2 bis 3 Durchgängen zuverlässig reinigen.

4.4.2.2 Einfluss Ablagerungsgrad und -menge

In Bild 65 sind die durchschnittlich benötigten Reinigungszyklen in Abhängigkeit des Füllgrades der Versuchsstrecke von 15 %, 30 %, 45 % und 100 % dargestellt. Bei einem Füllgrad von 15 % reinigten sämtliche Düsensysteme die Leitung in einem Zyklus. Bei einem Füllgrad von 30 % war lediglich bei zwei Düsensystemen und einem geringen Durchfluss von 200 l/min ein zweiter Reinigungszyklus notwendig. Diese Fälle wurden in der Ermittlung der durchschnittlichen Zyklenanzahl nicht berücksichtigt. Erst bei einem Füllgrad von 45 % steigt die Anzahl der benötigten Reinigungszyklen nennenswert auf durchschnittlich 1,11 an. Für die Beseitigung einer Verstopfungssituation, wie sie der Füllgrad 100 % repräsentiert, wurden i.M. annähernd zwei Reinigungszyklen benötigt. Die Versuchsergebnisse lassen darauf schließen, dass die Transportleistung der angewendeten Düsensysteme in kleineren Kanälen grundsätzlich ausreicht, um auch extreme Füllgrade und Ablagerungsmengen in einem Reinigungszyklus zu bewältigen.

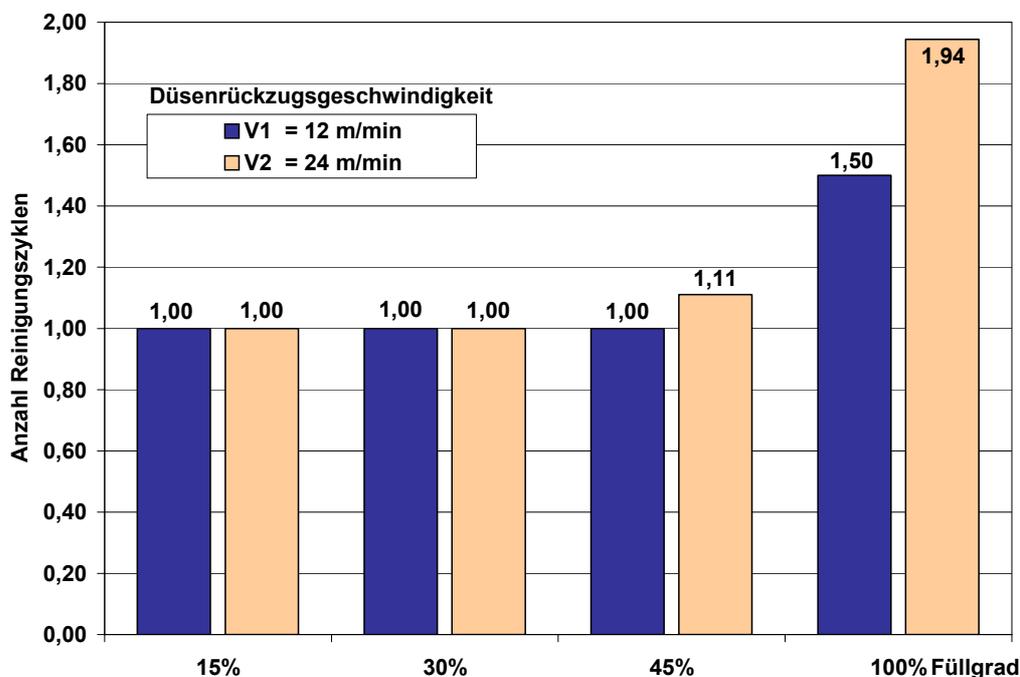


Bild 65: Durchschnittliche Anzahl der notwendigen Reinigungszyklen in Abhängigkeit des Füllgrades der Versuchsstrecke DN 300 mit Modellsedimenten auf 4,2 m Länge

4.4.2.3 Einfluss Rückzugsgeschwindigkeit und Förderstrom

Um den Einfluss der Düsen-Rückzugsgeschwindigkeit zu untersuchen, wurden Testreihen mit einer langsamen Düsen-Rückzugsgeschwindigkeit (12 m/min) und einer vergleichsweise schnelleren (24 m/min) durchgeführt. Die Anzahl der notwendigen Reinigungszyklen in Abhängigkeit der Durchflussraten, von 240, 280 und 320 l/min, ist in Bild 66 zusammenfassend dargestellt. Für die langsame Rückzugsgeschwindigkeit kann mit 240 l/min eine vergleichbare Leistung erzielt werden wie mit 320 l/min. Bei einer Verdoppelung der Rückzugsgeschwindigkeiten wächst der Einfluss der Durchflussrate. Doch auch hier wird bei der Anwendung einer Durchflussrate von 280 l/min eine zur hohen Durchflussrate von 320 l/min vergleichbare Reinigungsleistung erbracht.

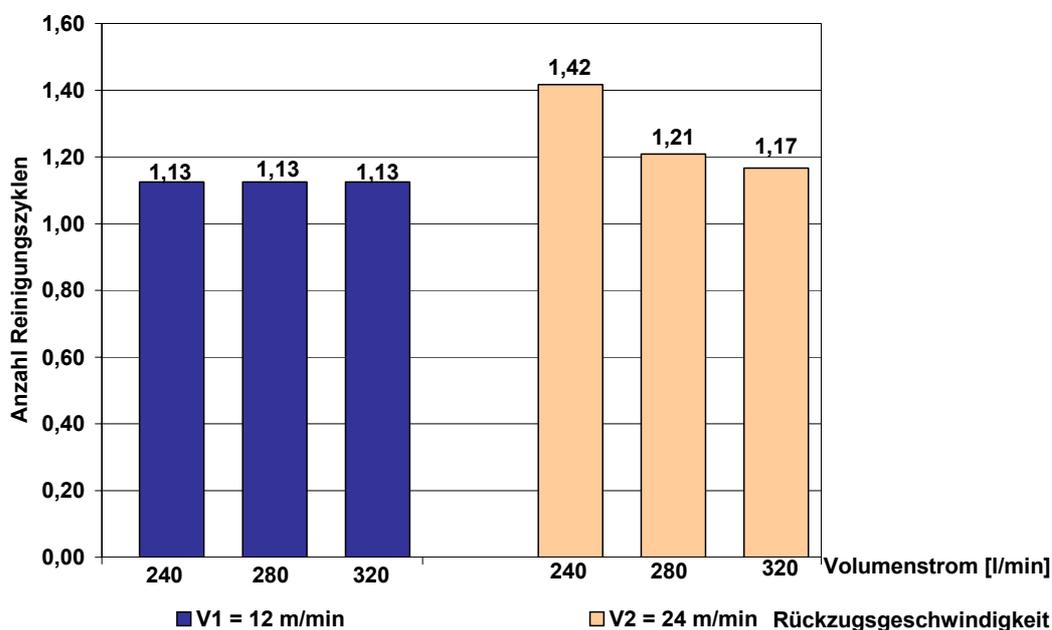


Bild 66: Durchschnittliche Anzahl der notwendigen Reinigungszyklen in Abhängigkeit der Düsenrückzugsgeschwindigkeit und des Förderstroms der HD-Pumpe, DN 300, ermittelt für 15 %, 30 %, 45 %, 100% Ablagerungshöhe

Für die langsamere Rückzugsgeschwindigkeit ergibt sich damit eine durchschnittliche Anzahl der für eine vollständige Reinigung notwendigen Reinigungszyklen von 1,13. Bei einer Verdoppelung der Rückzugsgeschwindigkeit auf 24 m/min erhöhte sich die durchschnittliche Anzahl der notwendigen Reinigungszyklen auf 1,27 (vgl. Tabelle 23). Da diese Erhöhung überwiegend aus den Versuchsergebnissen in den Verstopfungssituationen resultiert, kann zusammenfassend festgestellt werden, dass in kleineren Kanälen durch die Verdoppelung der Rückzugsgeschwindigkeit die Erfolgssicherheit für eine vollständige Reinigung nur bei extremen Ablagerungsgraden und -mengen eingeschränkt wird. Neben der Düsen-Rückzugsgeschwindigkeit bestimmt auch der Förderstrom die Transportleistung. In gewissem Maße lässt sich somit die Einschränkung der Transportleistung infolge eines schnellen Düsenrückzugs durch höhere Förderströme ausgleichen.

4.4.2.4 Einfluss Düsen-Auswahl

Bild 67 stellt die durchschnittliche Häufigkeit der Reinigungszyklen bei langsamer bzw. schneller Rückzugsgeschwindigkeit für die verschiedenen Düsensysteme dar. Es zeigt sich, dass insbesondere die mit Blick auf die Transportleistung schwachen Systeme empfindlich auf die Erhöhung der Rückzugsgeschwindigkeit reagieren. Der Leistungsunterschied schlägt sich im Extremfall bei gleicher Aufgabenstellung in einem Mehraufwand von durchschnittlich 0,34 zusätzlich durchzuführenden Reinigungszyklen nieder. D.h. unter den Düsen gibt es erkennbare Leistungsunterschiede.

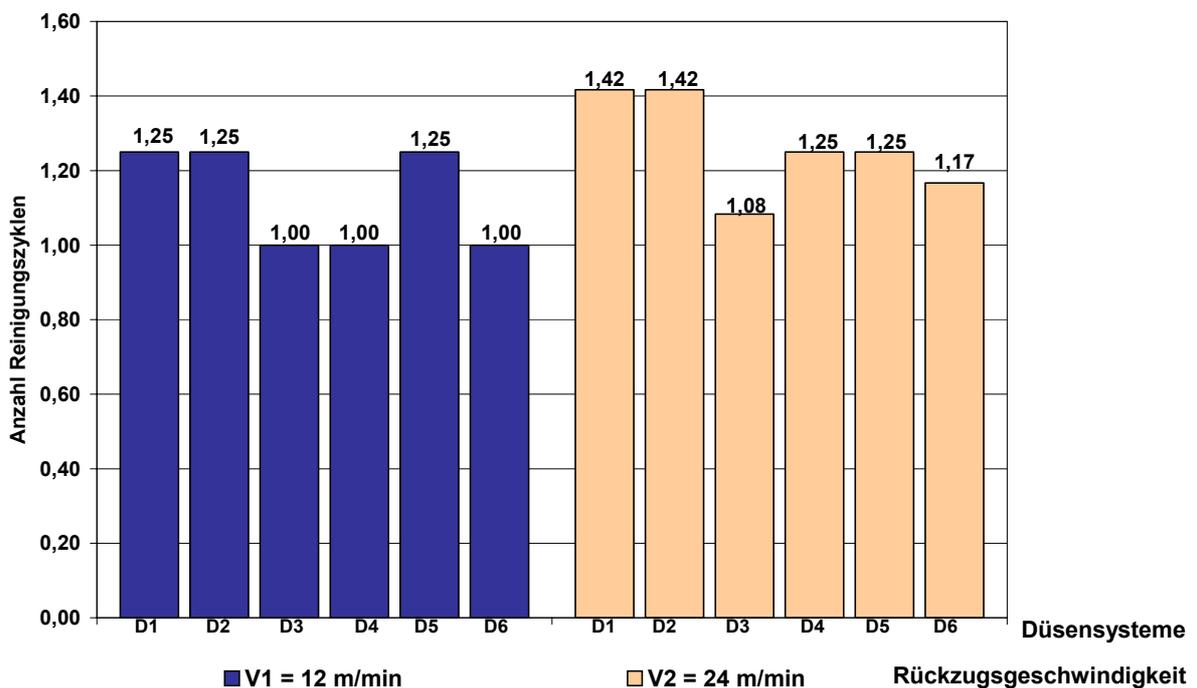


Bild 67: Anzahl der notwendigen Reinigungszyklen in Abhängigkeit des gewählten Düsensystems und der Rückzugsgeschwindigkeit, DN 300, ermittelt für 15 %, 30 %, 45% und 100 % Ablagerungshöhe

Im **Gesamtblick** der verschiedenen Auswertungen für die **Teststrecke DN 300** wird deutlich, dass auch mit niedrigeren Förderströmen (ca. 240 l/min) und schnelleren Düsenrückzugsgeschwindigkeiten (ca. 24 m/min) bereits eine ausreichende Transportleistung erzielt werden kann, um größere Ablagerungsmengen zu transportieren. Dies lässt sich im wesentlichen dadurch begründen, dass insbesondere in kleineren Querschnitten die Sedimente nicht nur durch das beschleunigte Spülwasser, sondern auch in besonderem Maße durch den Luftstrom mitgerissen und transportiert werden. Dies belegen auch die in Abschnitt 4.5.2 dargestellten Messungen zur Strahldruckverteilung. Vor diesem Hintergrund wirken sich Leistungsunterschiede von HD-Düsen im Hinblick auf den Feststofftransport vornehmlich nur bei extremen Ablagerungsmengen und –graden aus.

4.4.3 Versuche DN 800

4.4.3.1 Untersuchungsumfang und -ergebnisse

In der Versuchsstrecke DN 800 wurde die Räumleistung von vier verschiedenen Düsenkörpern untersucht, darunter zwei rundumstrahlende Düsen und zwei Sohlenreiniger (vgl. Tabelle 24).

Nach Herstellerangaben sind die ausgewählten Düsensysteme für die im Rahmen der Tests gestellten Reinigungsaufgaben geeignet. Auch nach Betreiberangaben werden diese Produkte in der Praxis zur Reinigung von mittelgroßen Kanälen (ca. DN 500 – DN 1200) eingesetzt. Als wesentliches Bewertungskriterium wurde die Anzahl der bei Einsatz der Düsen benötigten Reinigungszyklen gewählt. Die Reproduzierbarkeit der Ergebnisse wurde durch stichprobenartige Wiederholungsprüfungen bestätigt.

Tabelle 24: Übersicht zu den im Versuchskanal DN 800 getesteten Düsen

 D7 (5x15°, 5x30°)	rundumstrahlende Düse 10 Düseneinsätze Winkel 15°, 30°		
 D8 (8x4°)	flachstrahlende Düse 8 Düseneinsätze Winkel 4°		
 D9 (6x10,5°)	flachstrahlende Düse 6 Düseneinsätze Winkel 10,5°		
 D10 (5x3°, 5x7°, 5x15°, 5x25°)	rundumstrahlende Düse 20 Düseneinsätze Winkel 3°, 7°, 15° u. 25°		

In der ca. 35 m langen Versuchsstrecke DN 800 wurden Modellsedimente mit einem Verschmutzungsgrad von 15, 30 und 45 % der Querschnittshöhe auf einer Länge von ca. 4 Metern eingebaut. Bild 57 zeigt beispielhaft eine Düse am Ende der Versuchsstrecke (links) und das Reinigungsergebnis nach dem Zurückziehen bis zum Haltungsanfang (rechts).



Bild 68: IKT-Prüfstrecke DN 800 (PVC), Räumversuch, Bildbeispiel:

Düse während der Reinigung (links), Ergebnis nach einem Zyklus (rechts)

Für die Reinigung der Kanäle im Nennweitenbereich DN 500 – DN 800 werden häufig HD-Fahrzeuge mit einer maximalen Pumpenkapazität von 320 liter/min eingesetzt (vgl. Abschnitt 3.3). Auch im Test wurde daher mit einem HD-Fahrzeug gearbeitet, welches über dieses Leistungsvermögen verfügt. In vergleichenden Testreihen wurde die Reinigung verschiedener Ablagerungssituationen (Ablagerungsgrad 15, 30 oder 45 %) mit unterschiedlichen Förderströmen (240, 280 oder 320 liter/min) und Düsenrückzugsgeschwindigkeiten (12 bzw. 24 m/min) beobachtet. Dabei wurde u.a. dokumentiert, wieviele Reinigungszyklen jeweils notwendig waren, um die Teststrecke vollständig zu reinigen.

Nach den Praxiserfahrungen ist eine starke Verschmutzung in einem großen Kanal DN 800 im Vergleich zu einem kleineren Kanal DN 300 durch einen deutlich höheren Volumenstrom in Verbindung mit einer langsameren Düsenrückzugsgeschwindigkeit zu bewältigen. Um diese Praxiserfahrungen zu verifizieren und auch konkreter zu fassen, wurde das nachfolgend dargestellte Untersuchungsprogramm im Test-Kanal DN 800 umgesetzt (vgl. Tabelle 25).

Tabelle 25: Untersuchungsprogramm und –ergebnisse (Reinigungszyklen) zur Transportleistung im Test-Kanal DN 800, Ablagerungslänge ca. 4,20 m

ARBEITSPROGRAMM				ANZAHL DER BENÖTIGTEN REINIGUNGSZYKLEN											
Düsenrückzugs- geschwindigkeit				12 m/min						24 m/min				Ø	
				15	30	30	30	30 _Ø	45	Ø	15	30	45	Ø	Gesamt
Ablagerungsgrad [%]				15	30	30	30	30 _Ø	45	Ø	15	30	45	Ø	Gesamt
Düse 8	Q1	[l/min]	240	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	2,00	1,33	1,00	2,00	3,00	2,00	1,67
	Q2	[l/min]	280	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	2,00	1,33	1,00	2,00	2,00	1,67	1,50
	Q3	[l/min]	320	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	2,00	1,33	1,00	2,00	2,00	1,67	1,50
			Ø	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	2,00	1,33	1,00	2,00	2,33	1,78	1,56
Düse 9	Q1	[l/min]	240	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	2,00	1,33	1,00	2,00	3,00	2,00	1,67
	Q2	[l/min]	280	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	2,00	1,33	1,00	2,00	2,00	1,67	1,50
	Q3	[l/min]	320	1,00	n.a.	1,00	1,00	1,00	2,00	1,33	1,00	2,00	2,00	1,67	1,50
			Ø	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	2,00	1,33	1,00	2,00	2,33	1,78	1,56
Düse 10	Q1	[l/min]	240	1,00	2,00	2,00	2,00	2,00	2,00	1,67	1,00	3,00	3,00	2,33	2,00
	Q2	[l/min]	280	1,00	2,00	2,00	2,00	2,00	2,00	1,67	1,00	2,00	2,00	1,67	1,67
	Q3	[l/min]	320	1,00	2,00	2,00	2,00	2,00	2,00	1,67	1,00	2,00	2,00	1,67	1,67
			Ø	1,00	2,00	2,00	2,00	2,00	2,00	1,67	1,00	2,33	2,33	1,89	1,78
Düse 11	Q1	[l/min]	240	1,00	2,00	2,00	2,00	2,00	2,00	1,67	1,00	2,00	4,00	2,33	2,00
	Q2	[l/min]	280	1,00	1,00	2,00	1,00	1,33	2,00	1,44	1,00	2,00	3,00	2,00	1,72
	Q3	[l/min]	320	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	2,00	1,33	1,00	2,00	2,00	1,67	1,50
			Ø	1,00	1,33	1,67	1,33	1,44	2,00	1,48	1,00	2,00	3,00	2,00	1,74
Ø GESAMT	Q1	[l/min]	240	1,00	n.a.	n.a.	n.a.	1,50	2,00	1,50	1,00	2,25	3,25	2,17	1,83
	Q2	[l/min]	280	1,00	n.a.	n.a.	n.a.	1,33	2,00	1,44	1,00	2,00	2,25	1,75	1,60
	Q3	[l/min]	320	1,00	n.a.	n.a.	n.a.	1,28	2,00	1,42	1,00	2,00	2,00	1,67	1,55
			Ø	1,00	n.a.	n.a.	n.a.	1,37	2,00	1,45	1,00	2,08	2,50	1,86	1,67

n.a. nicht ausgewertet

4.4.3.2 Einfluss Ablagerungsgrad und -menge

Sämtliche Test-Aufgaben wurden vergleichend mit einer „langsamen“ Rückzugsgeschwindigkeit der Düse von ca. 12 m/min und einer doppelt so „schnellen“ Rückzugsgeschwindigkeit von ca. 24 m/min durchgeführt. Bei unvollständiger Reinigung wurde der Reinigungszyklus solange wiederholt, bis der Kanal ablagerungsfrei war. Im Rahmen der Versuche konnte festgestellt werden,

dass mit der Verdoppelung der Rückzugsgeschwindigkeit die Anzahl der Reinigungszyklen, die für eine vollständige Reinigung benötigt wurden, grundsätzlich steigt (vgl. Bild 69). Eine Ausnahme stellt der niedrigste Füllgrad von 15 % dar. Hier wurde sowohl mit der Rückzugsgeschwindigkeit von 12 m/min als auch mit verdoppelter Rückzugsgeschwindigkeit von 24 m/min die Teststrecke sicher in einem Reinigungszyklus gereinigt.

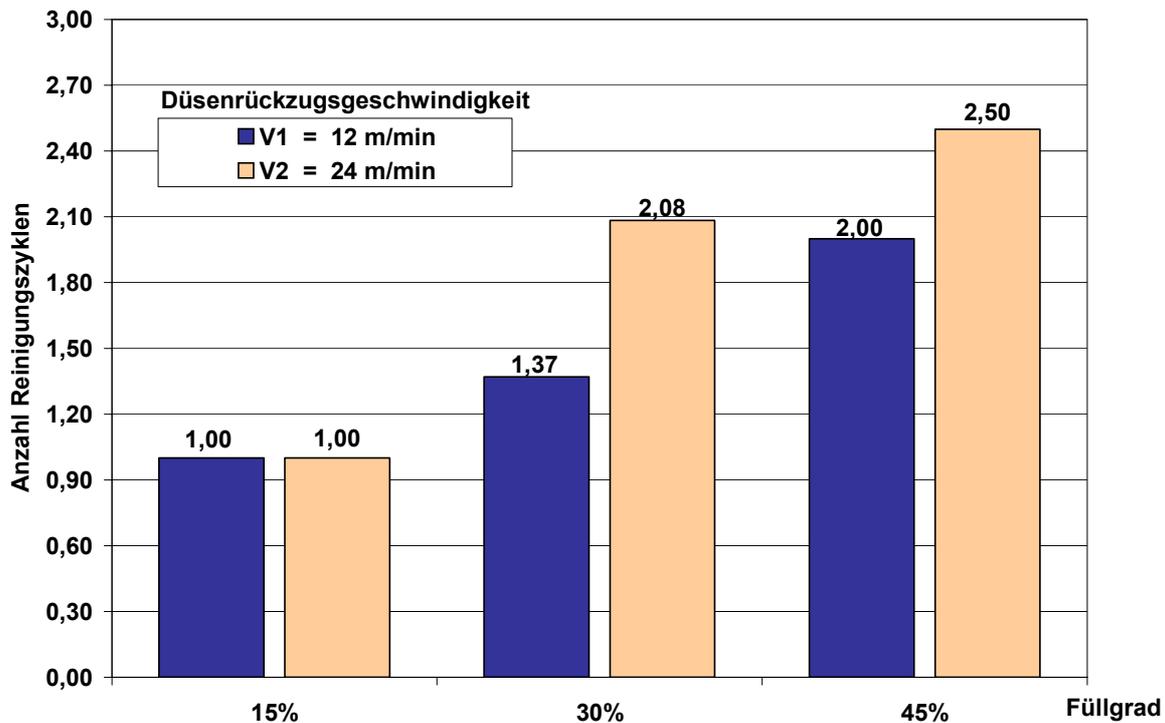


Bild 69: Reinigungszyklen in Abhängigkeit des Füllgrades und der Düsen-Rückzugsgeschwindigkeit, DN 800

Erwartungsgemäß war somit die Diskrepanz in der Erfolgsquote zwischen langsamer und schneller Düsen-Rückzugsgeschwindigkeit umso deutlicher, je schwieriger die Test-Aufgabe sich darstellte bzw. je mehr Modellsedimente im Kanal eingebaut wurden. So musste bei einer Ablagerungshöhe von 30 % und *langsamer* Düsen-Rückzugsgeschwindigkeit nur vereinzelt zweimal gereinigt werden, um die Versuchsstrecke vollständig zu reinigen. Im Vergleich dazu waren bei der *schnellen* Düsen-Rückzugsgeschwindigkeit grundsätzlich zwei Reinigungszyklen notwendig. Interessant ist, dass der Unterschied bei einer weiteren Steigerung der Ablagerungshöhe auf 45 % nicht mehr so deutlich auftrat (vgl. Bild 69). Bei dieser extremen Ablagerungshöhe waren auch bei der langsamen Rückzugsgeschwindigkeit fast immer zwei Reinigungszyklen notwendig. Sehr häufig genügten jedoch auch bei einer schnellen Rückzugsgeschwindigkeit zwei Reinigungszyklen um die Teststrecke vollständig zu reinigen.

4.4.3.3 Einfluss Rückzugsgeschwindigkeit und Förderstrom

In der Betriebspraxis stellt sich grundsätzlich die Frage, mit welchem Förderstrom und welcher Düsenrückzugsgeschwindigkeit, d.h. mit welchem optimalen Energieaufwand, die jeweiligen Reinigungsaufgaben zu lösen sind. Ist die Durchflussrate zu gering bzw. die Düsenrückzugsgeschwindigkeit zu hoch, ist der Energieverbrauch zwar gering, jedoch erhöht sich das Risiko von Qualitätsdefiziten. Erwartungsgemäß steigt mit zunehmendem Schwierigkeitsgrad der Reinigungsaufgabe die Anzahl der zur vollständigen Reinigung erforderlichen Reinigungszyklen. Während die Modellsedimente im Test bei einem Füllgrad von 15 % häufig noch in einem Reinigungszyklus aus der Versuchsstrecke transportiert werden konnten, waren bei einem extremen Füllgrad von 45 % bis zu vier Reinigungszyklen notwendig (vgl. Tabelle 25). Bis zu einem Füllgrad von 30 % wurden mit einer vergleichsweise geringen Durchflussrate von 280 liter/min ähnliche Ergebnisse wie mit 320 liter/min erzielt. Bei extremen Füllgraden von 45 % und geringer Rückzugsgeschwindigkeit waren auch mit der maximal verfügbaren Durchflussrate von 320 liter/min grundsätzlich zwei Reinigungszyklen notwendig.

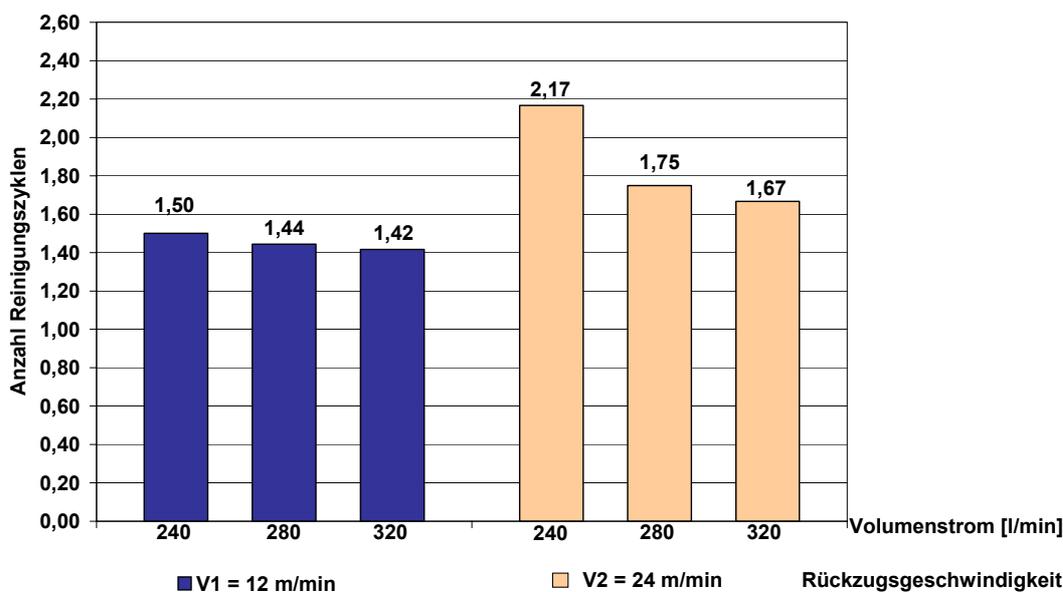


Bild 70: Durchschnittliche Anzahl der notwendigen Reinigungszyklen in Abhängigkeit der Düsenrückzugsgeschwindigkeit und des Förderstroms der HD-Pumpe, DN 800, ermittelt für 15 %, 30 %, 45 % Ablagerungshöhe

Eine reduzierte Förderleistung kann deutlich Betriebsstoffe sparen und den Fahrzeug-Motor schonen. Betriebserfahrungen [56] bestätigen, dass hierdurch auf Dauer die Betriebs-, Instandhaltungs- und Reparaturkosten für die HD-Fahrzeuge beträchtlich gesenkt werden können. Dies lässt sich auch anhand der hier durchgeführten Versuche darstellen. So arbeitete der Motor des HD-Fahrzeugs bei der hohen Förderrate von 320 liter/min unter Voll-Last und verbrauchte stündlich ca. 25 Liter Dieselkraftstoff. Zur Förderung von 280 liter/min war eine geringere Motordrehzahl erforderlich, so dass sich der Kraftstoffverbrauch um ca. 25 % reduzierte.

4.4.3.4 Einfluss Düsen-Auswahl

Bei einem Füllgrad von 15 % der Querschnittshöhe konnten bei Einsatz der meisten Düsen die Modellsedimente noch mit einem einzigen Reinigungszyklus aus der Versuchsstrecke befördert werden. Jedoch stieg bei Füllhöhen von 30 % und 45 % (auf einer Länge von ca. 4 Metern) die Anzahl der notwendigen Reinigungszyklen deutlich an. In Bild 71 ist eine Gesamtübersicht über das durchschnittliche Abschneiden der verschiedenen Düsensysteme in sämtlichen Test-Situationen der Versuchsstrecke DN 800 dargestellt. Die Ergebnisse spiegeln die Leistungsunterschiede bei den verschiedenen Düsen wieder. Da die Düsen jeweils annähernd mit dem gleichen Energieaufwand betrieben wurden, bringt eine Reduzierung der benötigten Reinigungszyklen stets Einsparungen an Zeit, Wasser und Betriebsstoffen mit sich.

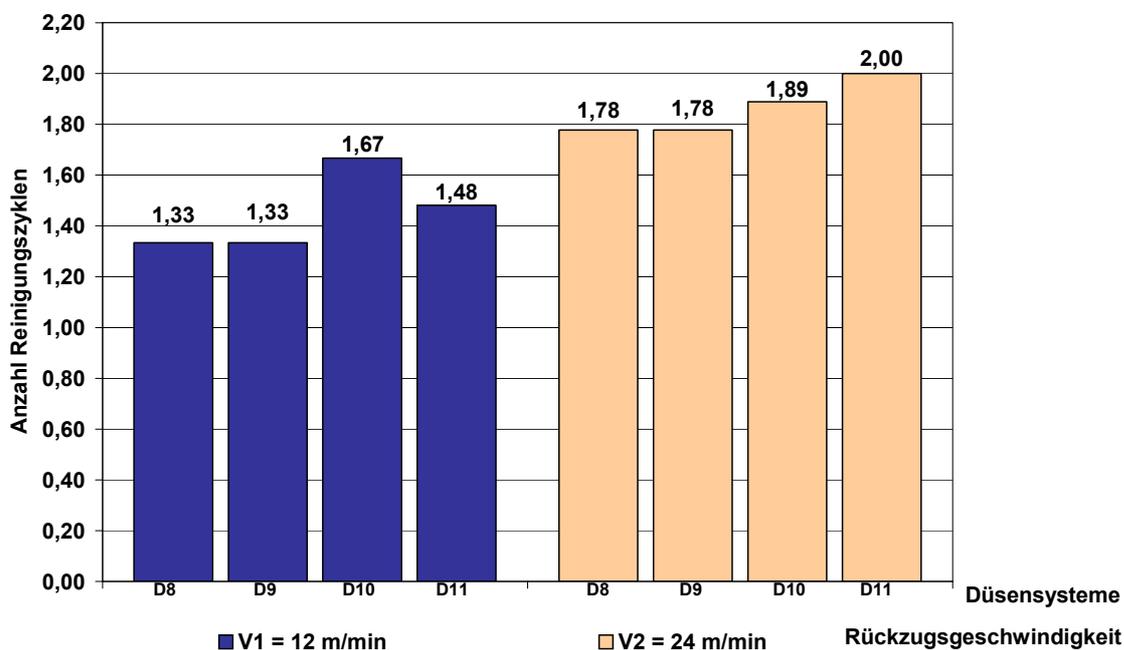


Bild 71: Anzahl der Reinigungszyklen in Abhängigkeit der Düse, DN 800, ermittelt für 15 %, 30 %, 45 % Ablagerungshöhe

Im **Gesamtblick** der verschiedenen Auswertungen für die **Teststrecke DN 800** wird deutlich, dass bei Ablagerungsgraden bis zu 15 % auch mit niedrigeren Förderströmen (ca. 240 -280 l/min) und schnelleren Düsenrückzugsgeschwindigkeiten (ca. 24 m/min) eine zuverlässige Transportleistung erzielt werden kann. Bei größeren Ablagerungen (30% bzw. 45%) waren bei einer hohen Düsen-Rückzugsgeschwindigkeit i.d.R. auch mehrere Reinigungszyklen notwendig. Allerdings zeigte sich in diesen Fällen eine Verbesserung der Transportleistung bei Erhöhung des Förderstroms, z.B. auf 320 liter/min. Mit niedrigen Rückzugsgeschwindigkeiten (12 m/min) ließen sich die Reinigungssituationen häufig in einem einzelnen, stets aber in maximal zwei Zyklen bewältigen. Auch im Kanal DN 800 zeigten die verschiedenen Düsenprodukte erkennbare Unterschiede in der Transportleistung.

4.4.4 Schlussfolgerungen für die Praxis

Mehrere Reinigungszyklen wurden im Rahmen der Tests immer dann notwendig, wenn die Düse unter den eingestellten Randbedingungen nicht in der Lage war, die aufgewirbelten Ablagerungsmengen vollständig weiter zu transportieren. Dann entsteht durch die beginnende Ablagerungsbildung ein Wasserrückstau vor der Düse, der zusätzlich die Reinigungswirkung der Hochdruckstrahlen reduziert (Bild 72). Typischerweise bildet sich dabei erneut eine Ablagerungsbank, die dann von der Düse überfahren wird und im Kanal zurückbleibt.



Bild 72: Düse an der Leistungsgrenze



Bild 73: Situation bei abgestellter Düse



Bild 74: Düse versinkt im Rückstau



Bild 75: Düse überfährt Ablagerungen

Für das Bedienpersonal am Fahrzeug war dieser Vorgang nur in Extremfällen anhand der Schlauchbewegungen bzw. des stockenden Rückzugs feststellbar, wenn sich z.B. Schlauch und Düse in den zuvor aufgewirbelten Ablagerungen festgesetzt hatten. In einigen Fällen konnte die Düse die Modellsedimente erst gar nicht überwinden und grub sich in die Ablagerungsbank ein. Erst durch erneutes Zurückziehen der Düse und deutliche Erhöhung der Pumpenleistung konnte die Ablagerung danach noch überwunden werden.



Bild 76: Düse bleibt stecken, DN 300



Bild 77: Düse bleibt stecken, DN 800

Im Rahmen der labortechnischen Versuche in den oberirdischen Versuchsstrecken war eine Erfolgskontrolle nach jedem Reinigungszyklus durch Inaugenscheinnahme möglich. Auch konnte der gesamte Reinigungsprozess beobachtet und gefilmt werden. Im Gesamtblick der verschiedenen Auswertungen für die Teststrecken DN DN 300 und DN 800 lassen sich folgende Schlussfolgerungen festhalten (vgl. auch Tabelle 26):

DN 300 (Plexiglas)

- Mit niedrigen Förderströmen (240 - 280 l/min) und schnelleren Düsenrückzugsgeschwindigkeiten (ca. 24 m/min) konnte bereits eine ausreichende Transportleistung mit einem einzelnen Reinigungszyklus erzielt werden.
- Im Hinblick auf den Feststofftransport wirken sich Leistungsunterschiede von HD-Düsen vornehmlich nur bei extremen Ablagerungsmengen und –graden aus.

DN 800 (PVC)

- Bei Ablagerungsgraden bis zu 15 % konnte auch mit niedrigeren Förderströmen (240 - 280 l/min) und schnelleren Düsenrückzugsgeschwindigkeiten (ca. 24 m/min) eine zuverlässige Transportleistung erzielt werden.
- Bei größeren Ablagerungen (30% bzw. 45%) waren bei einer hohen Düsen-Rückzugsgeschwindigkeit i.d.R. auch mehrere Reinigungszyklen notwendig. Hier zeigten die verschiedenen Düsenprodukte erkennbare Leistungsunterschiede.
- Grundsätzlich zeigte sich bei größeren Ablagerungen (30% bzw. 45%) eine Verbesserung der Transportleistung bei Erhöhung des Förderstroms, z.B. auf 320 liter/min.
- Mit niedrigen Rückzugsgeschwindigkeiten (12 m/min) ließen sich die Reinigungssituationen häufig in einem einzelnen, stets aber in maximal zwei Zyklen bewältigen.

Tabelle 26: Durchschnittlich notwendige Reinigungszyklen in labortechnischen Transportversuchen in den Teststrecken DN 300 (Plexiglas) und DN 800 (PVC)

REINIGUNGSSITUATION		DN 300		DN 800	
Ablagerungsbank, ca. 4 m lang, in einem Kunststoffrohr mit glatter Oberfläche, Füllgrad in % der Querschnittshöhe		Düsenrückzugsgeschwindigkeit [m/min]		Düsenrückzugsgeschwindigkeit [m/min]	
Füllgrad [%]	Förderstrom [l/min]	12	24	12	24
15	320	1	1	1	1
	280	1	1	1	1
	240	1	1	1	1
30	320	1	1	1,28	2,00
	280	1	1	1,33	2,00
	240	1	1	1,50	2,25
45	320	1	1	2,00	2,00
	280	1	1	2,00	2,25
	240	1	1,33	2,00	3,25
100	320	1,50	1,67	n.u.	n.u.
	280	1,50	1,83	n.u.	n.u.
	240	1,50	2,33	n.u.	n.u.

FAZIT

DN 300

- Mit niedrigen Förderströmen (240 - 280 l/min) und schnelleren Düsenrückzugsgeschwindigkeiten (ca. 24 m/min) konnte bereits eine ausreichende Transportleistung mit einem einzelnen Reinigungszyklus erzielt werden.
- Im Hinblick auf den Feststofftransport wirken sich Leistungsunterschiede von HD-Düsen vornehmlich nur bei extremen Ablagerungsmengen und –graden aus.

DN 800

- Bei Ablagerungsgraden bis zu 15 % konnte auch mit niedrigeren Förderströmen (240 - 280 l/min) und schnelleren Düsenrückzugsgeschwindigkeiten (ca. 24 m/min) eine zuverlässige Transportleistung erzielt werden.
- Bei größeren Ablagerungen (30% bzw. 45%) waren bei einer hohen Düsen-Rückzugsgeschwindigkeit i.d.R. auch mehrere Reinigungszyklen notwendig. Hier zeigten die verschiedenen Düsenprodukte erkennbare Leistungsunterschiede.
- Grundsätzlich zeigte sich bei größeren Ablagerungen (30% bzw. 45%) eine Verbesserung der Transportleistung bei Erhöhung des Förderstroms, z.B. auf 320 liter/min.
- Mit niedrigen Rückzugsgeschwindigkeiten (12 m/min) ließen sich die Reinigungssituationen häufig in einem einzelnen, stets aber in maximal zwei Zyklen bewältigen.

n.u. nicht untersucht

Als weitere Entscheidungshilfe lässt sich der Einfluss unterschiedlicher Reinigungsparameter wie Rückzugsgeschwindigkeit (schnell/langsam) und Zyklenanzahl (ein-/zweimal) anhand der in den Versuchen beobachteten Erfolgsquote einzelner Parameterkombinationen darstellen. Mit Blick auf eine zügige und wirksame Reinigung stehen dabei die folgenden Vorgehensweisen im Vordergrund:

- **1 x schnell:**
1 Reinigungszyklus, schnelle Düsen-Rückzugsgeschwindigkeit (24 m/min),
- **1 x langsam:**
1 Reinigungszyklus, langsame Düsen-Rückzugsgeschwindigkeit (12 m/min),
- **2 x schnell:**
2 Reinigungszyklen, schnelle Düsen-Rückzugsgeschwindigkeit (24 m/min),
- **2 x langsam:**
2 Reinigungszyklen, langsame Düsen-Rückzugsgeschwindigkeit (12 m/min),

Die verschiedenen Vorgehensweisen verursachen unterschiedlichen Energieaufwand hinsichtlich Spülwasser und Kraftstoffverbrauch. Wird die Teststrecke *2 x langsam* gereinigt, wird im Vergleich der Methoden die meiste Energie aufgewendet. Bei *1 x schneller* Reinigung ist der Energieaufwand am geringsten. Vergleichsweise mittleren Energieaufwand verursachen die Betriebsmethoden *1 x langsam* bzw. *2 x schnell* zu reinigen.

Mit Blick auf den Versuchskanal **DN 300** kann festgestellt werden, dass das Vorgehen *1 x schnell* bei geringen bis mittleren Ablagerungshöhen (15% und 30%) in der Versuchsstrecke i.d.R. zum Erfolg führte (vgl. Bild 78). Die Vorgehensweisen *2 x schnell* und *1 x langsam* wiesen insbesondere bei höheren Ablagerungen (45 %, 100%) bessere Reinigungsergebnisse auf. Als im Versuch absolut zuverlässig erwies sich das Vorgehen *2 x langsam*.

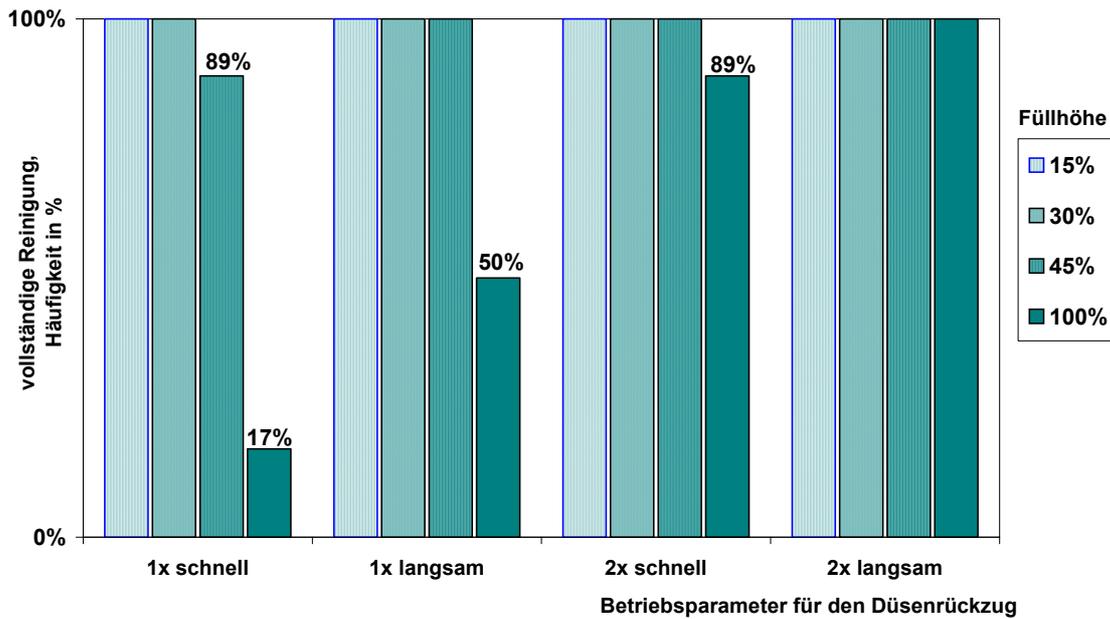


Bild 78: Erfolgsquote für eine vollständige Reinigung in Abhängigkeit der Füllhöhe der Sedimente und der gewählten Betriebsparameter für den Düsenrückzug in der Teststrecke **DN 300**

Die Versuche in der **Teststrecke DN 800** zeigten, dass die Vorgehensweise *1x schnell* dort bei einer Füllhöhe von 15 % eine zuverlässige Reinigung bietet (Bild 79). Bei höheren Füllhöhen bzw. Ablagerungsgraden von 30 und 45 % der Querschnittshöhe DN 800 war eine erfolgreiche Reinigung jedoch mit dem Vorgehen *1 x schnell* in keinem Fall möglich. Bei extremen Füllhöhen von 45 % konnte allein das Vorgehen *2 x langsam* als zuverlässig bewertet werden.

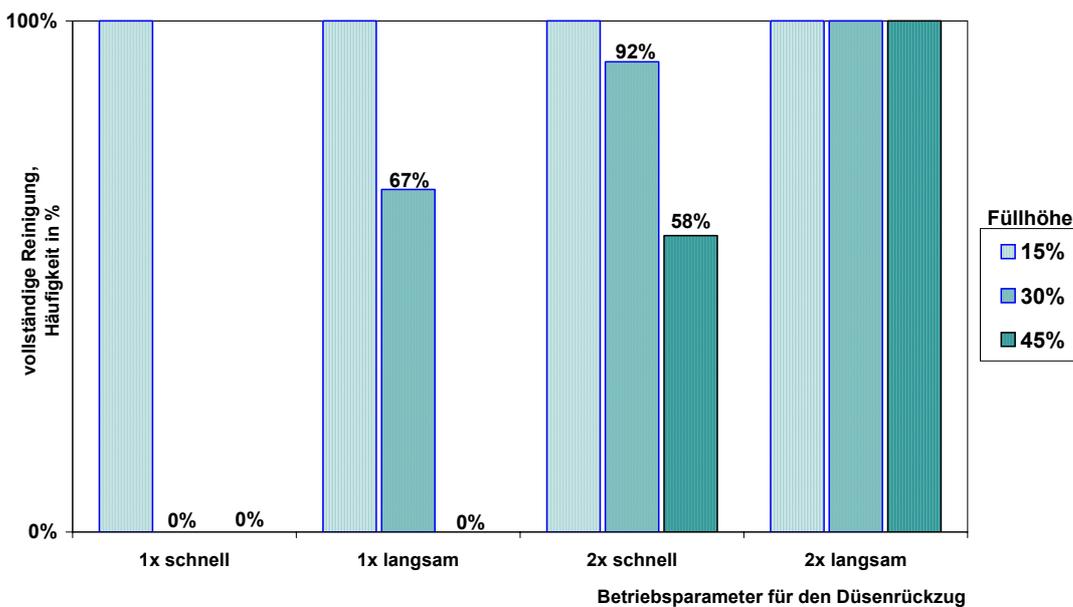
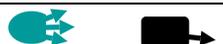


Bild 79: Erfolgsquote für eine vollständige Reinigung in Abhängigkeit der Füllhöhe der Sedimente und der gewählten Betriebsparameter für den Düsenrückzug in der Teststrecke **DN 800**

Auf der Basis der Versuchsergebnisse zur Düsenräumleistung in den Versuchsstrecken DN 300 und DN 800 und der Erfahrungen aus den im Kanalbetrieb begleiteten Reinigungseinsätzen im Nennweitenbereich DN 250 bis DN 1000 sind in Tabelle 27 Empfehlungen zur Wahl von effizienten Düsen und Betriebsparametern zusammengefasst. Diese bilden auch die Grundlage für die in Abschnitt 4.6 erarbeiteten Empfehlungen zur Auswahl und Anwendung von HD-Reinigungswerkzeugen.

Tabelle 27: Auswahl von Düsenparametern auf Basis von Praxisbeobachtungen und Transportversuchen in den Teststrecken DN 300 (Plexiglas) und DN 800 (PVC)

REINIGUNGSAUFGABE	Nennweite	DN 300	DN 800								
Vorbereitung einer Inspektion¹ mit geforderter Erfolgssicherheit und hohem Qualitätsanspruch an die Reinigung der gesamten Rohrwandung.	Energieeinsatz	 2 x langsam mit 240 l/min	 2 x langsam mit 280 l/min								
	hoch	<ul style="list-style-type: none"> ➤ Düsenabstrahlwinkel über 20° bieten hohe Lösekraft und vermindern das Risiko von Ausblasungen in Anschlussleitungen ➤ Düseneinsätze mit größerer Strahlausbreitung vermindern Streifenbildung 	<ul style="list-style-type: none"> ➤ insbesondere rotierendstrahlende Düse bearbeiten den gesamten Rohrfumfang ➤ nach großen Strahllängen ist die Lösekraft am Auftreffort jedoch stark vermindert ➤ der Einsatz von Düsenkörben bzw. -schlitten ist vorteilhaft 								
Hohes Ablagerungsaufkommen² von lockeren Ablagerungen mit einem Ablagerungsgrad von 30 % und 45 % der Querschnittshöhe in der Testsituation	Energieeinsatz	 1 x langsam mit 240 l/min	 2 x langsam mit 280 l/min								
	mittel	<ul style="list-style-type: none"> ➤ Bei extremen Ablagerungen kann die abschnittsweise Reinigung kurzer Strecken notwendig sein, um ein Festsetzen von Schlauch und Düse in den Ablagerungen zu vermeiden 	<ul style="list-style-type: none"> ➤ Bei extremen Ablagerungen kann die abschnittsweise Reinigung kurzer Strecken notwendig sein, um ein Festsetzen von Schlauch und Düse in den Ablagerungen zuverlässig zu vermeiden 								
Geringes Ablagerungsaufkommen² von lockeren Ablagerungen mit einem Ablagerungsgrad von 15 % der Querschnittshöhe in der Testsituation	Energieeinsatz	 1 x schnell mit 240 l/min	 1 x schnell mit 240 l/min								
	gering	<ul style="list-style-type: none"> ➤ flache Düsenabstrahlwinkel < 20° erhöhen die Zugleistung bspw. zur Reinigung längerer Strecken in einem Zyklus, allerdings steigt dadurch auch das Risiko von Ausblasungen in Anschlussleitungen 	<ul style="list-style-type: none"> ➤ flache Düsenabstrahlwinkel < 20° erhöhen die Zugleistung bspw. zur Reinigung längerer Strecken in einem Zyklus, allerdings steigt dadurch auch das Risiko von Ausblasungen in Anschlussleitungen 								
Anmerkungen: Grundsätzlich sollte der freie Durchfluss der Düseneinsätze gewährleistet sein 1 Empfehlungen auf der Grundlage der in Kanalbetrieben begleiteten Reinigungseinsätze im Nennweitenbereich DN 250 bis DN 1000 (vgl. Abschnitt 3.3) 2 Empfehlungen auf der Grundlage der Laborversuche in den IKT-Prüfstrecken DN 300 und DN 800 (vgl. Abschnitt 4.4)											
ERLÄUTERUNG ZU DEN HD-DÜSEN											
Wesentlicher Wirkungsbereich der Düse  gesamte Rohrwandung  Rohrsohle		<table border="1"> <tr> <td>Symbol</td> <td></td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td>Bezeichnung</td> <td>rundumstrahlende Düse</td> <td>rotierendstrahlende Düse</td> <td>flachstrahlende Düse</td> </tr> </table>	Symbol				Bezeichnung	rundumstrahlende Düse	rotierendstrahlende Düse	flachstrahlende Düse	
Symbol											
Bezeichnung	rundumstrahlende Düse	rotierendstrahlende Düse	flachstrahlende Düse								

4.5 Lösen

Bevor verfestigte Ablagerungen transportiert und aus dem Kanal geräumt werden, müssen sie zunächst von der Rohrwandung gelöst werden. In der Betriebspraxis der Unterhaltungereinigung - zur Verbesserung der hydraulischen Kanaleigenschaften - stellt das Lösen von Ablagerungen jedoch vergleichsweise selten ein Problem dar (vgl. Abschnitt 3.5). Starke Verfestigungen und hartnäckige Inkrustationen sind eher die Ausnahme und dabei oft Ursache einzelner Fehleinleitungen, z.B. aus Abscheideanlagen oder Baustellenrückständen. Dann haften sie häufig so hartnäckig an der Rohrwandung, dass seltener HD-Düsen, sondern bevorzugt an die Einzelfallsituation angepasste Spezialwerkzeuge, wie bspw. Kettenschleudern oder Kanalfräsen, angewendet werden. Die Lösewirksamkeit von Düsen wird häufig dann diskutiert, wenn die gesamte Rohrwandung vorbereitend für eine Inspektions- oder Sanierungsmaßnahme **komplett** zu reinigen ist. In diesem Fall bestimmen die für die jeweilige Düse charakteristischen Hochdruck-Wasserstrahleigenschaften in Verbindung mit den angewendeten Betriebsparametern (Druck, Durchfluss und Geschwindigkeit der Düse) wesentlich den Reinigungserfolg.

Die Lösewirksamkeit von HD-Strahlen wurde in drei Schritten untersucht (Tabelle 28). Im ersten Untersuchungsschritt wurden in den Kanalbetrieben zahlreiche Reinigungseinsätze in verschiedenen Netzsituationen mit Blick auf die geometrischen Strahleigenschaften und deren Wirkung begleitet. Im zweiten Schritt wurde ein messtechnisches Programm zur Ermittlung der Druckverteilung von HD-Strahlen auf einer Oberfläche entwickelt, dessen Ergebnisse im Rahmen des dritten Untersuchungsschrittes anhand von Versuchen mit Modellablagerungen verifiziert wurden. Damit wurden Bewertungsgrundlagen erarbeitet, um die Lösewirkung bzw. Aggressivität von HD-Strahlen messtechnisch zu bewerten. Dabei ist in der Betriebspraxis grundsätzlich zu beachten, dass die Lösewirksamkeit von HD-Strahlen begrenzt sein sollte. **Die Reinigungsarbeiten dürfen nicht zu Beschädigungen an der intakten Netzsubstanz führen.** Vor diesem Hintergrund sind die Strahleigenschaften immer auch hinsichtlich einer Gefährdung des Rohrmaterials durch übermäßig aggressive HD-Strahlen zu bewerten. Die Untersuchungsergebnisse dienen daher auch als Grundlage zur Düsenauswahl im Rahmen der in Abschnitt 5 dargestellten Untersuchungen zur Rohrbeanspruchung.

Tabelle 28: Untersuchungsaufgaben zur „Lösewirksamkeit von HD-Strahlen“

	Untersuchungsschritt	Untersuchungsziel
1	Geometrische Strahleigenschaften	Aufnahme von Praxisproblemen und Handhabbarkeit bestehender Düsensysteme. Erfassung der geometrischen Strahleigenschaften.
2	Strahldruck am Auftreffort	Bewertung der Aggressivität von HD-Strahlen auf der Grundlage von Messungen, z.B. Auftrefffläche des Strahls, Anstellwinkel zur bestrahlten Fläche, Strahldruckverteilung und örtlicher Spitzendruck.
3	Abbildung der Lösewirkung im Material	Verifizierung der gewonnenen Aussagen anhand von praktischen Belastungsversuchen durch HD-Strahlen auf Modellsedimenten.

4.5.1 Geometrische Strahleigenschaften

Im Rahmen der In-situ-Untersuchungen traten deutliche Leistungsunterschiede bei den Düsensystemen auf, insbesondere reichte die Aufprallenergie des Spülstrahls und die Spülstrahlbreite häufig nicht aus, um die gesamte Rohrwandung zu reinigen. Im Rahmen der bei 6 Kanalbetrieben begleiteten Reinigungseinsätze (vgl. Abschnitt 4.3) konnte dies bereits bei kleineren Kanälen ab einer Nennweite DN 300 bei vergleichsweise leicht lösbaren Anhaftungen wie der Sielhaut nachgewiesen werden (vgl. Bild 80).

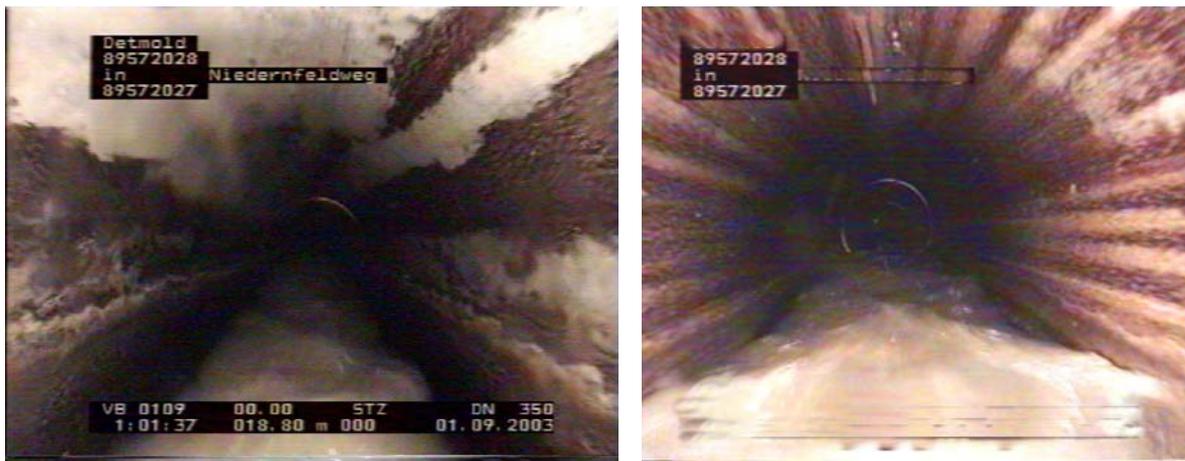


Bild 80: Sielhaut-Reste nach einer HD-Reinigung, Bildbeispiele aus In-situ-Tests

In einzelnen Fällen wurden gestörte HD-Strahlen beobachtet, die ebenfalls unzureichende Reinigungsergebnisse zur Folge hatten. Die Störungen im Strahlbild bzw. auch unsymmetrische Strahlbilder können dabei durch Verstopfung einzelner Düseneinsätze (vgl. Bild 81) oder auch durch eine falsche Bestückung mit Düseneinsätzen verursacht werden, wenn z.B. Düseneinsätze nicht entsprechend der Herstellerempfehlung ausgewählt werden und unplanmäßig unterschiedliche Durchmesser aufweisen.



Bild 81: Verstopfter Düseneinsatz (links), Düse mit unsymmetrischem Strahlbild (rechts)

Vor diesem Hintergrund wurde das Strahlbild rundumstrahlender Düsen näher erfasst. In einem ersten Schritt wurden die Düsen an einem Kragarm befestigt, so dass die HD-Strahlen in allen Richtungen ungehindert austreten konnten. Dabei zeigten die Düsensysteme sehr unterschiedliche Strahlbilder. Wesentliches Merkmal ist dabei der Strahlausbreitungswinkel. Bei annähernd gleichen Reinigungsparametern (Durchfluss und Druck in der Düse) wurden sowohl sehr kompakte und gebündelte Strahlen als auch weit auffächernde Strahlen beobachtet. Die charakteristische Ausbildung des Einzelstrahls ist maßgeblich von der Wasserführung am Düsenaustritt bzw. von der Geometrie des Düseneinsatzes abhängig.



Bild 82: Vergleichende Betrachtung der Strahleigenschaften von HD-Düsen, Beispiele: aufgefächerte Einzelstrahlen (links), kompakte Einzelstrahlen (rechts)

In weitergehenden Versuchen wurden die Wechselwirkungen zwischen den Strahleigenschaften und der Rohrgeometrie erfasst. Durch Fotodokumentation der HD-Strahlen in einem durchsichtigen Plexiglasrohr wurden bspw. die Strahlaufweitungswinkel und die Strahllängen bis zum Auftreff-Ort im Bereich von Sohle, Kämpfer und Scheitel vermessen (vgl. Bild 83).



Bild 83: Fotografische Erfassung des Strahlbildes

Die optische Vermessung der Strahlausbreitungswinkel machte bereits große Unterschiede zwischen den Düsen deutlich. Bild 84 zeigt beispielhaft die Vermessung des Strahlaufweitungswinkels. Die dargestellten Düsen wurden mit gleichen Reinigungsparametern (120 bar Düsendruck und 320 l/min Durchfluss) betrieben. Jedoch ist die linke Düse (D1) 8-strahlig mit 40 l/min Durchfluss je Einzelstrahl und die rechte Düse (D2) 10-strahlig mit einem Einzelstrahl-Durchfluss von 32 l/min. Im Ergebnis erzeugt die linke Düse D1 einen Strahl dessen Ausbreitungswinkel mit 18° deutlich größer ist als bei der rechten Düse D2 mit 7°. Dementsprechend ist dann auch die Wirkfläche am Auftreff-Ort deutlich größer.

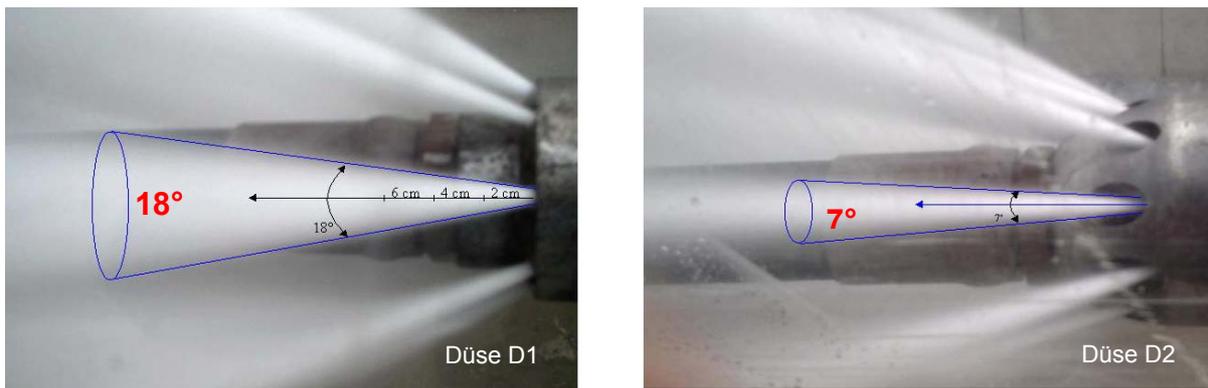


Bild 84: Strahlausbreitungswinkel von zwei Düsen bei gleichem Druck (120 bar) und Gesamt-Durchfluss (320 liter/min)

Grundsätzlich stellt sich die Frage, welchen Einfluss das jeweilige Strahlbild auf die Lösekraft bzw. Aggressivität des HD-Strahls hat. Um die Wirkung von HD-Strahlen am Auftreff-Ort weitergehend zu untersuchen, wurden ein entsprechendes Messprogramm entwickelt und die Strahlbilder von drei Düsen detailliert untersucht. Bei der Auswahl der Düsen wurden möglichst unterschiedliche Strahlwinkel und Strahldurchflüsse berücksichtigt (vgl. Bild 85).

<p>Düse D1</p> <ul style="list-style-type: none"> ➤ 1 ¼ Zoll Anschluss ➤ 30° Strahlwinkel ➤ 8 Düseneinsätze 			
<p>Düse D2</p> <ul style="list-style-type: none"> ➤ 1 ¼ Zoll Anschluss ➤ 30° Strahlwinkel ➤ 10 Düseneinsätze 			
<p>Düse D12</p> <ul style="list-style-type: none"> ➤ 1 ¼ Zoll Anschluss ➤ 10° Strahlwinkel ➤ 6 Düseneinsätze 			

Bild 85: Übersicht zu den untersuchten Düsen, Lösewirkung

4.5.2 Messungen am Wirkungsort der HD-Strahlen

4.5.2.1 Messkonzept

Ziel der Versuche war es, die charakteristische Druckverteilung von HD-Strahlen auf einer bestrahlten Oberfläche messen zu können. Dazu wurde jeweils ein einzelner Strahl einer mehrstrahligen Düse auf eine Druckmessfolie geleitet. Druckmessfolien reagieren empfindlich auf Druckbelastungen und wandeln diese Beanspruchung in messtechnisch erfassbare elektrische Signale um. Zur Durchführung systematischer Messungen wurde ein Düsen-Versuchsstand mit einem Montagetisch als Auflager für eine starre Prallwand eingerichtet (vgl. Bild 86). Darüber hinaus musste die jeweils getestete Düse so ausgerichtet und fixiert werden können, dass ein einzelner HD-Strahl mittig auf die Prallwand trifft. Dies wurde mit Hilfe einer freitragenden Stahlstange, an der eine Halterung zur Düsen-Fixierung angebracht wurde, realisiert. So konnte die Strahldruckverteilung innerhalb der Strahlaufftrefffläche für die verschiedenen Düsensysteme messtechnisch erfasst werden (vgl. Bild 88).

Darüber hinaus kann aus der Integration der gemessenen Druckwerte über die bestrahlte Sensorfläche eine resultierende Strahlkraft auf die Prallwand errechnet werden. Durch eine parallele Messung der Strahlkraft über eine Kraftmessdose war es möglich, die Druckfolienmessungen auf Plausibilität zu überprüfen. Mit Hilfe eines Stahlrahmens auf einem linearen Rollenlager wurde die Strahlkraft reibungs- und torsionsarm auf die Kraftmessdose übertragen (vgl. Bild 89). Die Kraftmessdose wurde auf einen Messbereich von 10 bis 100 N kalibriert. Nach jedem Versuch wurde die Kraftmessdose mit einer Federwaage auf grobe Messabweichungen kontrolliert.



Bild 86: Düsen-Versuchsstand zur Ermittlung der Lösewirksamkeit von HD-Strahlen



Bild 87: Druckmessfolie

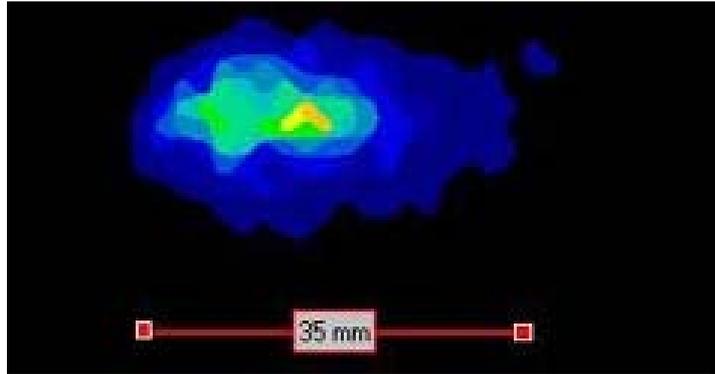


Bild 88: Darstellung der Strahldruckverteilung



Bild 89: Stahlrahmen auf Rollenlager

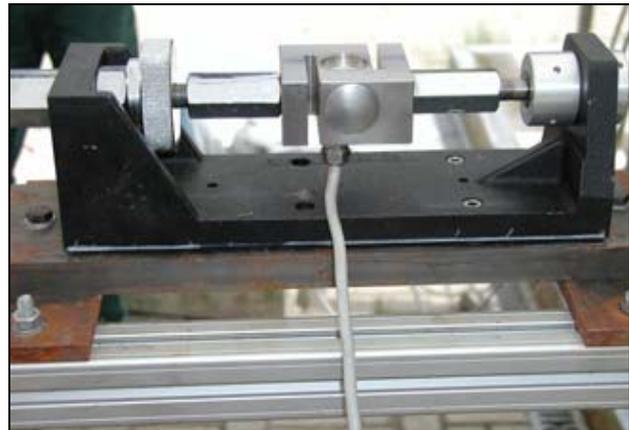


Bild 90: Kraftmessdose

Bild 91 stellt den Versuchsstand zur Erläuterung als Prinzipskizze dar.

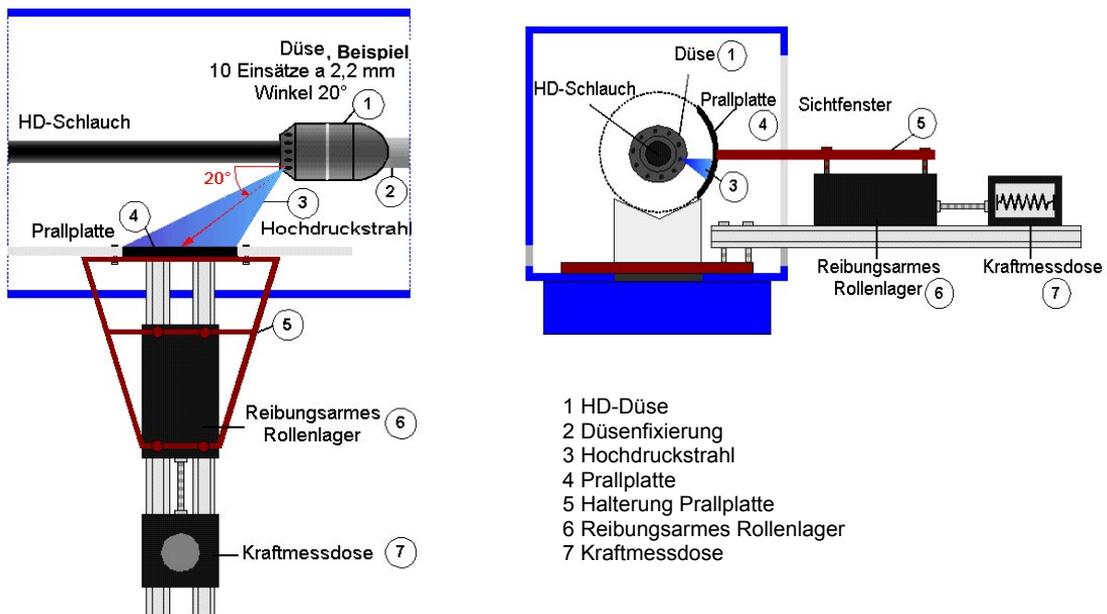


Bild 91: Prinzipskizze der Versuchseinrichtung zur Messung der Strahlkraft

Neben der Düsengeometrie bestimmen die Betriebsparameter Durchfluss und Druck an der Düse entscheidend die Strahlkraft und Druckverteilung. Um diese Parameter während der Versuche kontinuierlich aufnehmen zu können, wurde die in Bild 92 dargestellte Messtechnik vor dem Düsen-Versuchsstand eingerichtet. So konnten charakteristische Düsenkennlinien für den Durchfluss und Druck vor der Düse ermittelt werden.

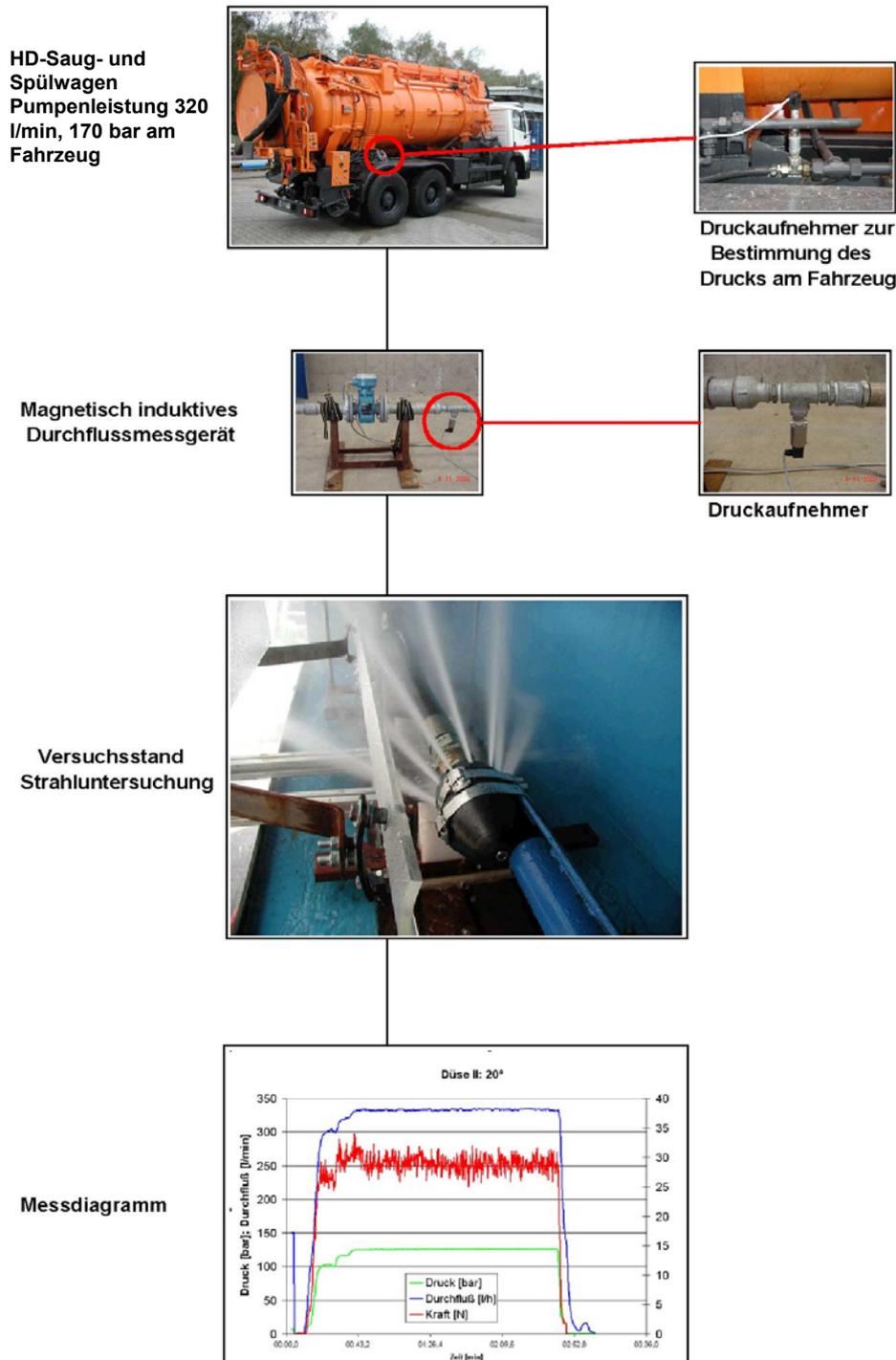


Bild 92: Versuchsaufbau mit Darstellung der einzelnen Messstellen und des Messergebnisses

Die Betriebsparameter Druck und Durchfluss werden in der Reinigungspraxis wesentlich durch die Wahl des Durchmessers der Düseneinsätze bestimmt. Vor diesem Hintergrund wurden Strahlkraftmessungen mit unterschiedlichen Durchmessern von Düseneinsätzen bei sonst gleichen Randbedingungen (Düse, Motorleistung, Schlauch etc.) durchgeführt. Erwartungsgemäß sinkt die Strahlkraft bei zu groß oder zu klein gewählten Düseneinsatz-Durchmessern. D.h. es gibt in Abhängigkeit der Pumpenleistung, Schlaucheigenschaften (Werkstoff, Länge, Nennweite) sowie Düsengeometrie (Strahlanzahl, Wasserführung) einen optimalen Düseneinsatz-Durchmesser, bei dem die Strahlkraft am größten ist (vgl. [57]). Tendenziell wurde allerdings mit der Kraftmessdose eine niedrigere Strahlkraft gemessen, als nach theoretischen Berechnungen zu erwarten war. Die Ursache hierfür war anschaulich deutlich erkennbar. Die HD-Wasserstrahlen erzeugten einen starken Luftsoog der ebenfalls auf die Prallwand wirkte. Im Extremfall war der Unterdruck vor der Prallwand so groß, dass anstatt der erwarteten Druckkräfte sogar entgegengesetzte Zugkräfte mittels Kraftmessdose gemessen wurden. Dies trat insbesondere bei Düsen mit kleinem (flachen) Abstrahlwinkel auf.

Untersuchungen nach [58] zur Ejektorwirkung von HD-Düsen im Zusammenhang mit Ausblasungen von Geruchsverschlüssen bestätigen dies ebenfalls. Danach bewirken Düsen mit größerem Strahlwinkel einen geringeren Luftvolumenstrom in der Abwasserleitung als flachstrahlende Düsen. Das Risiko o.a. Störungen kann in Kanälen, bei denen das Problem aus vorherigen Einsätzen bekannt ist, durch den Einsatz von Düsen mit größeren Strahlwinkeln evtl. bereits gemindert werden. Um den Einfluss der Luftströmung im Rahmen der Versuche zu minimieren, wurden die Fläche der Prallwand auf ein Mindestmaß reduziert und die Spritzschutzwände des Versuchsstandes zur besseren Luftzufuhr z.T. abgebaut.

4.5.2.2 Interpretation und Auswertung der Messwerte

Nach [59] zerfällt der HD-Wasserstrahl unmittelbar nach dem Austritt aus der Düse in einzelne stark beschleunigte Tröpfchen. D.h. die Drucksensoren der Messfolien werden demnach nicht kontinuierlich durch einen geschlossenen Strahl, sondern durch impulsartige Belastungen einzelner Tropfenschläge belastet (vgl. Bild 93). Grundsätzlich ist es daher denkbar, dass ein Drucksensor nicht vollständige Druckimpulse, sondern auch anschwellende oder abschwelende Impulse erfasst, die auf einen noch vorhandenen Wasserfilm aus vorhergehenden Tröpfchen treffen. Die Anschauung des HD-Strahls zeigt auch, dass sich das Strahlbild stets ein wenig verändert. Ursache können bspw. ständig wechselnde Luftwiderstände (Turbulenzen) sein, die durch den Strahlprozess selbst beeinflusst werden und immer wieder neu und unregelmäßig wirken.

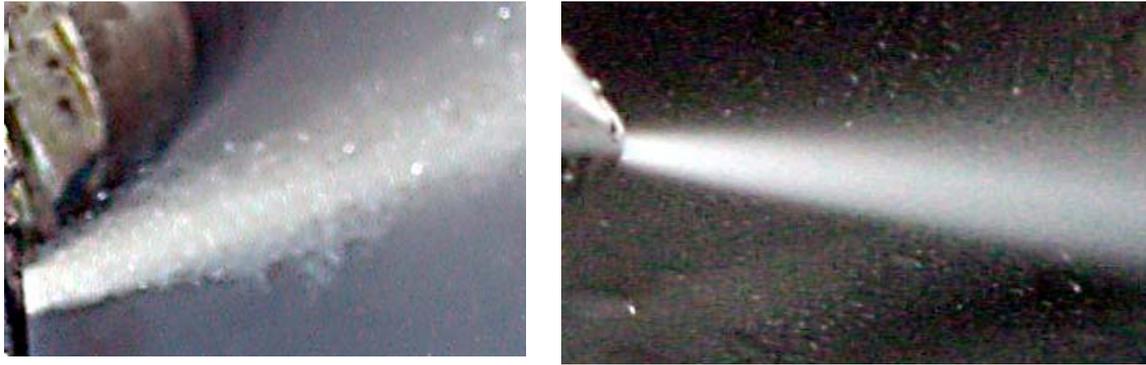


Bild 93: Strahlbild, Beispiele

Auch pulsiert bereits im Düsenkörper der Wasserdruck möglicherweise infolge des wechselnden Pumpenhubs in Abhängigkeit der Motordrehzahl (max. ca. 1.600 U/min). Hinweise hierzu gibt die Überlagerung von zwei Messkurven die mit unterschiedlichen Messmitteln aufgenommen wurden (vgl. Bild 94). Zum einen wurde die Strahlfläche mit Druckmessfolien bestimmt und zum anderen wurde der Düsendruck (gestrichelt dargestellt) mit einem digitalen Druckmanometer gemessen. Die Frequenz der Messkurven ist tendenziell sehr ähnlich.

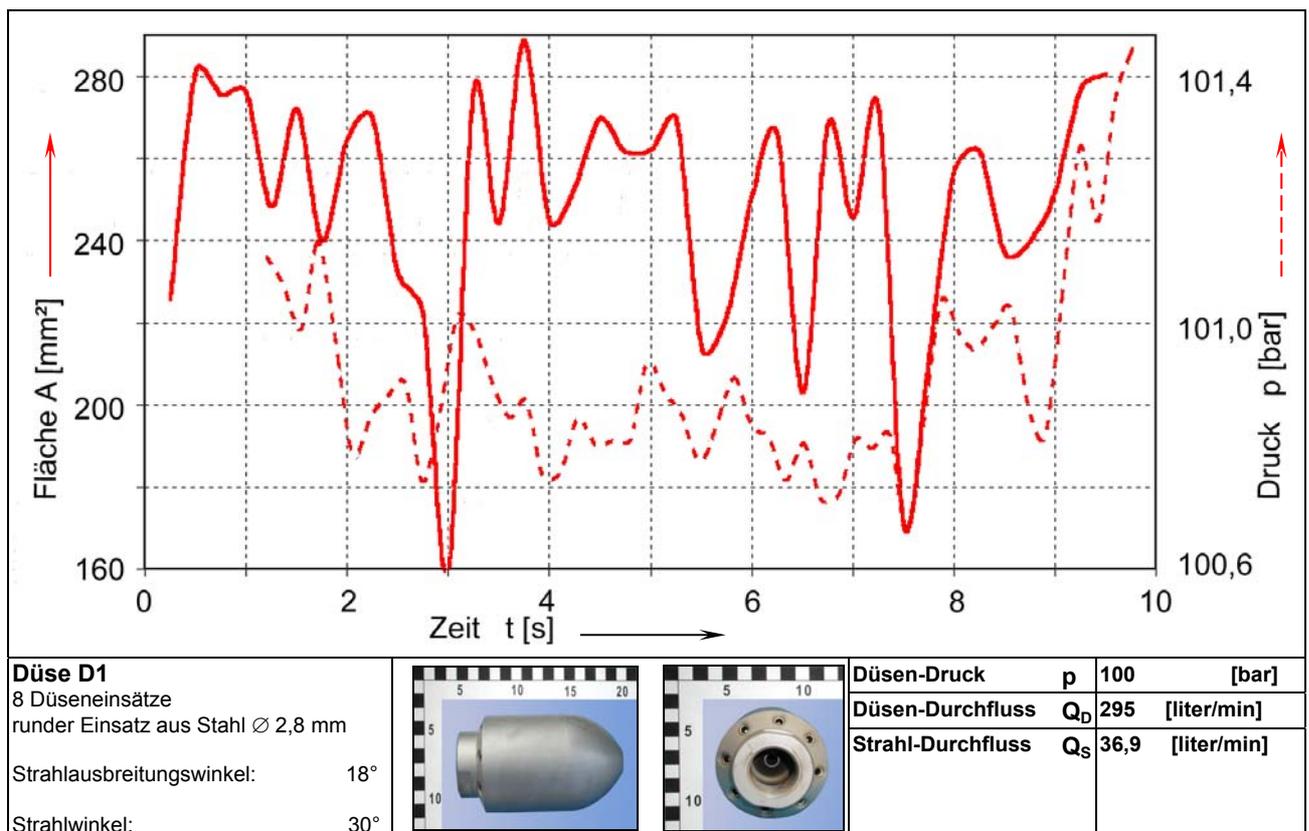


Bild 94: Überlagerung der Messkurven: Strahlfläche mit Druckmessfolie gemessen, Düsendruck mit digitalem Druckmanometer aufgezeichnet (rot gestrichelt)

Darüber hinaus ist es denkbar, dass der Zerfall des freiwerdenden HD-Strahls in Wassertröpfchen ebenfalls ein unregelmäßiger Prozess ist. Vor dem Hintergrund der o.a. Ausgangssituation ist die Erfassung der unregelmäßigen Druckimpulse aus den aufschlagenden Wassertropfen messtechnisch anspruchsvoll. Im Rahmen der Versuche wurden Druckmessfolien (vgl. Bild 87) verwendet, auf denen Drucksensoren in Form von Reihen und Spalten angeordnet sind. Die einzelnen Sensoren werden seriell, Sensor für Sensor, abgefragt. Die verwendeten Folien verfügen über Druckmesszellen in einer Matrix von 44 Reihen x 44 Spalten mit einer druckempfindlichen Fläche von je 3,63 mm² im Abstand von 1,9 mm. Nach 44 x 44 Messungen wird der komplette Durchlauf in einer Aufnahme bzw. einem „Frame“ abgespeichert (vgl. Bild 95). Dabei können bis zu 100 Frames in einer einzelnen Sekunde erfasst werden. Mit der Folge, dass in kurzer Messzeit bereits immense Datenmengen entstehen.

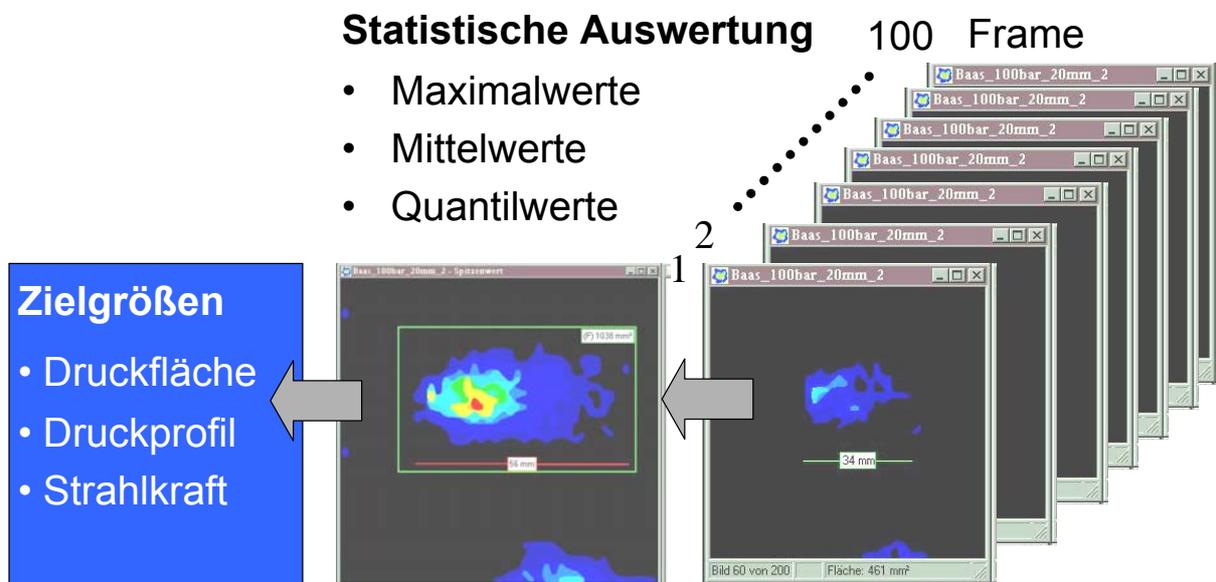


Bild 95: Statistische Auswertung von 100 Frames zu einem Druckbild

In einem ersten Schritt waren daher orientierende Vorversuche zur Festlegung einer geeigneten Frequenz für die serielle Abtastung der Drucksensoren und der Zeitdauer der Gesamtmessung notwendig. Dabei wurde empirisch die benötigte Anzahl von Messwerten (Frames) ermittelt, nach deren Auswertung kaum noch gravierende Änderungen am Druckbild auftraten und eine gute quantitative Abstufung erreicht wurde. Im Ergebnis konnten weitgehend reproduzierbare Druckbilder mit einer Abtastrate von ca. 20 Hz bzw. 5×10^{-2} Sekunden auf einer Zeitdauer von 10 Sekunden erzielt werden. Dabei wird die bestrahlte Fläche im Bereich der 44 x 44 Drucksensoren ca. 100 mal abgetastet. Die Auswertung der Messdaten ergibt dann bereits ein typisches Druckbild für den HD-Strahl. Eine längere Messwertaufnahme mit noch größeren Datenmengen verändert die Ergebnisse nur noch geringfügig.

Trotz dieser hohen Abtastrate darf bei der Interpretation der Messergebnisse die zeitdiskrete Erfassung der Messwerte nicht außer Acht gelassen werden, insbesondere bei der Betrachtung der visualisierten Druckbilder, die eine gleichzeitige Erfassung der Messdaten suggerieren. Tatsächlich können zwischen den gemeinsam dargestellten Bildpunkten jedoch Zeitunterschiede von bis zu 10 Sekunden liegen.

Wesentliches Auswertungsziel der Druckfolienmessungen war die Erarbeitung von Kriterien zur Kennzeichnung der Strahl-Aggressivität verschiedener Düsensysteme; und zwar auf der Basis typischer Druckbilder, die von den HD-Strahlen auf einer Oberfläche erzeugt werden. Die Voruntersuchungen zeigten, dass in dem charakteristischen Druckprofil über der Auftreff-Fläche i.d.R. ein Strahlkern mit einer ausgeprägten Druckspitze gemessen wird. Die Druckfolienmessungen wurden daher nach den folgenden Zielgrößen ausgewertet:

- Auftreff-Fläche des HD-Strahls
- Druckwerte in sämtlichen Flächenzellen (einschließlich der Druckspitze)
- Strahlkraft (durch Integration der Druckwerte über die Fläche)

Die Interpretation der vergleichsweise kleinflächigen Druckspitze ist unsicher, da hier lediglich kleine Teilmengen aus den Messdaten betrachtet werden können. Doch ist zu vermuten, dass insbesondere dieser Strahlkern bzw. der Spitzendruck zur Kennzeichnung der spezifischen Aggressivität von Düsen von Bedeutung ist. Vor diesem Hintergrund wurden die Messdaten mit verschiedenen (statistischen) Methoden ausgewertet (vgl. Tabelle 29). Im ersten Schritt wurden für jede der 44x44 Zellen die Mittelwerte, Maximalwerte und Fraktilwerte (90 %) aus den 100 Frames berechnet und in einem Druckbild dargestellt. Um den Einfluss von punktuell auftretenden zufälligen Schwankungen durch Mess-Störungen abzumindern, wurden darüber hinaus statistische Glättungsverfahren angewendet. Zur Elimination von „Ausreißern“ wird dabei jeder Wert in Abhängigkeit seiner Umgebungswerte nach einem festgelegten Algorithmus angepaßt. Nach einem Vergleich der Auswertungsmethoden wurde ein Modus zur Auswertung des Gesamtprogramms festgelegt.

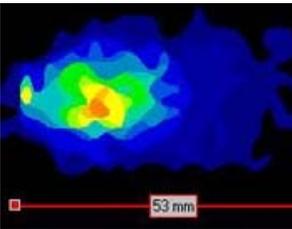
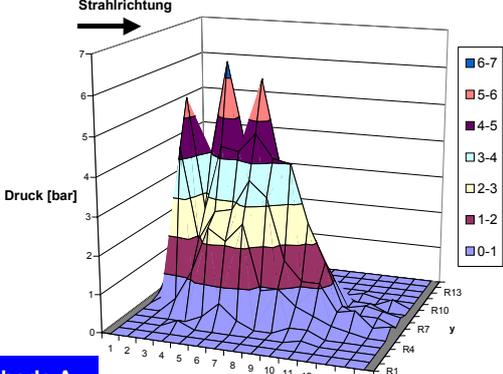
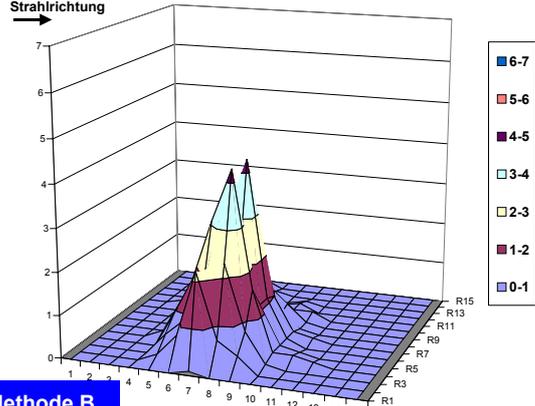
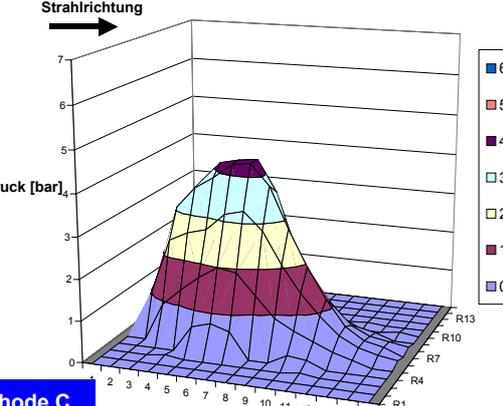
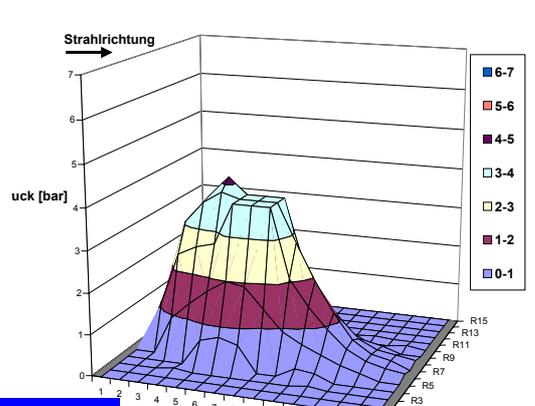
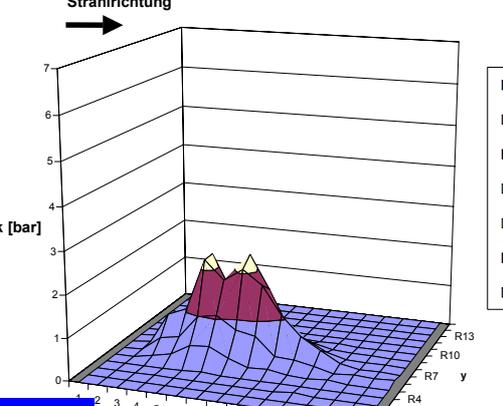
Tabelle 29: Statistische Auswertung der Messwerte zur Darstellung im Druckbild

	Methode	im Druckbild dargestellte Werte
A	Maximalwerte	Maximaler Druckwert je Zelle aus 100 Frames ausgezählt
B	Quantilwerte	90%-Quantilwerte je Zelle aus 100 Frames bestimmt
C	Maximalwerte, Glättung I*	Maximalwert je Zelle unter Berücksichtigung von 8 Umgebungswerten geglättet* (die Software bereinigt damit übliche Messfehler)
D	Maximalwerte, Glättung II*	Glättung der Maximalwerte wie unter (3), jedoch wurde darüber hinaus die Druckspitze mit den unmittelbaren Umgebungswerten gemittelt*
E	Mittelwerte	Mittelwert je Zelle aus 100 Frames gemittelt

* Nutzung der für die Messaufgabe vorgesehenen Auswertungssoftware „TekScan“ des Messmittel-Anbieters CMV

In Tabelle 30 ist ein Auswertungsbeispiel für die Düse D2 bei einem Düsendruck von 100 bar und einem Strahlabstand von 18,5 mm dargestellt. Das Druckprofil zeigt einen Strahlkern mit deutlich höheren Druckwerten als in dem umgebenden Randbereich. In dem Strahlkern zeigt sich eine ausgeprägte Druckspitze, im folgendem „Spitzendruck“ genannt.

Tabelle 30: Druckprofil-Darstellung nach unterschiedlichen Auswertungsmethoden

 <p>Düse D2 12 Düseneinsätze Ø 2,2 mm runder Einsatz aus Stahl</p>  <p>Parameter 100 bar Düsens-Druck 300 liter/min Vol.-Strom 25 liter/min Strahl-Durchfluss 18,5 mm Strahlabstand</p> <p>Bild 96: Strahldruckfläche (348 mm²)</p>	 <p>Methode A</p> <p>Bild 97: Druckbild, Beispiel für Auswertung nach Maximalwerten</p>
 <p>Methode B</p> <p>Bild 98: Druckbild, Beispiel für Auswertung nach Quantilwerten 90%</p>	 <p>Methode C</p> <p>Bild 99: Druckbild, Beispiel für Auswertung nach Maximalwerten mit Glättungsfunktion</p>
 <p>Methode D</p> <p>Bild 100: Druckbild, geglättete Maximalwerte - Druckspitze mit Umgebung gemittelt (3x3 Werte)</p>	 <p>Methode E</p> <p>Bild 101: Druckbild, Beispiel für Auswertung nach Mittelwerten</p>

Im Vergleich zeigt die Darstellung der Maximalwerte (*Methode A*) gegenüber den Mittelwerten (*Methode E*) einen deutlich höheren Spitzendruck und ein wesentlich kompakteres Druckbild. Die gravierenden Unterschiede weisen auf die große Schwankungsbreite der gemessenen Druckwerte hin. So ist der Maximalwert des Spitzendruckes mit 6,4 bar ca. 3 mal so hoch wie sein Mittelwert mit ca. 2,2 bar. Die Auswertung nach den Maximalwerten mit einem Glättungsalgorithmus (*Methode C und D*) ergibt für den Spitzendruck 4,3 bar bzw. 3,7 bar, d.h. der gemessene Maximalwert von 6,4 bar wird deutlich um mehr als ein Drittel reduziert. Das Druckprofil bleibt insgesamt jedoch vergleichsweise kompakt bzw. wird nur unwesentlich schlanker als die Darstellung der Maximalwerte. Auch die Auswertung der 90 %-Quantilwerte (*Methode B*) ergibt einen Spitzendruck von ca. 4,3 bar. Hier fällt das Druckprofil jedoch ähnlich wie bei der Darstellung der Mittelwerte sehr schlank aus.

Im Gesamtblick der verschiedenen Darstellungen zeigt sich, dass es notwendig ist, die Messwerte durch ein statistisches Verfahren abzusichern. Dies zeigt sich insbesondere an dem Spitzendruck. Vereinzelt auftretende Maximalwerte, die in einem Bruchteil einer Sekunde gemessen wurden, sind wenig repräsentativ, um sie als charakteristisches Merkmal zur Kennzeichnung der Düseneigenschaften nutzen zu können. Bild 102 zeigt anschaulich wie der absolute Maximalwert von 6,4 bar durch verschiedene Auswertungsmethoden beträchtlich abgemindert wird.

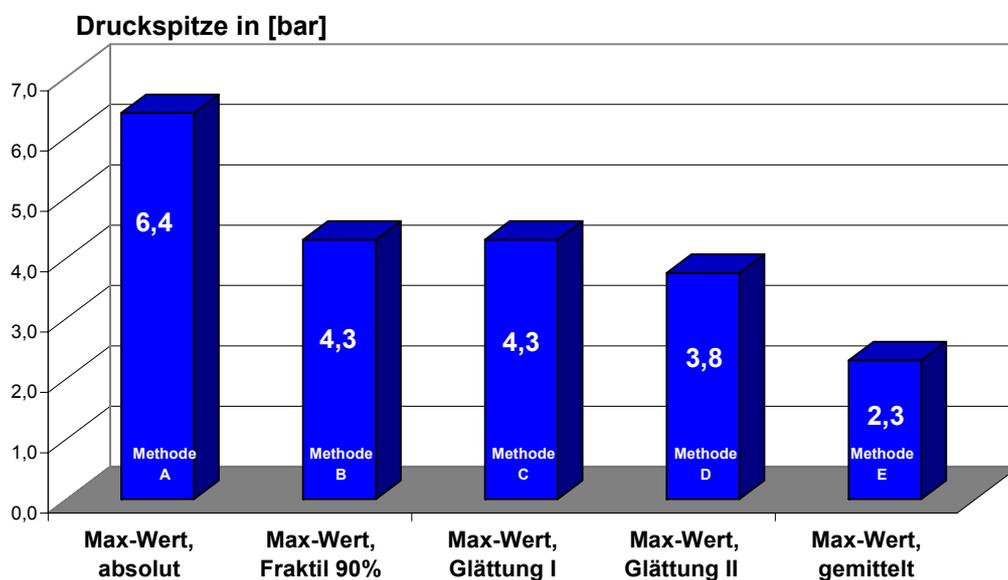


Bild 102: Druckspitzenwerte in Abhängigkeit der Auswertungsmethode, Beispiel für Düse D2 bei 100 bar Düsendruck, 25 l/min Strahldurchfluss und 18,5 mm Strahlabstand

Darüber hinaus zeigte sich, dass sich das Druckprofil je nach Auswertungsmethode mehr oder weniger „kompakt“ bzw. „schlank“ darstellt. Dies wird besonders bei der Betrachtung der resultierenden Strahlkraft, die durch Integration der Druckwerte über die Auftreff-Fläche bestimmt werden kann, deutlich (vgl. Bild 103). Im Beispiel errechnet sich die resultierende Strahlkraft auf Basis der Mittelwerte zu 11,9 Newton.

Im Vergleich dazu ergibt sich auf Basis der Maximalwerte eine über viermal so hohe Kraftresultierende von 47,7 Newton. Mit 46,0 Newton ähnlich hoch ist die errechnete Kraftresultierende nach Anwendung der Glättungsfunktionen. Demgegenüber führt die Auswertung nach den 90 %-Quantilwerten, wie die Anschauung in Tabelle 30 bereits vermuten ließ, zu einer deutlich niedrigeren Kraftresultierenden von 22,6 Newton.

Bemerkenswert ist der Vergleich der o.a. berechneten Werte aus der Druckfolienmessung mit den parallel über eine Druckmessdose gemessenen Werten (vgl. Bild 90). Diese Messung über ein zweites, unabhängiges Messsystem diene als Plausibilitätskontrolle für die Auswertung und Interpretation der Ergebnisse aus den Druckfolienmessungen. Dabei wurde mit 42,7 Newton eine resultierende Strahlkraft gemessen, die nahe an die resultierende Kraft aus den Maximalwerten der Druckfolienmessung heranreicht (vgl. Bild 103). Aufgrund des beschriebenen Einflusses der Luftströmung bzw. Ejektorwirkung und der Reibungsverluste bei der Kraftübertragung sind die mit der Druckmessdose gemessenen Werte grundsätzlich niedriger als die tatsächliche Strahlkraft unmittelbar auf die Prallwand.

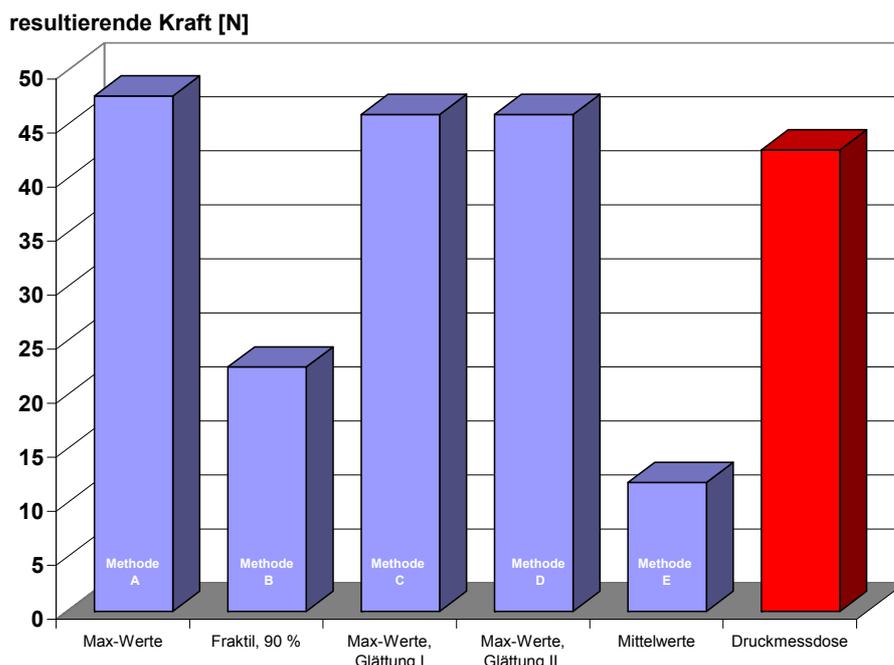


Bild 103: Resultierende Strahlkraft durch Druckfolienmessungen nach verschiedenen Auswertungsmethoden ermittelt im Vergleich zur Druckmessdosen-Messung

Aufgrund der guten Übereinstimmung mit den Ergebnissen der Parallel-Messungen mittels Druckmessdose wurden für die Auswertung des Gesamtprogramms die Auswertungsmethoden C und D gewählt (vgl. Tabelle 29). Hierbei werden nach einem festgelegten Algorithmus geglättete Maximalwerte dargestellt. Im Auswertungsmodus D wird darüber hinaus der Spitzendruck in Abhängigkeit der unmittelbaren Nachbarwerte gemittelt.

4.5.2.3 Untersuchungsparameter und Messergebnisse

Nachdem in Abschnitt 4.5.1 die Auftreff-Flächen der HD-Strahlen auf eine Oberfläche durch optische Erfassung des Strahlausbreitungswinkels abgeschätzt wurde, konnten diese sowie der Auftreffdruck im Rahmen der Druckfolienmessungen messtechnisch bestimmt werden. Dabei muss beachtet werden, dass die gemessenen Auftreff-Flächen nur die Flächenanteile eines Druckprofils beinhalten, bei denen der Druck eine von der Druckmessfolie vorgegebene Ansprechschwelle überschreitet (hier 0,03 bar).

Im Rahmen der Versuche wurden folgende **Parameter** variiert:

- Düsendruck (60, 80, 100 bar)
- Düsendurchfluss (32, 40 und 53 liter/min) bzw. Düseneinsatzdurchmesser
- Strahlwinkel (10°, 20° und 30°)
- Strahlabstand (18,5, 28,5, 38,5, 48,5, 58,5 und 68,5 mm)

Als Strahlabstand wurde der rechtwinklige Abstand von der parallel zur Düse ausgerichteten Messfolie bis zum Austrittspunkt des Wassers an der Düse festgelegt. Die schematische Darstellung in Bild 104 verdeutlicht die Versuchsanordnung von Düse und Messfolie und erläutert die Festlegung der Begriffe „Strahlabstand“, „Strahllänge“ und „Strahlwinkel“. Der Strahlwinkel entsteht zwischen einer Parallelen zur Hauptachse der Düse und der Achse des Düseneinsatzes. Der Strahlausbreitungswinkel beschreibt die Aufweitung des Strahls unmittelbar nach dem Austritt aus der Düse. Als Strahllänge wird der Weg in der Mittelachse des Strahles bis zum Auftreffpunkt auf die Messfolie bezeichnet.

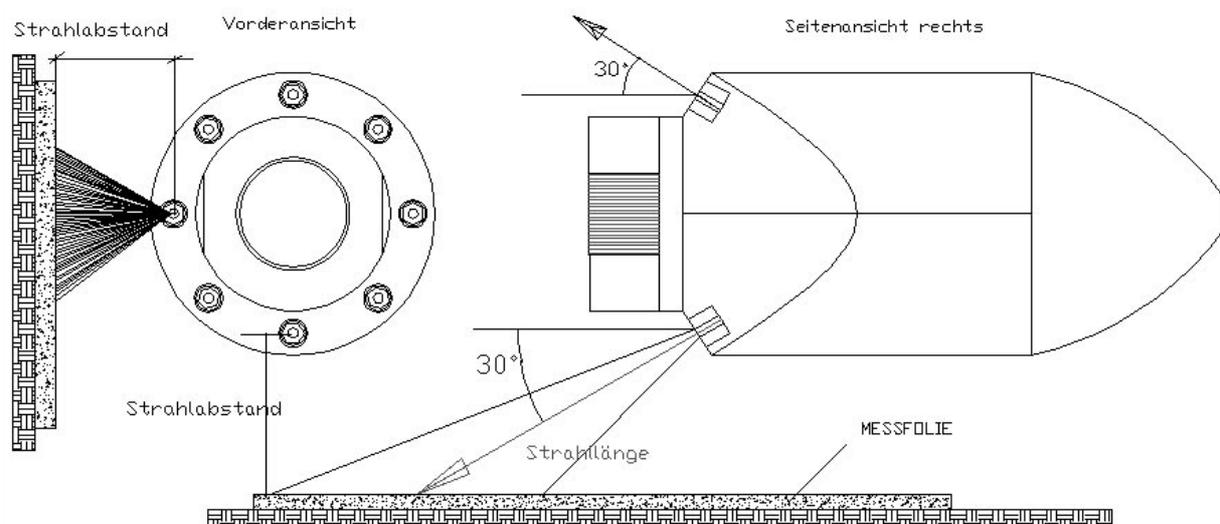


Bild 104: Schematische Darstellung des Versuchsaufbaus und Strahlabstands

Insgesamt wurden weit über 200 Versuche mit der Messfolie aufgezeichnet. Dabei wurden folgende **Messgrößen** für jede Einzelstrahl-Untersuchung erfasst:

- **Betriebsparameter p [bar], Q [l/min]**
Druck- und Durchfluss unmittelbar vor dem Düsenkörper
- **Druckprofil [bar]**
vom messbaren Schwellenwert bis zu einem Spitzendruck (ca. 0,03 – 7 bar)
- **Druckflächen [mm²]**
Summe von Messzellen oberhalb des Schwellenwertes

Um die Reproduzierbarkeit der Messdaten zu verifizieren, wurden grundsätzlich bei allen Parametervariationen jeweils 3 Versuche unter identischen Randbedingungen durchgeführt. Dabei wurde die Strahlaufrefffläche bestimmt und deren Form betrachtet. Darüber hinaus wurde die Strahldruckverteilung und der Spitzendruck entsprechend dem zuvor beschriebenen Auswertungsmodus ausgewertet. Es zeigt sich, dass die Flächenwerte und Spitzendrucke im Rahmen der Versuchswiederholungen nur geringfügig, um weniger als 3 % schwankten. Auch die optische Betrachtung der Strahlbilder bestätigen eine gute Reproduzierbarkeit der Messergebnisse. Die farbigen Flächen im Bereich einer Druckstufe haben annähernd gleichartige Formen. Die nachfolgenden Bilder zeigen dies beispielhaft (vgl. Bild 105).

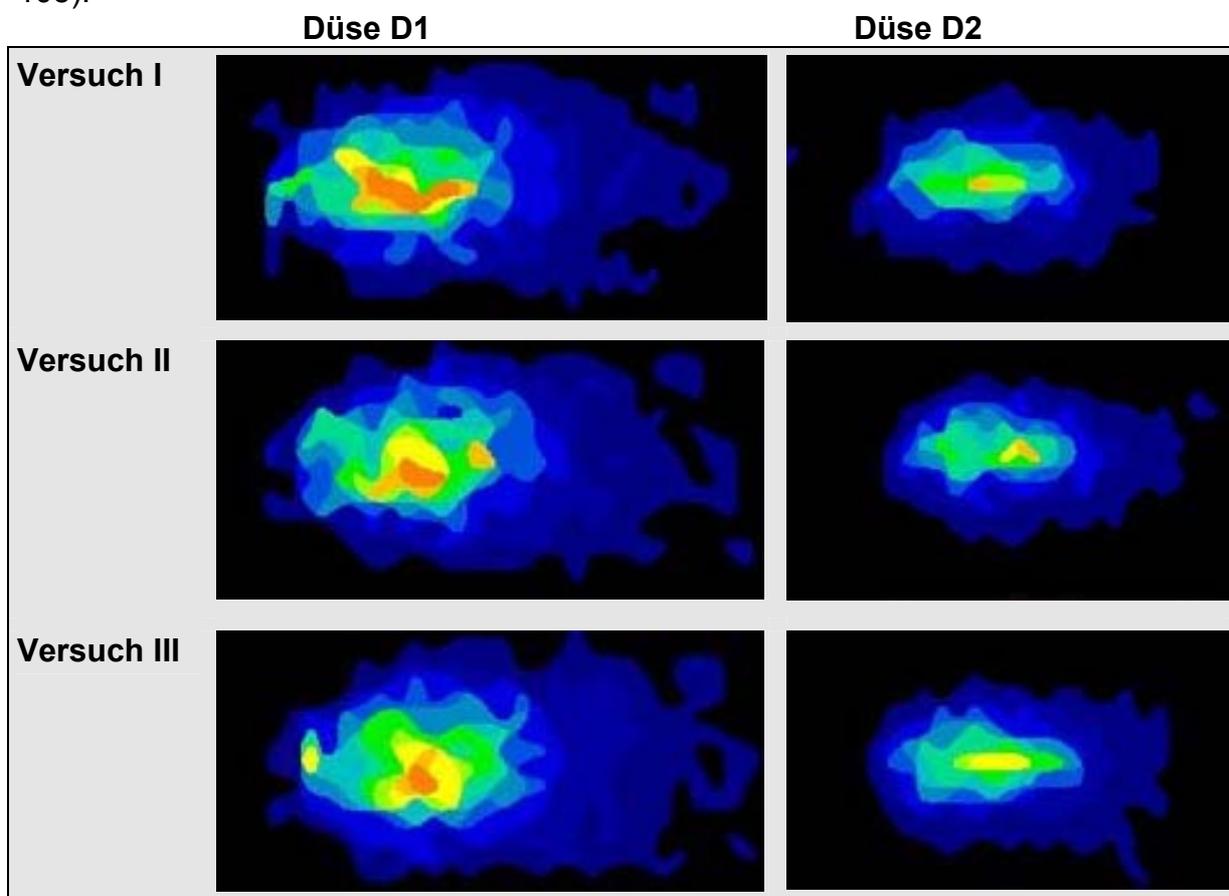


Bild 105: Versuchswiederholungen bei 100 bar Düsendruck und 28,5 mm Strahlabstand für zwei Düsen, Beispiel

Die Druckprofile wurden jeweils über eine Messzeit von 10 Sekunden aufgenommen. Die Farbänderungen entsprechen Druckstufen deren Intensität sich von Blau über Grün bis zu Rot steigert. Die Anschauung zeigt eine gute Reproduzierbarkeit der Flächenformen für eine Druckstufe. Schwankungen sind vornehmlich bei der Form bzw. den Umrissen der Flächen erkennbar.

Aufgrund des größeren Strahlausbreitungswinkels wurde erwartungsgemäß für die Düse D1 gegenüber der Düse D2 eine erheblich größere Auftreff-Fläche messtechnisch bestimmt. Für beide Düsen wurde darüber hinaus ein Vergleich mit einer theoretisch aus Geometriedaten berechneten Auftreff-Fläche durchgeführt. Dabei wurde eine elliptische Schnittfläche durch einen rotationssymmetrischen Strahl angenommen.

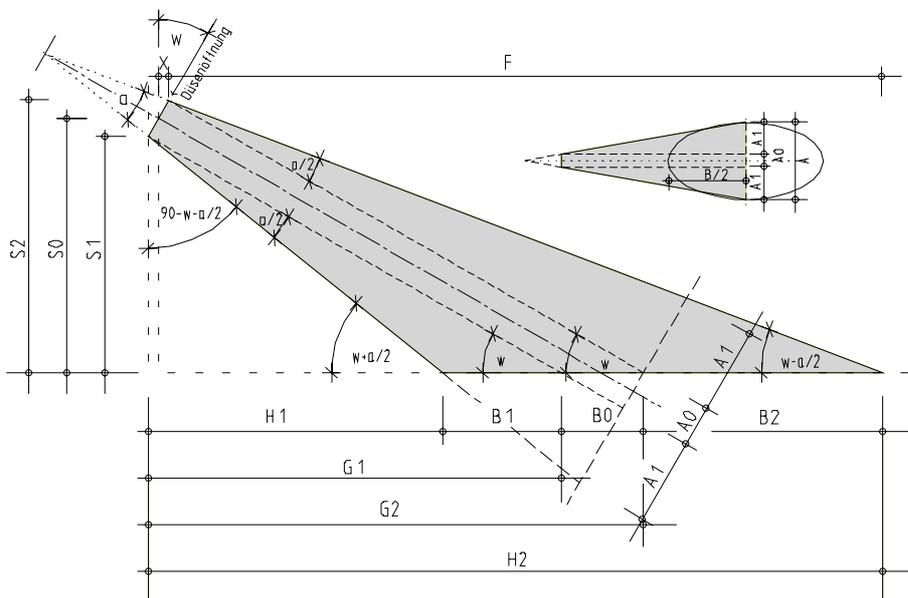


Bild 106: Skizze zur Berechnung der elliptischen Schnittfläche eines rotationssymmetrischen Strahls mit einer Ebene

In Bild 107 und Bild 108 ist das Druckbild am Auftreffort zusammen mit der Umrisskante der theoretischen Ellipsenfläche für einen Düsenabstand von jeweils 18,5 mm dargestellt.

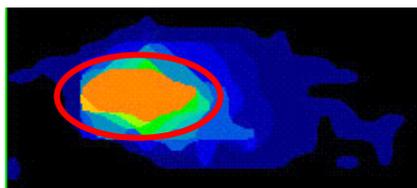


Bild 107: Düse D1,
18° Strahlausbreitungswinkel
100 bar Düsendruck,
18,5 mm Strahlabstand

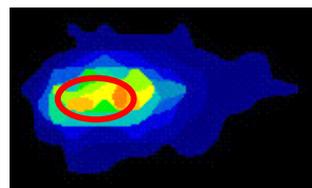


Bild 108: Düse D2,
7° Strahlausbreitungswinkel
100 bar Düsendruck,
18,5 mm Strahlabstand

Es zeigt sich, dass die über Drucksensoren ermittelte Auftreff-Fläche deutlich größer ist als nach den geometrischen Berechnungen zu erwarten war. Die Anschauung der Druckbilder und auch die Beobachtungen von HD-Strahlen in einem durchsichtigen Plexiglskanal lassen vermuten, dass ein Teil des auftreffenden Wassers zurückspritzt, aber ein anderer Teil als Film über die Oberfläche abfließt. Dieser Film verteilt vermutlich die Druckkraft, so dass die Druckspannungen immer noch oberhalb der Ansprechschwelle der Drucksensoren liegen.

Bild 109 stellt die gemessene und die aus den Geometriebedingungen berechnete elliptische Auftreff-Fläche für die Strahlausbreitungswinkel von 7° und 18° (schwarze Kurven) in Abhängigkeit von Strahlabstand und Düsendruck dar. Entsprechend der Annahme, dass bei der Druckfolienmessung der Wasserfilm-Bereich mitgemessen wird, ist die gemessene Auftreff-Fläche deutlich größer als die berechnete Ellipsenfläche. Jedoch sind Steigung und Verlauf der Messwert-Kurven der Ellipsenfunktion z.T. ähnlich.

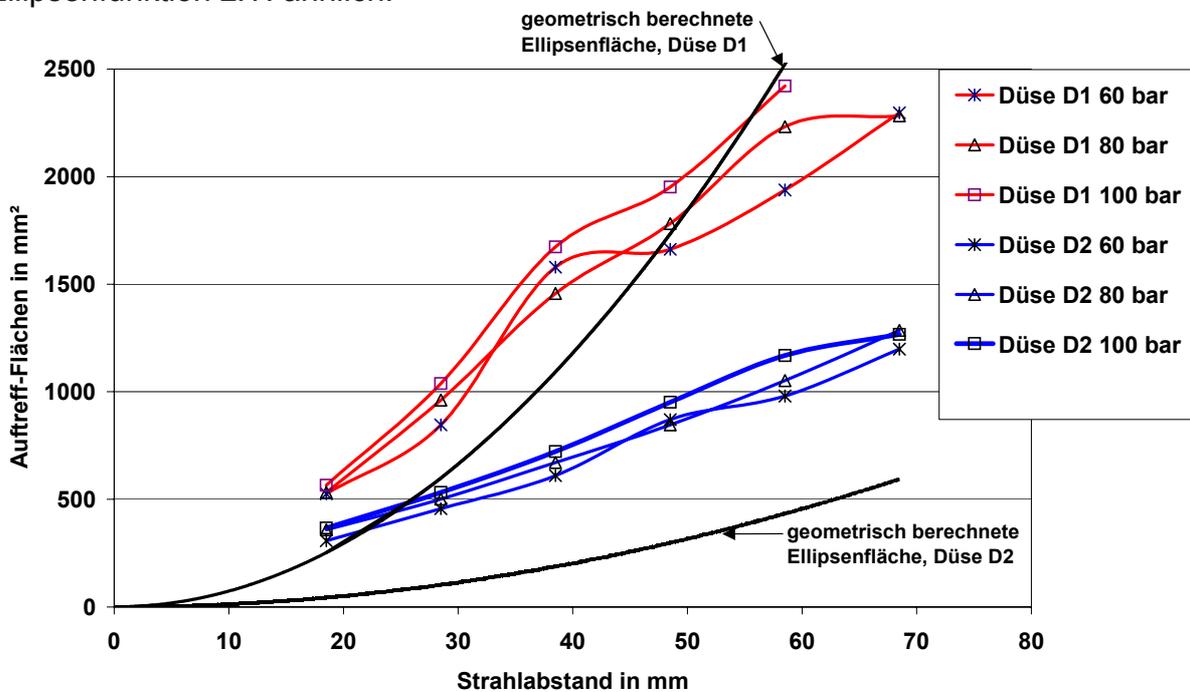


Bild 109: Strahlauftreff-Fläche in Abhängigkeit des Strahlabstandes

Mit größer werdendem Strahlabstand nähern sich die gemessenen und berechneten Kurven an. Insbesondere bei der Düse D1 unterschreiten die Messwerte ab einem Strahlabstand von 50 mm sogar die zugehörige Ellipsenfunktion. Dies kann möglicherweise durch Messfehler bzw. auch –schwankungen andererseits aber auch dadurch begründet sein, dass mit zunehmender Entfernung von der Düse die Wassertropfen im Strahl von der umgebenden Luft teilweise soweit abgebremst werden, dass die Druckbelastung beim Auftreffen auf die Messfolie unterhalb der Ansprechschwelle liegt. Bei noch größeren Strahlabständen ist zu erwarten, dass die gemessene Auftreff-Fläche kontinuierlich kleiner wird, bis sie durch die Drucksensoren nicht mehr erfasst werden kann.

Bemerkenswert ist, dass diese Vermutung insbesondere durch Messwerte unterstützt wird, die bei größeren Düsendrücken ermittelt wurden. Ein möglicher Erklärungsansatz könnte darin bestehen, dass größere Düsendrücke den Wasserstrahl stärker „zerstäuben“ und so kleinere Tropfen entstehen, die dann auf ihrem Weg aufgrund der geringeren Masse und der größeren Luftzwischenräume stärker abgebremst werden. Im Vergleich der Düsen ist bei der Düse D2 mit geringem Strahlausbreitungswinkel die oben beschriebene Wirkung anhand der Messdaten weniger belegbar, möglicherweise breitet sich der Strahl weniger stark aus, so dass auch weniger Luft mitgerissen wird. Weniger Luft im Strahl bedeutet dann auch geringere Reibungsverluste für die Wassertropfen.

Mit der Erhöhung des Düsendruckes von 60 auf 100 bar erhöhte sich die Auftrefffläche maximal um 20 %. Optisch bzw. durch fotografische Vermessung ist eine Strahlaufweitung bei unterschiedlichen Düsendrücken nicht feststellbar gewesen. Evtl. lassen sich diese Schwankungen ebenfalls durch den Wasserfilm begründen. Es ist denkbar, dass bei höheren Drücken im Randbereich des Wasserfilms zusätzliche Drucksensoren oberhalb der Ansprechschwelle angesprochen werden.

In den gemessenen Druckprofilen waren prinzipiell ausgeprägte Druckspitzen im Strahlkern erkennbar (s. z.B. Bild 97). Zur Bestimmung des Spitzendrucks wurden entsprechend dem gewählten Auswertungsmodus D (vgl. Abschnitt 4.5.2.2) die maximalen Druckmesswerte geglättet und mit den unmittelbaren Umgebungswerten gemittelt. Für den Düsendruck von 100 bar ist in Bild 110 ein Auswertungs-Beispiel dargestellt. Im Vergleich der Düse D1 und Düse D2 wurden für die Düse D1 grundsätzlich höhere Druckspitzenwerte gemessen.

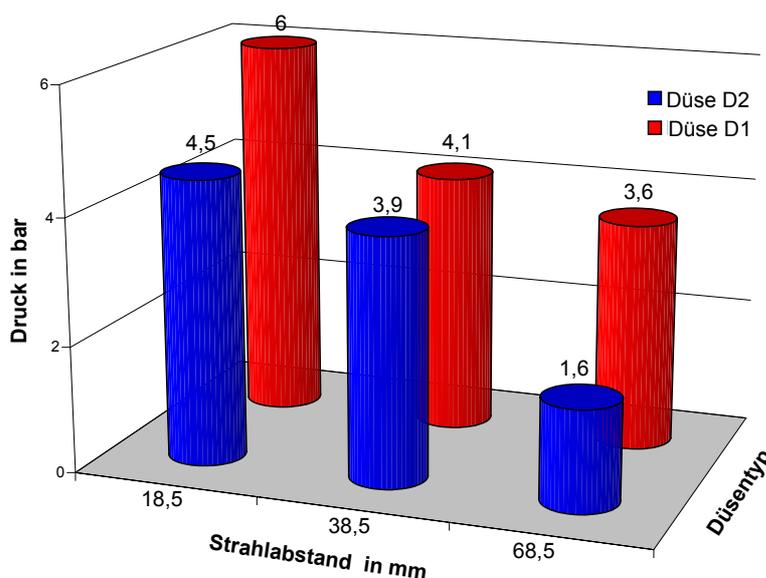


Bild 110: Spitzendruck in Abhängigkeit des Strahlabstandes

Der höchste Spitzendruck wurde bei beiden Düsen erwartungsgemäß bei dem kürzesten Strahlabstand von 18,5 mm gemessen. Mit 6 bar ist die Druckspitze der

Düse D1 um mehr als 30 % größer als bei der Düse D2. Mit zunehmendem Strahlabstand fällt der Spitzendruck bei beiden Düsen deutlich ab. Wird der Strahlabstand um 5 cm erhöht, so reduziert sich der Spitzendruck bei der Düse D1 um 40 %. Im Fall der Düse D2 fällt der Spitzendruck noch deutlicher, um mehr als 60 % ab.

Der Strahl einer Düse entsteht am Düsenaustrittspunkt. An dieser Stelle sind Bohrungen für austauschbare Düseneinsätze angeordnet. Den Einfluss der Wasserführung in den Düseneinsätzen zur Ausbildung des Strahls, zeigen die Strahldruckbilder von zwei verschiedenen Düseneinsätzen (vgl. Bild 111 und Bild 112). Sie wurden jeweils mit dem gleichen Düseneinsatz, bei einem Druck an der Düse von jeweils 100 bar und einem Durchfluss von ca. 280 liter/min erzeugt. Allein die Düseneinsätze wurden für den jeweiligen Versuch gewechselt. Dabei wurden kreuzförmige Düseneinsätze mit den üblicherweise runden Düseneinsätzen verglichen.

Der anschauliche Vergleich der beiden getesteten Düseneinsätze zeigt deutliche Unterschiede hinsichtlich der Strahlflächen und der jeweiligen Strahldruckverteilung auf. Der Düseneinsatz mit kreuzförmiger Wasserführung erzeugt einen kompakten, intensiven Strahl, während der Strahl aus dem runden Düseneinsatz großflächiger auftritt und kein ausgeprägtes Zentrum ausbildet.

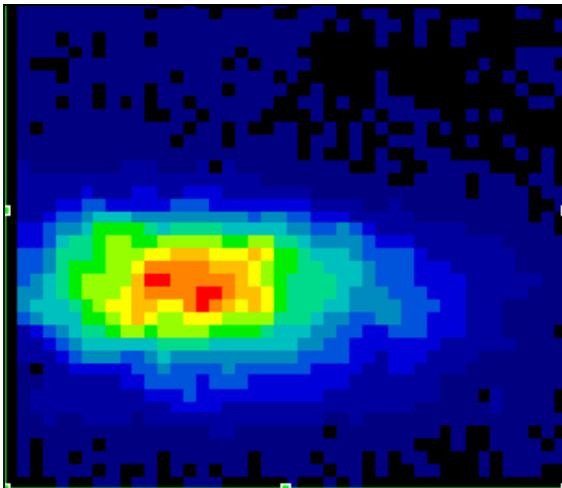


Bild 111: Druckbild,
kreuzförmiger Düseneinsatz

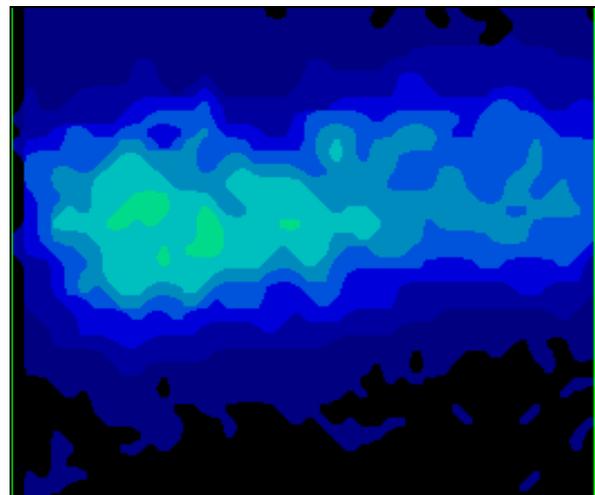


Bild 112: Druckbild,
runder Düseneinsatz

Dies zeigt, dass bei einer Düse unter Anwendung gleicher Betriebsparameter durch einfaches Wechseln der Düseneinsätze drastische Änderungen im Druckprofil des Strahlbildes auftreten können. Grundsätzlich stellt sich jedoch die Frage, ob das Druckprofil auch die Lösewirkung der HD-Strahlen repräsentiert.

Im Gesamtblick konnten mit Hilfe der Folienmessung für verschiedene HD-Strahlen charakteristische Druckprofile auf einer Oberfläche bestimmt werden. Aus ihnen

wurden die bestrahlte Auftreff-Fläche, der maximale Spitzendruck und die resultierende Strahlkraft in Abhängigkeit des Strahlabstandes und des Düsendruckes bestimmt. Inwieweit diese Eigenschaften des Druckprofils die Aggressivität bzw. abrasive Wirkung des HD-Strahls gegenüber einer Ablagerung oder einem Rohrwerkstoff charakterisieren, kann allein hierdurch aber nicht geklärt werden. Anschaulich ist die abrasive Wirkung eines HD-Strahls auf eine Oberfläche immer auch von der Einwirkzeit und den dortigen Materialeigenschaften abhängig. Vor diesem Hintergrund wurden weitergehende Versuche zur Abbildung der Lösewirkung von HD-Strahlen an Modellsedimenten durchgeführt.

4.5.3 Abbildung der Lösewirkung im Material

Im Rahmen von ersten Vorversuchen wurden Rohrsegmente mit Mörtel beschichtet und durch einzelne Hochdruckwasserstrahlen aus rund- und kreuzförmigen Düseneinsatz-Querschnitten belastet. Insgesamt wurden drei verschiedene Mörtel (unterschiedlicher Festigkeit) auf die Rohrsegmente aufgebracht und für zehn Sekunden unter Vollast des Reinigungsfahrzeuges (320 l/min mit 150 bar) im Versuchstand bestrahlt. Der Hochdruckwasserstrahl hat die ca. 1 cm starke Mörtelschicht aller drei Härteklassen am Auftreffpunkt vollständig erodiert. Mit steigender Festigkeit des Mörtels ist die unmittelbare Wirkfläche des Strahls umso definierter erkennbar. Deutlich unterschiedlich gestalten sich die Ausspülungen im weiteren Verlauf hinter dem unmittelbaren Auftreffort des Wasserstrahls. Im weichen Mörtel erodiert der abfließende Wasserfilm großflächig Material ab, jedoch nur noch bis zu einer geringen Tiefe von maximal 5 mm. Im harten Mörtel ist lediglich ein kurzer „Schweif“ entstanden (vgl. Bild 113).



Bild 113: Abrasion an Modellsedimenten aus Mörtel durch stationären HD-Strahl

Die in Bild 114 dargestellten mit weicher Mörtelmischung (MG I) beschichteten Tafeln wurden mit gleicher Düse und gleichen Reinigungsparametern bestrahlt. Einziger Unterschied war die Art der Düseneinsätze. In Bild 114 oben ist die Erosion durch einen Strahl aus rundem Keramikeinsatz, unten durch einen bei kreuzförmiger Wasserführung verursacht worden. Das Strahlbild des Düseneinsatzes mit kreuzförmiger Wasserführung war vergleichsweise kompakt und wies einen deutlich kleineren Ausbreitungswinkel auf. In beiden Fällen ist am Auftreffort sämtliches Material abgetragen worden. Durch den kleineren Strahlausbreitungswinkel war der

Abtrag bei kreuzförmigem Düseneinsatz nur halb so breit wie bei dem runden Keramikeinsatz.

Bemerkenswert ist, dass das abfließende Wasser lediglich eine schmale Spülspur im Material erzeugt und bereits beträchtlich an Abrasionsenergie einbüßt. Selbst bei „wenig festen“ Mörtelmischungen ist der HD-Strahl überwiegend nur am unmittelbaren Auftreffort lösewirksam. Hier ist die Abrasionswirkung vergleichsweise extrem, so dass dort sogar eine kritische Beanspruchung des Rohrmaterials denkbar erscheint, insbesondere bei kurzen Strahlabständen im Sohlbereich.

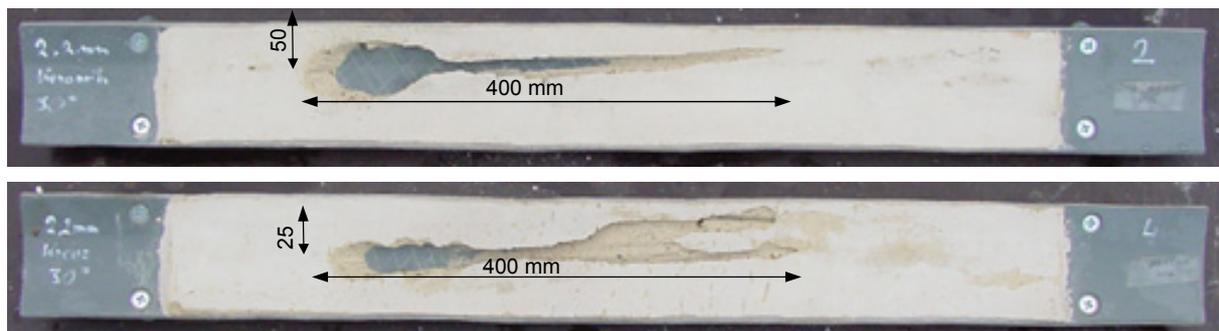


Bild 114: Abrasion an Modellsedimenten aus Mörtel (MG I) durch stationären HD-Strahl: runder Keramikeinsatz (oben), kreuzförmiger Keramikeinsatz (unten)

Um die Abrasionswirkung von HD-Strahlen unmittelbar am Auftreffort untersuchen zu können, wurden weitergehende Untersuchungen mit industriell hergestellten Steinen aus Porenbeton durchgeführt (vgl. [27]). Hier war eine hohe Reproduzierbarkeit der Versuchsergebnisse gegeben. Durch die HD-Strahlbelastung wurde ebenfalls Materialabtrag verursacht. Dieser stellte sich bei dem Porenbeton jedoch anders dar. Neben dem abrasiven Materialverhalten waren auch Abplatzungen zu erkennen. Im Kanalnetz sind ebenfalls deutliche Unterschiede im Materialverhalten von Inkrustationen und Verfestigungen zu erwarten, da sie meist aus unterschiedlichen Quellen und Entstehungsprozessen stammen. Die Versuche mit Porenbeton stellen vor diesem Hintergrund Orientierungsversuche dar, um die grundsätzlichen Einflüsse von Strahlgeometrie und Belastungsparametern auf die Abrasionswirkung von HD-Strahlen zu erfassen. Vor diesem Hintergrund wurden an den Porenbetonsteinen systematische Versuche durchgeführt.

Vor der Belastung durch HD-Strahlen wurden die Porenbetonsteine an der Oberfläche mit roter Farbe (offenporig) angestrichen. Durch den Farbwechsel von roter Oberfläche zu weißer Steinfarbe wird die Umrisskante des Materialabtrags deutlich erkennbar. Eine standardisierte optische Darstellung des Materialabtrags bei durchweg gleichen Lichtverhältnissen wurde durch das Scannen der Steinoberflächen erreicht. Insgesamt wurden in dem Düsen-Versuchsstand (vgl. Bild 92) weit über 500 Belastungsversuche auf simulierten Modell-Verfestigungen (Porenbeton und Mörtel) mit wechselnden Parametern (Strahlabstand, Auftreffwinkel, Abstrahlwinkel und Ausbreitungswinkel in Zusammenhang mit den

Reinigungsparametern Druck und Durchfluss) durchgeführt. Die entwickelte Versuchsanordnung ermöglicht es, die Strahlcharakteristik eines HD-Strahls in Abhängigkeit von Düsendruck, Strahlabstand und Einwirkzeit kompakt auf einem Porenbetonstein abzubilden (vgl. Bild 115).

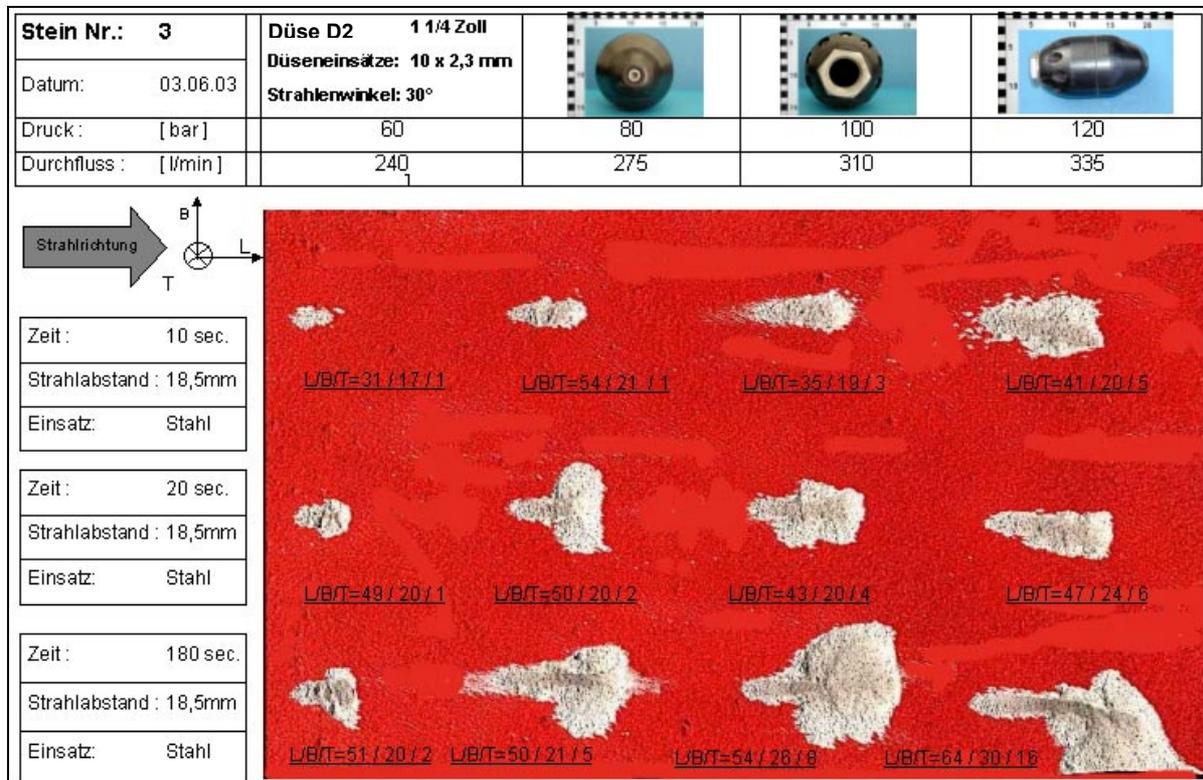


Bild 115: Erosion des HD-Strahls an Porenbeton, Beispiel Düse D2 bei 60 bis 120 bar und einer Einwirkzeit von 10, 20 und 180 Sekunden

Das Beispiel in Bild 115 zeigt anschaulich den Einfluss der **Einwirkzeit** des HD-Strahls auf die Erosion an einem Porenbetonstein. Je länger die Einwirkzeit ist, umso größer und tiefer ist der Materialabtrag. Bei der langen Einwirkzeit von 180 Sekunden gräbt sich der HD-Strahl so tief in das Material, dass es neben fortschreitender Abrasion auch zu Abplatzungen kommt. Im Vergleich erzeugte der Strahl bei längerer Einwirkzeit (20/180 Sek.) bereits bei einem vergleichsweise niedrigen Düsendruck von 80 bar einen größeren Materialabtrag als bei kurzer Einwirkzeit (10 Sek.) und sehr hohem Düsendruck von 120 bar.

Der Einfluss des Düsendruckes ist am deutlichsten anhand der Versuche mit kurzer Einwirkzeit von 10 Sekunden zu erkennen. Erwartungsgemäß wachsen mit zunehmendem **Düsendruck** die Abrasionsfläche und -tiefe grundsätzlich an. Bei niedrigem Druck von 60 bar ist zunächst nur eine kleine erodierte Fläche erkennbar. Bei der beginnenden Abrasion ist scheinbar zunächst nur der Strahlkern in der Lage, Material abzutragen. Mit zunehmenden Druck erhöht sich die Abtragstiefe und die Fläche wächst an. Dabei nimmt die Abtragsfläche in der Länge stärker als in der

Breite zu. Im hinteren Bereich der Erosionsfläche ist der Abtrag grundsätzlich am tiefsten, da sich der Strahl an der Oberfläche beginnend immer tiefer in das Material gräbt. Ab einer gewissen Abtragstiefe wird das Material nicht mehr bis zur Oberfläche abgetragen. Es kommt zu einer Unterhohlung der Oberfläche. Dort entsteht ein Staudruck, der dann zu einer plötzlichen Materialabplatzung führen kann.

Interessant ist die vergleichende Betrachtung der Erosionsergebnisse der kurzen und langen Einwirkzeit im Zusammenhang mit dem Düsendruck. Bei einer Verlängerung der Einwirkzeit von 10 auf 20 Sekunden treten bereits ab einem Düsendruck von 80 bar größere Materialabplatzungen auf. Bei der Steigerung des Druckes von 80 bar auf 120 bar verändern sich die Abtragsflächen kaum noch. Scheinbar ist nach einer Abplatzung des Materials die Strahllänge und die Geometrie der Auftreff-Fläche soweit verändert, dass die Strahlaggressivität nicht mehr ausreicht, um den Erosionsprozess wesentlich fortzusetzen.

Insgesamt lässt sich erkennen, dass die Erosionsbilder aufgrund ihrer zeitabhängigen Entwicklung deutlich über den ersten Auftreffort des Düsenstrahls hinauswachsen. Allerdings stimmen auch nach längerer Belastung die Abrasionsflächen im ersten Anstrahlbereich mit den Umrissen der zugehörigen Druckprofilmessung überein (Bild 116). Insbesondere die Breite der Abrasionsfläche deckt sich hier mit der Breite der gemessenen Druckfläche.

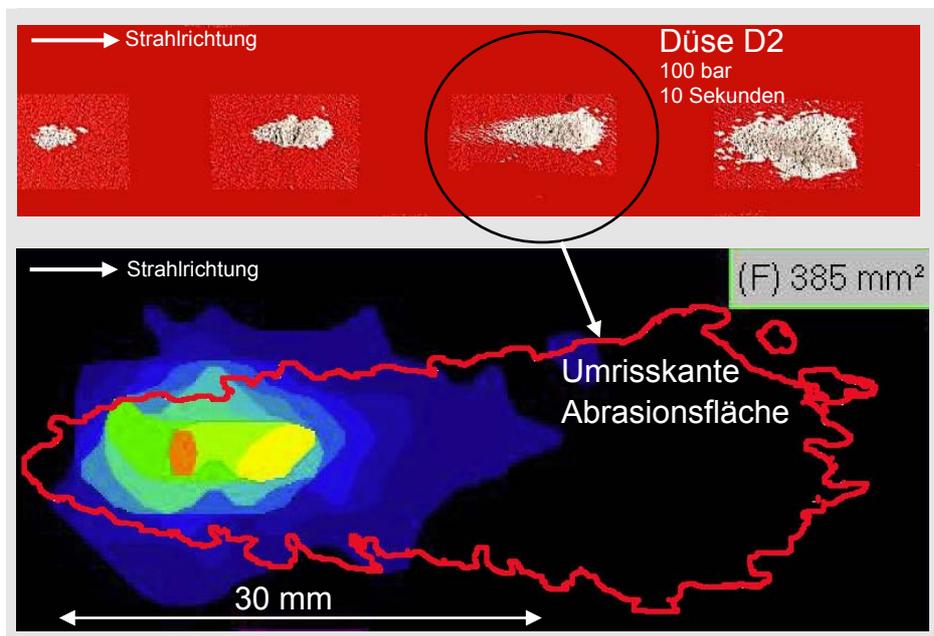


Bild 116: Überlagerung der Umrisskante der Abrasionsfläche mit dem gemessenen Druckprofil, Beispiel Düse D2, 100 bar, Strahlzeit 10 sek.

Im Rahmen der Druckfolienmessungen wurde der enorme **Einfluss des Strahlabstandes** auf die Druckspitzenwerte deutlich. Vor diesem Hintergrund sind in Bild 117 beispielhaft Erosionsbilder zusammengefasst, die den Einfluss des

Strahlabstandes und des Strahlwinkels auf die Abrasionswirkung von HD-Strahlen abbilden. Nach einer Erhöhung des Abstandes um 50 mm von 18,5 auf 68,5 mm ist selbst bei dem hohen Strahlwinkel von 30° kaum noch Materialabtrag feststellbar.

Der **Strahlwinkel** hat ebenfalls großen Einfluss auf die Abrasionswirkung des Strahls. Während bei einem Strahlwinkel von 30° deutlicher Materialabtrag auftritt, ist bereits bei einem Strahlwinkel von 20° selbst bei kurzem Strahlabstand lediglich geringer Abtrag feststellbar. Bei einem Strahlwinkel von 10° (Düse D12) ist nur noch optisch kleinflächiger Farbabrieb erkennbar, eine Abtragstiefe ist nicht mehr messbar.

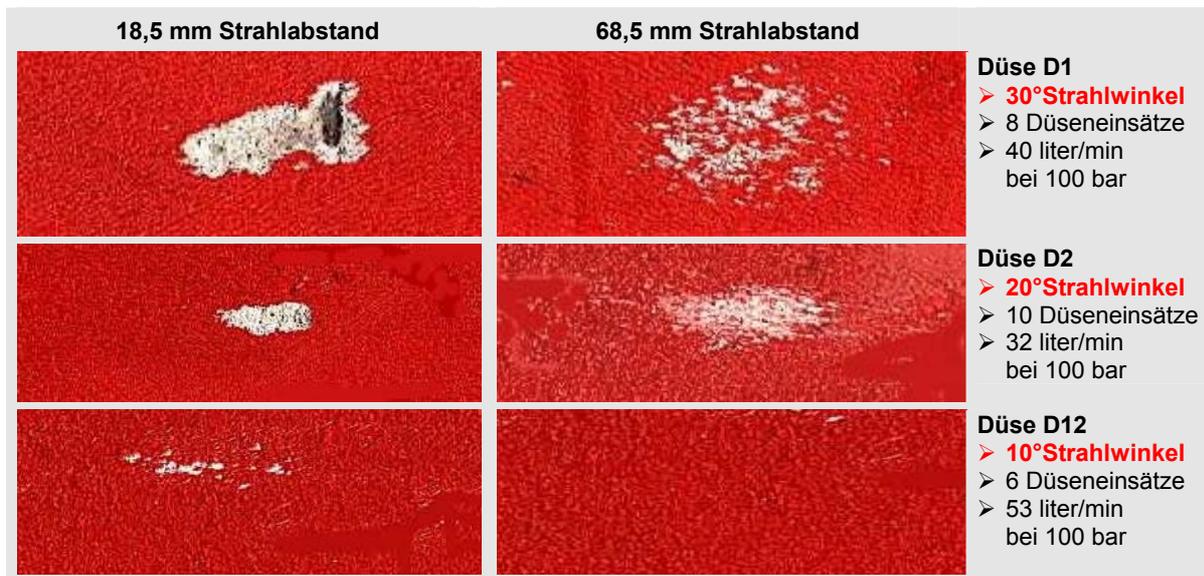


Bild 117: Erosionsflächen in Abhängigkeit von Strahlwinkel und Strahlabstand.

In Bild 118 sind die Erosionsflächen der Düse D1 und Düse D2 einander in Abhängigkeit des Düsendruckes gegenübergestellt. Der Vergleich der beiden Düsen korrespondiert ebenfalls mit den Ergebnissen der Druckfolienmessungen. So wurden im Druckprofil der Düse D1 deutlich höhere Druckspitzen und -flächen als bei der Düse D2 gemessen (vgl. Bild 109 und Bild 110). Dies steht sehr wahrscheinlich im Zusammenhang mit den bei den Abrasionsversuchen beobachteten Abtragstiefen und -flächen. Der HD-Strahl der Düse D1 verursacht vergleichsweise größere Abtragsflächen und deutlich größere Abtragstiefen im Material des Porenbetonsteins. Bei einem Druck von 100 bar entsteht bereits ein ausgeprägtes Loch bzw. eine Aushöhlung des Materials mit einer Tiefe von bis zu einem Zentimeter. Eine Drucksteigerung auf 120 bar führt dann zu einer vergleichsweise großflächigen Abplatzung. Im Gegensatz dazu bleibt der Materialabtrag der Düse D2 oberflächennah und stellt sich fast ausschließlich abrasiv dar, ohne Abplatzungen aufzuweisen wie bei der Düse D1.



Bild 118: Materialabtrag an oberflächengefärbten Porenbeton-Steinen nach HD-Strahlbelastung, Strahlabstand 18,5 mm, Bildbeispiele

Zusammenfassend können folgende Wechselwirkungen zwischen Strahleigenschaften, Belastungsparametern und spezifischem Materialverhalten des *Porenbetons* aufgezeigt werden:

- Wesentliche Materialbeanspruchungen traten überwiegend nur bei **kurzen Strahlabständen** (bis ca. 2 cm) und **weiten Düsen-Abstrahlwinkeln** auf.
- Bei einem **größeren Strahlabstand** von ca. 7 cm traten an dem Porenbetonstein selbst bei hohen Drücken von 120 bar und weiten Düsen-Abstrahlwinkel von 30° kaum noch nennenswerte Beanspruchungen auf.
- Bei **weiten Düsen-Abstrahlwinkeln** (z.B. 30°) steigt mit dem Düsendruck die Materialbeanspruchung. Der Abtrag wird großflächiger und tiefer.
- Bei **mittleren Düsen-Abstrahlwinkeln** (z.B. 20°) ist die Materialbeanspruchung grundsätzlich geringer und nimmt mit steigendem Düsendruck kaum noch zu.
- Bei **flachen Düsen-Abstrahlwinkeln** (z.B. 10°) ist sogar bei einem Düsendruck von 120 bar kein nennenswerter Materialabtrag feststellbar gewesen.

4.6 Empfehlungen zur Düsenauswahl

In der **Reinigungspraxis** wird aus Kostengründen oftmals auf eine Ergebniskontrolle verzichtet. Somit kann der Reinigungserfolg im Wesentlichen nur durch Einsatz leistungsfähiger Düsen und die Einstellung geeigneter Reinigungsparameter gesichert werden. Das in den voranstehenden Abschnitten dargestellte Versuchsprogramm zum **Räumvermögen und der Lösewirkung** von Düsensystemen zeigte allerdings deutliche Unterschiede auf, so dass die Düsenauswahl auf die jeweilige Reinigungsaufgabe abgestimmt sein sollte. Ziel ist es darüber hinaus, nicht nur den Reinigungserfolg zu sichern, sondern auch Betriebsstoffe einzusparen und Schadensrisiken zu vermindern, z.B. durch Verringerung der Anzahl der Reinigungszyklen bzw. der Reinigungszeit.

Aufgrund der Produktvielfalt (Düsen und Düseneinsätze) und unterschiedlichen Randbedingungen im jeweiligen Kanalnetz (Ablagerungen, Netzzustand) empfiehlt es sich grundsätzlich, vor jedem Kauf einer HD-Düse die Leistung des Düsenprodukts **vor Ort stichprobenhaft mit begleitender TV-Inspektion zu überprüfen**. Für diese Düsen-Tests bietet es sich an, möglichst extreme Reinigungssituationen (z.B. hartnäckige Ablagerungen oder hohes Ablagerungsaufkommen) auch in kritischen Netzbereichen (Schwachstellen, ausgebeuerte Streckenabschnitte) entsprechend dem Anwendungsgebiet der HD-Düse auszuwählen. Aussagen zur Leistungsfähigkeit von 5 bis 10 Düsenprodukten lassen sich dabei bereits im Rahmen eines Tageseinsatzes mit einem einzelnen Reinigungsfahrzeug erzielen. Eine besondere Bedeutung gewinnen diese praxisnahen Tests auch dadurch, dass nicht selten im Rahmen von Wartungsplänen turnusmäßig und systematisch das gesamte Kanalnetz gereinigt wird.

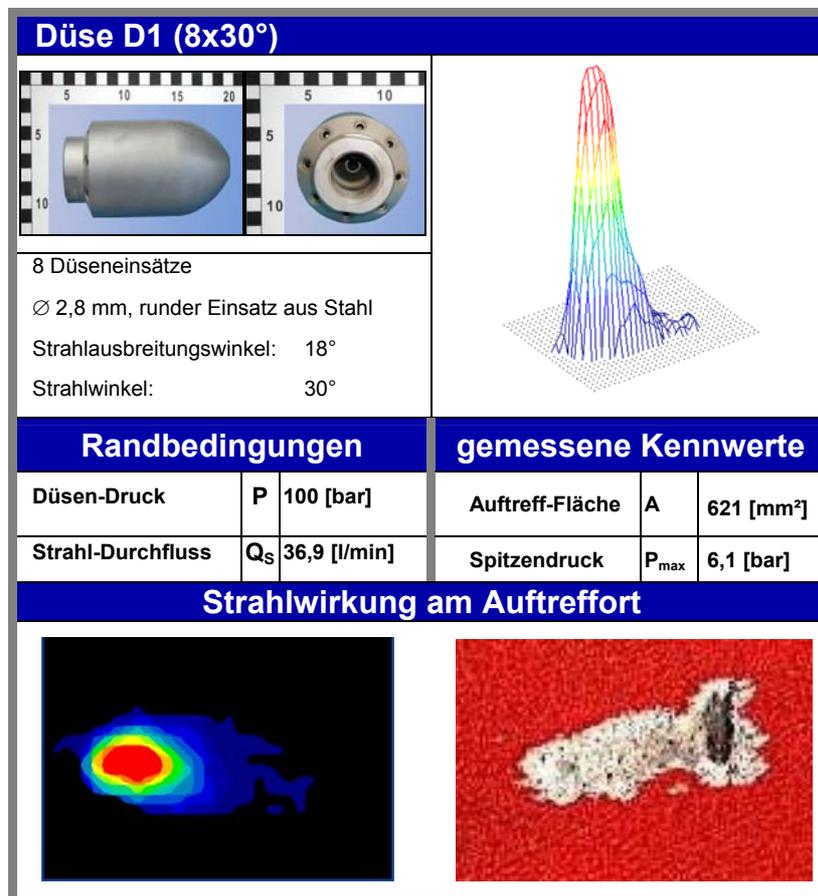
Aufbauend auf den erhobenen Betreibererfahrungen und den Erkenntnissen des Untersuchungsprogramms sind in Tabelle 31 die wesentlichen Reinigungssituationen tabellarisch zusammengestellt und in Abhängigkeit der möglichen Netzbedingungen konkreten Reinigungsempfehlungen zugeordnet.

Tabelle 31: Auswahl von HD-Reinigungswerkzeugen

REINIGUNGSWERKZEUG					
					
rundumstrahlende Düse	rotierendstrahlende Düse ¹⁰	flachstrahlende Düse	Ejektor-düse ⁷	vorstrahlende (Stocher-) Düse	Spezialgerät ⁸
EMPFEHLUNG					
	zuverlässig wirksam ¹				
	geeignet ²				
	Nennweite ³	klein ⁹ DN 200 – DN 400	mittel DN 500 – DN 1200	groß ⁴ > DN 1200	
Sielhaut wird z.B. zur Vorbereitung einer Inspektion entfernt. Dies ist insbesondere bei großen Nennweiten technisch schwierig und aufwendig.	Werkzeug ⁵				
	Anwendung	Reinigungszyklen 1-2 Düsenwinkel 20° - 30° Düsenrückzug ≤ 24 m/min Förderstrom ≤ 280 l/min	Reinigungszyklen 1-3 Düsenwinkel 20° - 30° Düsenrückzug ≤ 24 m/min Förderstrom ≤ 280 l/min	Reinigung der gesamten Rohrwandung äußerst aufwändig; oft manuelle Reinigung notwendig	
Lockere Ablagerungen ⁶ lassen sich i. d. R. leicht lösen und aus dem Netz entfernen. Aufwändig wird die Aufgabe erst, wenn größere Mengen zu transportieren sind. Sind sie eher gering, können Reinigungsintervalle ggf. verlängert werden.	Werkzeug ⁵				
	Anwendung	Reinigungszyklen 1 Düsenwinkel ≤ 20° frei wählbar Förderstrom ≤ 280 l/min	Reinigungszyklen 1 Düsenwinkel ≤ 20° Düsenrückzug ≤ 24 m/min Förderstrom ≤ 280 l/min	Reinigungszyklen 1-2 Düsenwinkel ≤ 20° Düsenrückzug ≤ 12 m/min Förderstrom > 280 l/min	
Hohes Ablagerungsaufkommen erfordert häufig mehrere Reinigungszyklen. Im Extremfall kann sogar eine abschnittsweise Reinigung der Haltung notwendig sein. Die Ursache für das hohe Aufkommen sollte zur Reinigungsplanung bekannt sein.	Werkzeug ⁵				
	Anwendung	Reinigungszyklen 1-2 Düsenwinkel ≤ 20° Düsenrückzug ≤ 24 m/min Förderstrom ≤ 280 l/min	Reinigungszyklen 1-2 Düsenwinkel ≤ 20° Düsenrückzug ≤ 12 m/min Förderstrom ≤ 320 l/min	häufig manuelle Reinigung in Kombination mit HD-Düsen notwendig	
Verfestigte Ablagerungen können aus Verfestigungsprozessen im Kanalnetz stammen (Fette, Inkrustationen) oder bereits als feste Massen eingetragen werden, z. B. Baustellenrückstände. Extreme Verfestigungen sind oft nur mit Spezialgeräten lösbar.	Werkzeug ⁵				
	Anwendung	Reinigungszyklen oft > 1 Düsenwinkel 20° - 30° Düsenrückzug ≤ 12 m/min Förderstrom ≤ 280 l/min evtl. auch Einsatz einer Vibrationsdüse hilfreich	Reinigungszyklen oft > 1 Düsenwinkel 20° - 30° Düsenrückzug ≤ 12 m/min Förderstrom ≤ 320 l/min evtl. auch Einsatz einer Vibrationsdüse hilfreich	oft manuelle Reinigung in Kombination mit Spezialgeräteeinsatz notwendig	
Wurzeleinwuchs ⁴ tritt an Muffen, undichten Hausanschluss-Stutzen oder schadhaften Rohrabschnitten auf. Dort bilden sie nach anfänglich feinen Haarwurzeln dichte Wurzelbüsche aus, die den Abfluss stark behindern können.	Werkzeug ⁵				
	Anwendung	Einsatz in Abhängigkeit der Verwurzelung und des Rohrwerkstoffs, unter Kamerabeobachtung	Einsatz in Abhängigkeit der Verwurzelung und des Rohrwerkstoffs, unter Kamerabeobachtung	ausschließlich manuelle Reinigung möglich, evtl. in Kombination mit Spezialgeräten	
Verstopfung ⁴ der Leitung durch besondere Abflusshindernisse. Reduzierung des hydraulischen Querschnitts. I.d.R. tritt dies nur aufgrund besonderer Ursachen auf. Grundsätzlich empfiehlt sich die Spülwasserbeobachtung (Rohrscherben).	Werkzeug ⁵				
	Anwendung	Einsatz in Abhängigkeit der Verstopfungssituation, Ursachenermittlung durch Kamerabegleitung der Nacharbeiten	Einsatz in Abhängigkeit der Verstopfungssituation, Ursachenermittlung durch Kamerabegleitung der Nacharbeiten	manuelle Reinigung erst nach Beseitigung des Rückstaus möglich, evtl. in Kombination mit Spezialgerät	
Anmerkung: Werkzeuge und Anwendungsparameter sind grundsätzlich situationsabhängig zu wählen. Die Empfehlungen dienen als Orientierungshilfe für die Reinigungsplanung.					
1 Vollständige Reinigung außer bei Extremverschmutzung zuverlässig möglich.					
2 Vollständige Reinigung annähernd möglich, u.U. sind zusätzliche Reinigungszyklen notwendig bzw. verbleiben Ablagerungsreste.					
3 Fließende Übergänge zwischen den Kategorien grundsätzlich möglich.					
4 Empfehlungen ausschließlich auf der Basis von Betreibererfahrungen.					
5 Der Einsatz eines Düsenschlittens schont das Rohrmaterial und verbessert mitunter die Reinigungswirkung.					
6 Einsatz alternativer Verfahren, z.B. Schwallspülung, grundsätzlich möglich.					
7 Zur Entfaltung der Ejektorwirkung muss das Gerät vollständig eingetaucht sein.					
8 Z.B. geführte bzw. nennweitenbegrenzte Kettenschleuder, Kanalfräse, Schneidkorb mit Windenzug, evtl. auch Robotoreinsatz.					
9 Das Risiko von „Toilettenausblasungen“ vermindern große Düsenabstrahlwinkel (> 20°) bei niedrigen Drücken und Durchflüssen.					
10 Rotierendstrahlende Düsen verfügen häufig auch über Düsenabstrahlwinkel > 30°.					

Die nachfolgend in Abschnitt 5 dargestellten Untersuchungen zur Belastung der Netzzubstanz aus HD-Reinigung setzen die **Auswahl geeigneter Prüfdüsen** voraus, hier allerdings mit Blick auf ein breites Spektrum an Anwendungsfällen und kritischen Beanspruchungen. Voraussetzung ist die Kenntnis der Düseneigenschaften unter reproduzierbaren Randbedingungen. Ein Auswertungsbeispiel gibt Tabelle 32. Für die dort dargestellte **Düse D1** (8 x 30°) sind u.a. die Strahlauftreff-Fläche, der Spitzendruck und die Wirkung am Auftreffort dargestellt. Die Düse D1 wird im Rahmen der Untersuchungen nach Abschnitt 5 zur Ausführung der **vergleichenden HD-Systemversuche** eingesetzt. Da bei flacheren Düsen-Abstrahlwinkeln (z.B. 20°) eine geringere Materialbeanspruchung zu erwarten ist, werden darüber hinaus die **Düsen D2 und D4** im Rahmen von **Zusatzversuchen** in das erweiterte Versuchsprogramm einbezogen (vgl. Tabelle 19).

Tabelle 32: Auswertungsbeispiel für Düse D1 zur Strahldruckverteilung bei 100 bar Düsendruck, Strahlabstand 18,5 mm und einer Messdauer von 10 sec



5 Belastungen aus Hochdruckdüsen-Einsatz

Im Abschnitt 4 wurden die Strahleigenschaften und die Reinigungswirkung von Hochdruck-Düsen untersucht. Die daraus resultierenden Belastungen beschränken sich allerdings nicht auf die zu lösenden Ablagerungen, sondern wirken in ähnlicher Weise auch auf den Kanal selbst. Düse und Schlauch werden durch die Vorschubkräfte des Wasserstrahls oder mittels Winde über die Kanaloberfläche gezogen, die austretenden HD-Wasserstrahlen treffen nicht nur auf verfestigte und lose Ablagerungen, sondern auch unmittelbar auf das Rohr, und aus den aufgewirbelten Ablagerungen werden Feststoffpartikel beschleunigt und z.T. mit hoher Geschwindigkeit gegen einzelne Kanalbauteile geschleudert. Auch wurde in einzelnen Reinigungssituationen beobachtet, dass ein Düsenkörper während des Reinigungsvorganges schweben bzw. abheben und auf die Rohrwandung fallen kann. In einigen Fällen werden darüber hinaus Düsen im Freilauf stark beschleunigt, um Verstopfungen zu lösen, und dabei ein unkontrolliertes Auftreffen auf die Rohrwandung bzw. die seitlichen Anschlüsse in Kauf genommen (vgl. Abschnitt 4.2).

5.1 Problemstellung und Vorgehensweise

Im Rahmen der betriebsüblichen Reinigung und Inspektion ist offen, ob Rohrschäden tatsächlich mit früheren HD-Reinigungen in Verbindung gebracht werden können. Naturgemäß liegen kaum Erkenntnisse zum Zustand des Netzes unmittelbar vor der Reinigung vor. So ist unklar, inwieweit bereits Belastungen aus Einbau, Bodenbewegungen und Alterungsprozessen zu Schäden geführt oder Schäden durch HD-Reinigung begünstigt haben. **Ziel** der nachfolgend dargestellten Untersuchungen ist es daher, kritische Belastungssituationen mit Schadensrisiken zu erkennen und Empfehlungen für eine schonende HD-Reinigung abzuleiten. Hierzu werden zunächst die wesentlichen Grundbelastungsarten aus HD-Reinigung identifiziert und entsprechende Prüfaufbauten zur kontrollierten Nachbildung typischer Belastungen ausgewählt bzw. weiterentwickelt. Die Wirkung verschiedener Belastungen wird dann unter Einsatz zahlreicher der heute am Markt vertriebenen Rohrprodukte beobachtet. Im Ergebnis werden die grundsätzliche Aussagekraft und Praxisnähe der eingesetzten Prüfmethode bewertet, die in der Prüfung beobachteten Materialveränderungen auf kritische Reinigungssituationen und -parameter zurückgeführt und Ansatzpunkte für eine schonende Reinigung identifiziert.

Um einen Einfluss von Alterungseffekten oder Vorschädigungen durch Bau- und Betriebsbelastungen auf die Prüfergebnisse auszuschließen, wurden in den Laboruntersuchungen Neurohre eingesetzt. Neben einem definierten Ausgangszustand vor der Prüfung konnten so auch gezielt verschiedene Rohrwerkstoffe und -geometrien in den Versuchsreihen berücksichtigt werden. Vor diesem Hintergrund sei ausdrücklich darauf hingewiesen, dass die Ergebnisse nicht

zur allgemeinen Quantifizierung von Versagensgrenzen (z.B. Druck, Durchfluss) einzelner Werkstoffe dienen. So lassen die unterschiedlichen Werkstoffrezepturen, Herstellverfahren und Anschluss- bzw. Verbindungssysteme der heutigen Produkthanbieter eine werkstoffbezogene Verallgemeinerung einzelner Prüfergebnisse nicht zu.

Insgesamt wurden in den Versuchen wechselnde Reinigungssituationen und Randbedingungen berücksichtigt (vgl. Bild 119). So wird die Belastung durch Hochdruckstrahlen nicht allein von Parametern wie Druck und Durchfluss, sondern auch durch die Ablagerungssituation und Anzahl der Reinigungszyklen beeinflusst. Die Form des Düsenkörpers und der Düseneinsätze wiederum bestimmt maßgeblich die Strahleigenschaften.

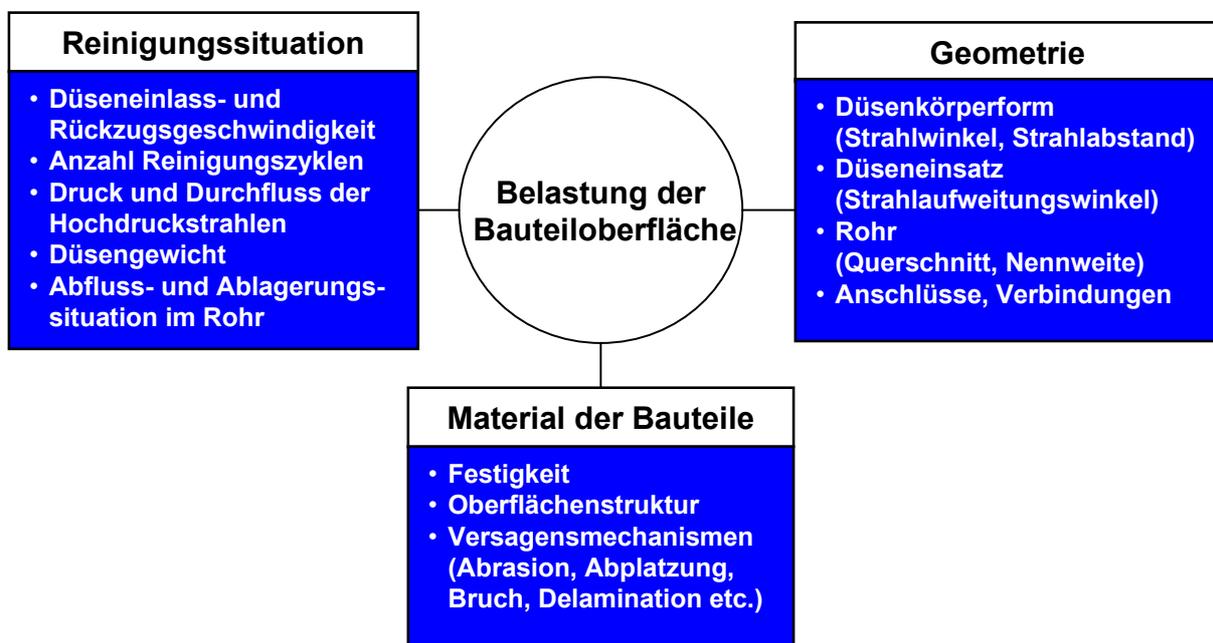


Bild 119: Einflüsse auf die Belastungssituation der Kanalbauteile während der HD-Reinigung

Im Rahmen der nachfolgenden Darstellungen werden zunächst die Reinigungssituationen der Praxis auf Grundbelastungsfälle zurückgeführt und unter Berücksichtigung typischer Belastungssituationen entsprechende Versuchskonzepte ausgewählt bzw. weiterentwickelt. Die Ergebnisse der Belastungsversuche werden hinsichtlich der ggf. aufgetretenen Veränderungen am Bauteil und kritischen Belastungssituationen ausgewertet. Abschließend werden die eingesetzten Prüfverfahren auf Grundlage der Versuchserfahrungen bewertet und sämtliche Ergebnisse zu Reinigungsempfehlungen zusammengefasst.

5.2 Grundbelastungen und Versuchskonzept

Als Ausgangspunkt für eine differenzierte Betrachtung der vielfältigen Belastungsszenarien, die während der Hochdruckreinigung auf das Rohrmaterial wirken können, werden in Tabelle 33 zunächst **fünf Grundbelastungsarten** eingeführt, die in Abhängigkeit der örtlichen Reinigungssituation in ihrer Stärke und Intensität variieren können.

Tabelle 33: Grundbelastungsarten für die Rohroberfläche bei der HD-Reinigung

A) HD-Strahl	HD - Wasserstrahlen treffen auf die Rohroberfläche
	Die aus der HD-Düse austretenden Wasserstrahlen treffen auf die Ablagerungen an der Rohrwand oder in ablagerungsfreien Bereichen unmittelbar auf die Rohroberfläche.
B) Feststoffe	Feststoffpartikel aus Ablagerungen treffen auf die Rohroberfläche
	Aus den aufgewirbelten Ablagerungen werden Feststoffpartikel beschleunigt und treffen mit hoher Geschwindigkeit ebenfalls auf die Rohroberfläche.
C) Schleifen	Schleifen von Düse und Schlauch über die Rohroberfläche
	Schlauch und Düse werden entweder durch die Umlenkung des Wasserstrahls im Düsenkörper oder mittels Winde über die Kanaloberfläche gezogen.
D) Fallen	Fall einer schwebenden Düse auf die Rohrsohle
	Der Düsenkörper selbst kann während des Reinigungsvorganges schweben bzw. abheben und auf die Rohroberfläche fallen.
E) Prallen	Prall einer stark beschleunigten Düse gegen die Rohrwandung
	Im Extremfall kann eine Düse durch Fehlverhalten des Bedienpersonals so stark beschleunigt werden, dass sie unkontrolliert gegen die Rohrwandung oder auch gegen seitliche Anschlüsse prallt.

In Abhängigkeit der örtlichen Reinigungssituation treten Kombinationen aus diesen Grundbelastungsarten mit unterschiedlicher Gewichtung auf. Bei der Intensiv-Reinigung zur Vorbereitung einer Sanierungsmaßnahme steht bspw. die Belastung durch den **HD-Wasserstrahl** (Tabelle 33, Fall A) im Vordergrund. Im Vergleich dazu gewinnt die Belastung aus beschleunigten **Feststoffpartikeln** (Tabelle 33, Fall B) besonders stark bei der Beseitigung von großen Ablagerungsmengen mit scharfkantigem Grobkorn (z.B. aus Einspülungen von Winterstreusplitt oder Schottermaterial von Baumaßnahmen) an Bedeutung.

Die Rohrsohle wird durch das **Schleifen** von Schlauch und Düsenkörper durch die Kanalhaltung verfahrensbedingt kontinuierlich mechanisch belastet. Darüber hinaus ist jedoch auch eine impuls- bzw. stoßartige Belastung des Rohres durch den Düsenkörper denkbar. Insbesondere bei Unebenheiten in der Rohrsohle (Muffenversätze u.ä.) und bewegungsempfindlichen Düsenkörpern (vgl. Abschnitt 4.2) kann die Anwendung extremer Reinigungsparameter grundsätzlich auch zum Abheben des Düsenkörpers mit anschließendem **Fallen** auf die Rohrsohle (z.B. bei Rücknahme des Wasserdrucks) führen (vgl. Abschnitt 3.5). Dies bestätigten auch die weiterführenden Laborversuche (vgl. Abschnitt 4.2).

Die Praxiserfahrungen der Netzbetreiber zeigten darüber hinaus, dass die Düsen zum Beispiel zur Verstopfungsbeseitigung durch unsachgemäßen Freilauf der Schlauchführung und Anwendung extremer Reinigungsparameter stark beschleunigt werden. Hier besteht das Risiko, dass der Düsenkörper durch den HD-Strahl getrieben mit hoher Geschwindigkeit auf die Rohrwandung und Anschlüsse auftrifft (vgl. [55]). Dieses **Prallen** einer extrem beschleunigten Düse auf die Rohrwandung (Tabelle 33, Fall E) kann somit grundsätzlich auf Anwendungsfehler des Bedienpersonals zurückgeführt werden und ist durch geeignete Betriebsmaßnahmen entsprechend auszuschließen.

In Tabelle 34 wird der Einfluss der o.a. Grundbelastungsarten für die verschiedenen Reinigungssituationen auf Basis der im Kapitel 3 bzw. Kapitel 4 dargestellten Praxiserfahrungen und Untersuchungen zur Düsenwirkung qualitativ bewertet.

Tabelle 34: Reinigungssituationen und Grundbelastungsarten (vgl. Tabelle 33), Bewertung auf Basis von Praxiserfahrungen

Reinigungssituation 	geprägt durch (- nicht, • gering, •• mittel, ••• stark)				
	HD-Strahl	Feststoff	Schleifen	Fallen	Prallen
Unterhaltungsreinigung im Rahmen der betrieblichen Wartung des Kanalnetzes oder zur Vorbereitung einer Inspektion.	••	••	•	-	-
Häufiges Reinigen , z.B. von Haltungen mit hohem Ablagerungsaufkommen.	•••	•••	•••	-	-
Grobe, ggf. scharfkantige Inhaltsstoffe , z.B. Winterstreusplitt oder Schottermaterial aus Baumaßnahmen.	••	•••	••	-	-
Intensiv-Reinigung , z.B. bei Inkrustationen, Wurzeleinwuchs oder zur Vorbereitung von Sanierungsmaßnahmen, auch mit extremen Reinigungsparametern (Druck, Durchfluss, Strahl u.a.).	•••	••	•	-	-
Stillstand des Düsenkörpers , im Spülbetrieb, z.B. bei der Beseitigung von Verstopfungen oder Störung der Schlauchabwicklung.	•••	•	•	-	-
Übersteuerte Hochdruckstrahlen , z.B. durch verstopfte Düseneinsätze oder ungeeignete Abstimmung des Durchmessers der Düseneinsätze auf Pumpenleistung, Schlauchlänge und Düsentyp, auch mit extremen Strahleigenschaften, z.B. hinsichtlich Druck, Durchfluss und Strahlwinkel.	•••	•	•	•	-
Freilauf einer Düse zum „Durchstoßen“ einer Verstopfung, ggf. auch unplanmäßiger Düsen-Freilauf bei Unachtsamkeit des Bedienpersonals.	•	•	•••	••	•••
Extreme Einlass- und Rückzugsgeschwindigkeiten , >> 30 m/min, insbesondere zur Verringerung des Zeitaufwandes für die Reinigung ohne Rücksicht auf den Kanalzustand und mögliche Belastungen der Bausubstanz durch den Düsenkörper.	•	•	•••	••	•
Aufschlagen des Düsenkörpers , z.B. beim Herablassen der Düse in den Schacht und Einschwenken in die Haltung.	-	-	-	•••	-

Um den Einfluss sämtlicher in Tabelle 33 dargestellter Grundbelastungsarten weitgehend reproduzierbar nachempfinden zu können, wurden fünf unterschiedliche Prüfmethode angewendet (Tabelle 35). Im Mittelpunkt standen dabei die Systemversuche nach dem Hamburger Modell [40], da hier gleichzeitig drei Grundbelastungsarten mit wesentlichem Einfluss für die Standard-Reinigungssituation praxisnah simuliert werden. Dabei wird das Gesamtsystem aus Rohren, Rohrverbindungen, Anschlussformteilen und Anschlüssen durch Düse und Schlauch, auftreffende Wasserstrahlen und aufgewirbeltes Räumgut belastet.

Tabelle 35: Versuchsmethoden, Übersicht

Untersuchungsschwerpunkt (vergleichende Versuche)	
	HD-Systemversuch (Hamburger Spülversuch)
	<p>Methode: Rohrstrecken mit mind. 3 Verbindungen und 4 Zuläufen werden oberirdisch auf einer Länge von 20 m aufgebaut und anschließend durch Hochdruckreinigung praxisnah, ggf. unter Zugabe von Splitt belastet.</p> <p>Belastungsschwerpunkt: HD-Strahl, Feststoffe und Düsen-Schleifen</p>
Zusatzversuche	
	Düsen-Strahlversuch mit Einzelstrahl
	<p>Methode: Ein einzelner HD-Strahl wird fünfzig Mal in einem geringen Abstand über einen Abschnitt aus zwei kurzen Prüfrohren geführt.</p> <p>Belastungsschwerpunkt: Hochdruckstrahl</p>
	Düsen-Strahlversuch mit Spüldüse
	<p>Methode: Prüfrohre werden während des Spülvorgangs durch eine Vor- und Rückwärtsbewegung eines schwenkbaren Auflagetisches an einer handelsüblichen HD-Düse fünfzig Mal entlang geführt.</p> <p>Belastungsschwerpunkt: Hochdruckstrahl und Düsen-Schleifen</p>
	Düsen-Schleifversuch
	<p>Methode: Prüfrohre werden im Trockenversuch durch eine Vor- und Rückwärtsbewegung eines schwenkbaren Auflagetisches an einer praxisüblichen HD-Düse fünfzig Mal entlang geführt.</p> <p>Belastungsschwerpunkt: Düsen-Schleifen</p>
	Düsen-Fallversuch
	<p>Methode: Prüfrohre werden durch den Fall einer handelsüblichen Düse (4,5 kg) belastet. Die Düse wird in Rohren DN 300 bis zum Scheitel gehoben und dann auf die Sohle fallen gelassen.</p> <p>Belastungsschwerpunkt: Düsen-Fallen</p>

Im Rahmen des Untersuchungsprogramms wurden HD-Systemversuche einerseits unter identischen Bedingungen als vergleichende HD-Systemversuche und andererseits unter wechselnden Einflüssen als Zusatzversuche ausgeführt. Weitere Zusatzversuche (Düsen-Strahl, -Schleif- und Fallversuche) dienten der weitgehend isolierten Betrachtung einzelner Einflussfaktoren (Schleifen, HD-Einzelstrahl) bzw. der Variation der Reinigungsbedingungen, Reinigungszyklen und Düseneigenschaften (Düsenstrahl und -winkel).

5.3 Prüfmethoden

5.3.1 HD-Systemversuche

Die **praxisnahen HD-Systemversuche** wurden in Anlehnung an den sog. „Hamburger Spülversuch“ [40] durchgeführt. Dazu wurden durch die Rohrhersteller oder durch von diesen empfohlene Fachfirmen von jedem der geprüften Rohrprodukte zwischen einer und acht Rohrstrecken mit einer Länge von ca. 20 m aufgebaut. Jede Rohrstrecke verfügte über mindestens drei Rohrverbindungen und mehr als drei seitliche Zuläufe (Anschlussstutzen/Abzweig). Für die Versuchsdurchführung wurden heute übliche Reinigungsfahrzeuge, Spülschläuche und -düsen eingesetzt (Bild 120). Diese Versuche sind charakterisiert durch einen Druck von 120 bar an der Düse und einen Durchfluss von 320 l/min. Das Rohrsystem wurde mit 1 m/sec Einlass- und 0,1 m/sec Rückzugsgeschwindigkeit belastet. Dies sind Betriebsbedingungen, die bei üblichen Kanalreinigungssystemen (Pumpe, Schlauch, Düse) im oberen Leistungsbereich auftreten können (vgl. Abschnitt 3.3). Darüber hinaus kann Prüfgeschlebe zugegeben werden, dass durch die Hochdruckwasserstrahlen und die mitgerissene Luft beschleunigt wird, auf die Rohrwandung schlägt und schließlich aus den Prüfrohren geschleudert wird. Dadurch sollen mit der Praxis vergleichbare Geschlebewirkungen an den Rohrwandungen, den Rohrverbindungen und an den Zuläufen simuliert werden. Alle Rohrstränge wurden auch einer punktuellen Dauerbelastung (stationäre Prüfung) ausgesetzt. Dabei wurde für jeden zu prüfenden Rohrstrang die arbeitende Düse an drei Stellen angehalten und die Rohrleitung jeweils über drei Minuten stationär belastet. Die drei Stellen wurden so ausgewählt, dass ein Rohrstoß, ein Seitenzulauf und ein Rohrschaft auf ihre Belastbarkeit geprüft wurden (vgl. Bild 122).

Es wurden einerseits vergleichende HD-Systemversuche und darüber hinaus HD-Systemversuche als Zusatzversuche durchgeführt.

Die **vergleichenden HD-Systemversuche** unterlagen auch hinsichtlich Düsentyp und Reinigungsanzahl identischen Versuchsrandbedingungen. Eingesetzt wurde eine rundumstrahlende, achtstrahlige Düse mit einem Abstrahlwinkel von 30° (Prüfdüse D1 (8 x 30°), s. Tabelle 36). Es wurden 50 Reinigungszyklen (Vor- und Rückzugsbewegung der Düse) aufgebracht. Dies entspricht der Häufigkeit an Spüldurchgängen, die eine Abwasserleitung während einer Lebensdauer von 50 Jahren bei einer jährlich durchgeführten Reinigung erfährt. Im Falle einer Geschlebezugabe wurden in den vergleichenden HD-Systemversuchen grundsätzlich 5 Liter Kalkstein-Edelsplitt (1 - 5 mm) je Reinigungszyklus zugegeben.

In ergänzenden **Zusatzversuchen** wurden, je nach zu erwartendem Erkenntnisgewinn, weitere Düsensysteme (D2, D4) unter wechselnden Geschlebezugaben (0, 5 und 20 Liter) und Prüfzyklenzahlen (30, 50 und 60) eingesetzt. Die Düsen D2 und D4 sind zehnstrahlig mit Abstrahlwinkeln von 10°, 20°

und 30°. Der HD-Einzelstrahl dieser Düsen ist aufgrund des geringeren Förderstroms an den einzelnen Düseneinsätzen und des flacheren Auftreffens auf die Rohrwandung als weniger aggressiv einzuschätzen (vgl. Abschnitt 4.5).



Bild 120: Prüfsituation: Rohrstrangprüfung



Bild 121: 90° Abzweig während der Prüfung



Bild 122: Stat. Belastung durch 3-minütigen Stillstand der Düse an einer Stelle



Bild 123: 8-strahlige Düse am Hochpunkt der Haltung

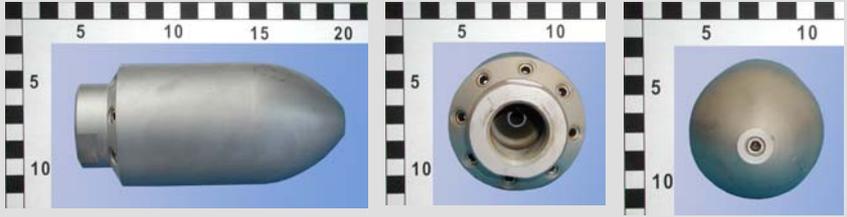
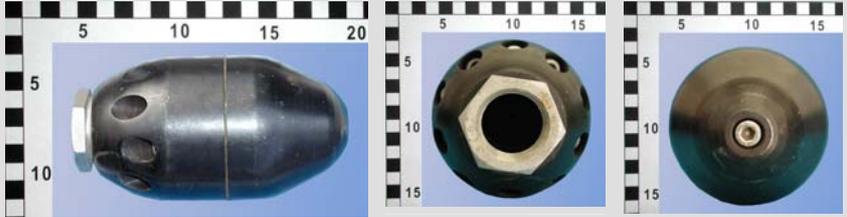


Bild 124: Einfüllen des Prüfgeschiebes



Bild 125: Prüfgeschiebe aus Kalkstein-Edelsplitt

Tabelle 36: Gewählte Prüfparameter, vgl. [40]

HD-Systemversuche	Prüfparameter
	
Düse	
Druck an der Düse	(120 ± 3) bar
Durchfluss	ca. 320 l/min
Abstrahlwinkel	30°, 10°/20° und 20°/30° (3 Prüfdüsen, siehe Bilder unten, vgl. Abschnitt 4.2)
Anzahl der Düseneinsätze	8, 10
∅ Düseneinsätze	2,2 mm, 2,3 mm und 2,8 mm
Vorlaufgeschwindigkeit	1,0 m/s
Rückzugsgeschwindigkeit	0,1 m/s
Prüfgeschiebe	
Art	Winterstreusplitt, gebrochenes Material, Korngröße 2 - 5 mm
Menge	0 Liter, 5 Liter oder 20 Liter je Spüldurchgang
Prüfhaltung	
Prüfstrecke	ca. 20,0 m
Durchmesser	DN 300
Rohrstöße	≥ 3
Hausanschlüsse	4 (2 im Scheitel, 2 im Kämpfer) DN 150
Allgemeines	
Anzahl Reinigungszyklen	50, bzw. bei 20 Liter Splittzugab 60 Zyklen
Stationäre Belastung	durch Stillstand der Düse (jeweils 3 Minuten) an drei Stellen
Prüfdüse D1 8 Düseneinsätze 30° Strahlwinkel	
Prüfdüse D2 10 Düseneinsätze abwechselnd 20° und 30° Strahlwinkel	
Prüfdüse D4 10 Düseneinsätze abwechselnd 10° und 20° Strahlwinkel	

Der Zustand der Probekörper wurde umfassend dokumentiert. Bereits nach Anlieferung wurden optische Kontrollen der Lieferqualität durchgeführt. Die Rohrstöße und die Seitenzuläufe an den Abzweigen wurden kontrolliert und bei Bedarf fotografiert. Nach Aufbau des Rohrsystems wurde der Ausgangszustand vor der Belastung durch eine TV-Inspektion dokumentiert. Um Zustandsänderungen nach dem Aufbringen der Prüfbelastungen frühzeitig erkennen und deren Entwicklung beobachten zu können, wurde jeweils nach 30, 50 bzw. 60 Reinigungszyklen erneut mittels Schwenkkopf-Kamera inspiziert (Bild 126). Zusätzlich wurden einzelne auffällige Rohrabschnitte nach Abschluss der Prüfungen aufgetrennt, um Materialveränderungen an den Rohrinnenflächen, Rohrstößen und Seitenzuläufen vermessen und detailliert dokumentieren zu können (Bild 127).



Bild 126: Inspektion mit TV-Kamera



Bild 127: Inaugenscheinnahme der Probekörper nach Abschluss der Prüfung

5.3.2 Düsen-Strahlversuche mit HD-Einzelstrahl

Um das Materialverhalten von verschiedenen Rohrprodukten unter extremer Belastung eines Hochdruck-Einzelstrahls zu betrachten, wurden als **Zusatzversuche** im Auftrag des IKT, Gelsenkirchen in der Versuchsanlage der iro GmbH in Oldenburg Rohre der Nennweite DN 300 in Anlehnung an die Vornorm DIN V 19517 [42] geprüft [60] (Bild 128, Bild 129).

Dabei wurde entsprechend [42] grundsätzlich unterschieden zwischen einer

- Prüfung mit stationärer Düse und
- Prüfung mit beweglicher Düse.



Bild 128: Versuchsstand der iro GmbH [60]



Bild 129: Belastung durch einen Hochdruck-Einzelstrahl (stationär)

Im Rahmen der **Prüfung mit stationärer Düse** wirkt über eine eigens hergestellte Prüfdüse ein Hochdruckwasserstrahl jeweils für die Dauer von drei Minuten auf einen der insgesamt zehn Prüfpunkte der Rohrrinnenfläche. Der Düsendruck wird dann in Intervallen solange gesteigert, bis wesentliche Materialveränderungen bzw. Schädigungen auftreten. Die Prüfung wird an einem Probekörper, bestehend aus einem Rohr ohne Abzweig und ohne Muffe der Nennweite DN 300, von mindestens 1,00 m Länge durchgeführt. In Tabelle 37 werden die Prüfkriterien mit stationärer Düse zusammengefasst. Zwischenzeitlich wurde diese Prüfung in der aktuellen europäischen Normungsentwicklung zurückgezogen [45], so dass im Folgenden auf eine Darstellung verzichtet wird.

Bei der **Prüfung mit beweglicher Düse** wird mit einer eigens hergestellten Prüfdüse ein Einzelstrahl über die Innenfläche des Prüfkörpers (Rohrrinnenfläche), bestehend aus einem Rohr der Nennweite DN 300 von mindestens 1,80 m Länge und einem Abzweig, einschließlich Rohrverbindung mit Dichtungsmitteln, bewegt. Dieser Vorgang wird 50 Mal in gleicher Spülspur wiederholt. In Tabelle 37 werden die Randbedingungen der Prüfung mit beweglicher Düse zusammengefasst.



Bild 131: Pipe-Tester: Belastungsprüfung



Bild 132: Prüfdüse liegt im Rohr frei auf

Im Rahmen der Düsen-Strahlversuche mit HD-Spüldüse wurde wie bei den HD-Systemprüfungen hauptsächlich die achtstrahlige Prüfdüse D1 mit 30° Abstrahlwinkel eingesetzt. Daneben kamen die 10-strahlige Prüfdüse D2 zum Einsatz, um auch den Einfluss geringerer Förderströme im Einzelstrahl hinsichtlich der Rohrbeanspruchung beobachten zu können. Um die wiederholte Kanalreinigung über die Nutzungsdauer nachzuempfinden, wurde der Spülvorgang 50 Mal wiederholt, jedoch ohne Splittzugabe.

Tabelle 38: Prüfparameter HD-Düsenstrahlversuch mit HD-Spüldüse

 HD-Düsenstrahlversuch	Prüfparameter
Druck an der Düse	(120 ± 3) bar
Durchfluss	ca. 320 l/min
Abstrahlwinkel	30°, 10°/20°, 20°/30° und 20° (4 Prüfdüsen, siehe Bilder unten, vgl. auch Abschnitt 4.2)
Anzahl der Düseneinsätze	8, 10
Ø Düseneinsätze	2,2 mm, 2,3 mm und 2,8 mm
Schwenk-Geschwindigkeit	0,1 m/s
Prüfkörper	2 Kurzrohre (Länge jeweils ca. 1 m), 1 Verbindung, 1 Abzweig
Anzahl Reinigungszyklen	50 bis 60
Prüfdüse D1 8 Düseneinsätze 30° Strahlwinkel	
Prüfdüse D2 10 Düseneinsätze abwechselnd 20° und 30° Strahlwinkel	

5.3.4 Schleifversuche

Im Rahmen von Zusatzversuchen wurde durch Schleifversuche allein die mechanische Belastung infolge eines Düsenkörpers, der über die Rohrsohle und Rohrverbindung schleift, nachempfunden. Dazu wurde die Versuchseinrichtung „Pipe-Tester“ [44] ähnlich wie in den Spülversuchen nach Abschnitt 5.3.3 genutzt, allerdings in diesem Fall ohne Wasserdruck an der Düse. Die eingesetzten Rohre (2 Kurzrohre und 1 Verbindung) wurden durch eine Vor- und Rückwärtsbewegung des Auflagetisches mit einer Geschwindigkeit von 0,1 m/sec an der Prüfdüse D1 entlang geführt. Vor der Schleifbewegung wurde die Rohrsohle mit Wasser benetzt. Nach 50 Schwenkzyklen wurden die Rohre hinsichtlich optisch feststellbarer Beanspruchungsspuren überprüft.



Bild 133: Vorbereitung des Versuchs im Pipe-Tester



Bild 134: Prüfdüse D1 im Rohr

5.3.5 Düsen-Fall-Versuche

Im Rahmen der vorliegenden Untersuchungen wurde festgestellt, dass Düsen in Ausnahmesituationen an der Rohrwandung hochwandern bzw. auch im Rohr schweben können (vgl. Abschnitt 4.2). Dies kann von dem Bedienpersonal nicht immer erkannt bzw. vermieden werden. Bei einem plötzlichen Druckabfall ist der Fall der Düse auf die Rohrwandung denkbar. Die Auswirkungen eines einzelnen Falls der Düse auf die Rohrwandung wurden daher im Rahmen weiterer Zusatzversuche beobachtet. In den Versuchen wurde eine handelsübliche rundumstrahlende Düse (D1) mit einem Gewicht von 4,5 kg im Rohr 50 cm vor der Rohrverbindung bis zum Rohrscheitel (DN 300) angehoben und fallengelassen. Um dabei die Praxis realitätsnah nachzuempfinden, wurde die Düse an einen Hochdruckspülschlauch aus Gummi DN 32 angeschlossen. Nach dem Fall der Düse wurden die Auftrefffläche betrachtet und Veränderungen dokumentiert (vgl. Bild 135 und Bild 136).



Bild 135: Fall-Versuch: Anheben der Düse



Bild 136: Fall-Versuch: Dokumentation

Um auch mögliche Einflüsse der Bettung des Rohres bei der Versuchsdurchführung zu berücksichtigen, wurden im Fall offensichtlicher Materialveränderungen bis zu drei unterschiedliche Versuchsaufbauten ausgeführt:

➤ **Linienlagerung:**

Einbau in ein v-förmiges Auflager (Öffnungswinkel $150^\circ \pm 3^\circ$), d.h. das Rohr wurde am Rohrumfang in Anlehnung an DIN EN 1916 [61] zweifach linienförmig gelagert.

➤ **Sandbettung:**

Einbau in ein v-förmiges Auflager (Öffnungswinkel $150^\circ \pm 3^\circ$), mit Sandbettung in Anlehnung an DIN EN 1610 [62]. Der Probekörper wurde durch die Sandbettung auf der gesamten Länge unterstützt.

➤ **Überschüttung:**

Einbau in ein v-förmiges Auflager, mit Sandbettung in Anlehnung an DIN EN 1610 und Sandüberschüttung.

5.4 Ergebnisse

5.4.1 Produktauswahl und Prüfprogramm

Im Rahmen des Forschungsprojektes wurden neue marktübliche Rohrprodukte den in Tabelle 35 dargestellten Prüfbelastungen ausgesetzt. Im Vordergrund standen dabei das Erkennen von Rohrveränderungen unter üblichen Belastungsbedingungen, die Bewertung der Prüfmethode hinsichtlich ihrer Aussagekraft für die Praxis und die Erarbeitung von Reinigungsempfehlungen für den Kanalbetrieb. Maßgebend für die Auswahl der Rohrprodukte war die Verbreitung der entsprechenden Werkstoff-Gruppen in den Kanalnetzen (vgl. Bild 137), die Verfügbarkeit am Markt und das Interesse der Fachwelt an weiterführenden Erkenntnissen.

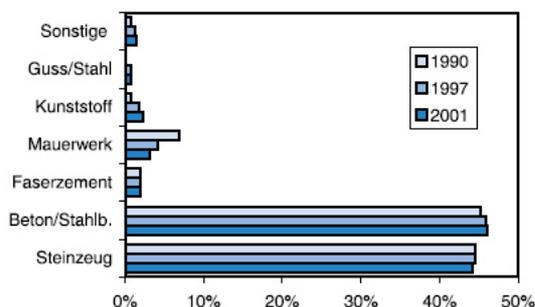


Bild 137: Verbreitung der Rohrwerkstoffe im bundesdeutschen Kanalnetz unter Berücksichtigung der zeitlichen Entwicklung (von 1990 bis 2001), aus [26]

Eingesetzt wurden klassische Kanalrohrwerkstoffe wie Beton und Steinzeug mit zusammen 90 % Netzbestand. Darüber hinaus wurden Produkte aus Guss, GFK, PE-HD (vollwandig/profiliert) und PVC (mehrschichtig) einbezogen (vgl. Tabelle 39). Zum Einsatz kamen Rohre der Nennweite DN 300 (vgl. [41], [42], [44], Abs. 2.4).

Tabelle 39: Übersicht zu den untersuchten Rohrprodukten der Kreisprofile DN 300

Nr.	Rohrtyp/Werkstoff/Geometrie	Hersteller	Technische Lieferbedingungen
1	Betonrohre, mit Fuß	Bellinghausen Kanalrohr GmbH	DIN 4032 [63]* ¹ und FBS-Qualitätsrichtlinie [64]
2	Betonrohre, mit Fuß, wandverstärkt (HD-Systemversuche)	Berding Beton GmbH	DIN 4032 [63] * ¹ und FBS-Qualitätsrichtlinie [64]
3	glasierte Steinzeugrohre	Steinzeug Abwassersysteme GmbH	DIN EN 295 [65] und WN 295 [66]
4	glasierte Steinzeugrohre	EuroCeramic GmbH	DIN EN 295 [65] und WN 295 [66]
5	Duktile Gussrohre mit Tonerdezementauskleidung	SAINT-GOBAIN GUSSROHR GmbH & Co. KG	DIN EN 598 [67]
6	Geschleuderte GFK-Rohre (Glasfaserverstärkter Kunststoff)	Hobas Rohre GmbH	DIN 16869 Teil 1 [68] und Teil 2 [69] sowie DIN 19565 [70]
7	Gewickelte GFK-Rohre (Glasfaserverstärkter Kunststoff)	Amitech Germany GmbH	DIN 16868 Teil1 [71] und Teil 2 [72] sowie DIN 19565 [70]
8	Vollwandrohre aus PE-HD (Polyethylen hoher Dichte)	AGRU FRANK GmbH	DIN 19537 Teil 1 [73], Teil 2 [74], DIN 8074 [75] und DIN 8075 [76]
9	Vollwandrohre aus PE-HD (Polyethylen hoher Dichte)	egeplast Werner Strumann GmbH	DIN 19537 Teil 1 [73], Teil 2 [74], DIN 8074 [75] und DIN 8075 [76]
10	Profilierete Kunststoffrohre aus PE-HD (Polyethylen hoher Dichte)	Henze GmbH	DIN 16961 [77] u. Entw. DIN 19568 - 100 [78], (prEN 13476, Teil 1 [79])
11	Profilierete Kunststoffrohre aus PE-HD (Polyethylen hoher Dichte)	FRANK & KRAH Wickelrohr GmbH	DIN 16961 [77] u. Entw. DIN 19568 - 100 [78], (prEN 13476, Teil 1 [79])
12	Rohre aus PVC-U, mehrschichtig mit glatter Oberfläche	Funke Kunststoffe GmbH	prEN 13476 T.1 (Wandaufbau) [79] DIN EN 1401 T.1 (Maße) [80]

*¹ teilweise ersetzt durch DIN EN 1916 [81], die Anwendung erfolgt in Deutschland zusammen mit der DIN V 1201 [82]

Die in den einzelnen Versuchen eingesetzten Produkttypen und die Anzahl der jeweiligen Prüfungen sind in Tabelle 40 zusammengefasst.

Tabelle 40: Anzahl der Versuche nach Rohrprodukten und Prüfmethoden

Prüfmethode	HD- Systemversuch					Düsen-Strahlversuch			Düsen-Schleifversuch	Düsen-Fallversuch
						Einzelstrahl 	Spüldüse 			
Prüfdüse (vgl. Abschn. 4.2)	D1		D2		D4	D20	D1	D2	D1	D1
Belastungszyklen [Anz.]	50	50	50	30	60	50	50	50	50	1
Spültzugabe [Liter/Zyklus]	0	5	0	0	20	0	0	0	0	0
BETON ¹	2	1	-	-	-	-	-	-	-	3
BETON ²	-	-	-	-	2	3	-	-	-	-
gesamt (vgl. Abschn. 5.4.2)	2	1	-	-	2	3	-	-	-	3
STEINZEUG ³	2	1	-	-	1	3	5	-	4	8
STEINZEUG ⁴	-	-	-	-	1	-	-	-	-	3
gesamt (vgl. Abschn.5.4.3)	2	1	-	-	2	3	5	-	4	11
GUSS ⁵	2	1	-	-	2	3	6	-	7	3
gesamt (vgl. Abschn.5.4.4)	2	1	-	-	2	3	6	-	7	3
GFK ⁶	2	2	1	1	-	2	3	4	2	3
GFK ⁷	2	-	-	1	-	-	-	5	-	7
gesamt (vgl. Abschn.5.4.5)	6	2	1	-	2	3	9	2	8	6
PE-HD vollwandig ⁸	2	1	-	-	-	-	-	-	-	-
PE-HD vollwandig ⁹	-	-	-	-	2	3	-	-	-	3
PE-HD profiliert ¹⁰	2	1	-	-	-	-	4	-	3	3
PE-HD profiliert ¹¹	1	1	-	-	-	-	-	-	-	-
gesamt (vgl. Abschn.5.4.6)	5	3	-	-	2	3	4	-	3	6
PVC-U mehrschichtig ¹²	2	1	-	-	-	-	-	-	-	3
gesamt (vgl. Abschn. 5.4.7)	2	1	-	-	-	-	-	-	-	3

ROHRHERSTELLER: ¹ Bellinghausen Kanalrohr GmbH, ² Berding Beton GmbH (Werk ehemals: Westrohr GmbH), ³ Steinzeug Abwassersysteme GmbH, ⁴ EuroCeramic GmbH, ⁵ SAINT-GOBAIN GUSSROHR GmbH & Co. KG, ⁶ Hobas Rohre GmbH, ⁷ Amitech Germany GmbH, ⁸ AGRU FRANK GmbH, ⁹ egeplast Werner Strumann GmbH, ¹⁰ Henze GmbH, ¹¹ FRANK & KRAH Wickelrohr GmbH (verschiedene Wanddicken), ¹² Funke Kunststoffe GmbH

- nicht untersucht

■ **Vergleichende Systemversuche**

■ **Wiederholungsversuche** dienen der Bestätigung bzw. Relativierung von Einzelbeobachtungen an demselben oder einem anderen Produkt der gleichen Werkstoffgruppe.

□ **Zusatzversuche** dienen der isolierten Betrachtung von Einflussfaktoren (Schleifen, HD-Einzelstrahl) und Variation der Reinigungsbedingungen, wie Ablagerungsmenge, Reinigungszyklen und Düseneigenschaften (Düsenstrahl und -winkel).

Um zunächst grundsätzliche Unterschiede im Materialverhalten zu erkennen, wurden für jeweils ein Produkt einer Produktgruppe **vergleichende HD-Systemversuche** durchgeführt. HD-Systemversuche zeichnen sich durch ihre ganzheitliche Belastungssituation aus. So werden sämtliche Bauteile (Rohre, Verbindungen, Anschlüsse) durch praxisübliche Reinigungsstrahlen belastet und die Auswirkungen der mechanischen Einwirkung des Düsenkörpers (Schleifen) sowie ggf. von

Feststoffpartikeln (Geschiebe) praxisnah simuliert. Für die vergleichend untersuchten Produkte 1, 3, 5, 6, 8, 10 und 12 wurden drei **vergleichende HD-Systemversuche** mit identischen Versuchsrandbedingungen durchgeführt (vgl. Tabelle 40, schwarz unterlegt). Dabei wurden die Rohrstrecken grundsätzlich durch 50 Reinigungszyklen (Vor- und Rückzugsbewegung der Düse) belastet. Dies entspricht der Häufigkeit an Spüldurchgängen, die eine Abwasserleitung während einer Lebensdauer von 50 Jahren bei einer jährlich durchgeführten Reinigung erfährt. Um den Einfluss von Geschiebe auf das Materialverhalten zu beobachten, wurde einer der drei vergleichenden HD-Systemversuche mit Zugabe von 5 Liter Kalkstein-Edelsplitt (1 - 5 mm) bei jedem Reinigungszyklus durchgeführt.

Die **wiederholenden HD-Systemversuche** unter Einsatz der Produkte 6, 7 und 11 (vgl. Tabelle 40, grau unterlegt) dienen der Bestätigung bzw. Relativierung von Einzelbeobachtungen aus den *vergleichenden HD-Systemversuchen* an demselben oder einem anderen Produkt der gleichen Werkstoffgruppe.

Die **Zusatzversuche** an den Produkten 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 9, 10 und 12 (vgl. Tabelle 40, ohne Farunterlegung) dienen der isolierten Betrachtung von Einflussfaktoren (HD-Einzelstrahl, Schleifen, Fallen) und der Variation der Reinigungsbedingungen, wie Ablagerungsmenge, Reinigungszyklen und Düseneigenschaften (Düsenstrahl und -winkel).

In den nachfolgenden Abschnitten werden die eingesetzten Produkte und Versuchsergebnisse detailliert beschrieben. Der maßgebliche Ort der jeweiligen Materialveränderung wird den Kategorien Rohrschaft, Rohrverbindung und Abzweig zugeordnet. Im Falle eines deutlichen Materialabtrags ist dessen maximale Fläche und Tiefe dokumentiert worden. Die Häufigkeit, mit der eine Materialveränderung auftrat, wurde nach den Kategorien „in Einzelfällen“ (selten, mindestens zwei Mal beobachtet) oder „regelmäßig“ (Häufigkeit über 50 %)“ bewertet oder in Relation zur Gesamtzahl der geprüften Bauteile (Schaft, Verbindung, Abzweig) dargestellt.

5.4.2 Beton

5.4.2.1 Bellinghausen Kanalsystem GmbH

5.4.2.1.1 Produktbeschreibung und Versuchsübersicht

In vergleichenden HD-Systemversuchen sowie Düsen-Fall-Versuchen wurden Betonrohre von der Bellinghausen Kanalsystem GmbH nach DIN 4032¹ [63] und FBS-Qualitätsrichtlinie [64] mit Kreisquerschnitt und Fuß der Nennweite DN 300 (vgl. Tabelle 41) eingesetzt.

Tabelle 41: Übersicht zu Probekörpern, Prüfungen und Prüfparametern

Rohre									
		FBS-Betonrohr DIN 4032¹ – KFW – M 300 x 2500 Wandverstärkte Betonrohre nach DIN 4032 ¹ [63] und FBS-Qualitätsrichtlinie [64] mit Kreisquerschnitt und Muffe, der Nennweite DN 300 mit Fuß und einer Baulänge von 2,50 m.							
Bild 138: FBS-Betonrohre									
Formstücke									
		FBS-Gelenkstücke DIN 4032¹ – KFW – M 300 x 1000 Wandverstärkte Gelenkstücke aus Beton nach DIN 4032 ¹ [63] und FBS-Qualitätsrichtlinie [64] mit Kreisquerschnitt, mit Muffe, der Nennweite DN 300 mit Fuß und einer Baulänge von 1,00 m. An den Gelenkstücken wurden werkseitig Kernbohrungen vorgenommen und diverse Anschlussstutzen eingesetzt. Einige Bohrlocher wurden nicht mit Anschlusselementen versehen, so dass hier unmittelbar die Bohrkante belastet und hinsichtlich optischer Veränderungen bewertet wurde.							
Bild 139: FBS-Gelenkstück mit Kernbohrung									
Prüfmethode	HD- Systemversuch				Düsen-Strahlversuche			Düsen-Schleif-Versuch	Düsen-Fall-Versuch
					Einzelstrahl	Spüldüse			
									
Anzahl der Bauteile Rohr/Verbindg./Anschluss	21/30/12				-	-		-	3/-
Prüfdüse (vgl. Abschn. 4.2)	D1	D2	D4	D20	D1	D2	D1	D1	
Splittzugabe [Liter/Zyklus]	0	5	0	20 ²	0	0	0	0	0
Versuchsanzahl	2	1	-	-	-	-	-	-	3

- nicht untersucht

■ Vergleichende HD-Systemversuche mit 0 bzw. 5 Liter Splittzugabe

□ Zusatzversuche dienten der isolierten Betrachtung von Einflussfaktoren (Schleifen, HD-Einzelstrahl) und Variation der Reinigungsbedingungen, wie Ablagerungsmenge, Reinigungszyklen und Düseneigenschaften (Düsenstrahl und -winkel).

¹ teilweise ersetzt durch DIN EN 1916 [81], die Anwendung in Deutschland erfolgt zusammen mit der DIN V 1201 [82]

² bei 20 l Splittzugabe grundsätzlich mit 10 zusätzlichen Zyklen, d.h. insgesamt 60 Reinigungszyklen durchgeführt (vgl. Abschnitt 5.3)

5.4.2.1.2 Vergleichende HD-Systemversuche

Im Rahmen der zwei vergleichenden HD-Systemversuche **ohne Splitt** (vgl. Tabelle 41) waren nach Belastungen mit beweglichem Düsenstrahl im Sohlbereich Auswaschungen an den Innenkanten zum Muffenspiegel, d.h. auf der dem Düsenstrahl zugewandten Seite des Rohrspiegels, feststellbar (vgl. Bild 140 und Bild 141).

Der Versuch mit Zugabe von **5 Liter Splitt** je Reinigungszyklus bestätigte grundsätzlich die Eindrücke aus den Versuchen ohne Splittzugabe. Es war kein signifikant verändertes Materialverhalten zu beobachten. Der vorwiegend im Sohlbereich der Rohrverbindungen beobachtete Materialabtrag war häufig bereits nach 30 Reinigungszyklen (vgl. Bild 143) feststellbar. Nach 50 Reinigungszyklen war der Abtrag etwas größer und tiefer (vgl. Bild 144).

Im Rahmen der HD-Systemversuche wurden die Rohrstränge auch einer **stationären Belastung**, d.h. einer punktuellen Dauerbelastung durch eine über drei Minuten ortsfest gehaltene Düse, ausgesetzt. Hierbei traten lediglich Materialveränderungen auf, wie sie auch in der Prüfung mit beweglicher Düse beobachtet wurden.

HD-Systemversuch (Prüfdüse D1, ohne Splittzugabe)



Bild 140: **Belastung:** 50 Zyklen- kein Splitt -D1 (8x30°)



Bild 141: **Belastung:** 50 Zyklen- kein Splitt -D1 (8x30°)

HD-Systemversuch (Prüfdüse D1, mit 5 Liter Splittzugabe)

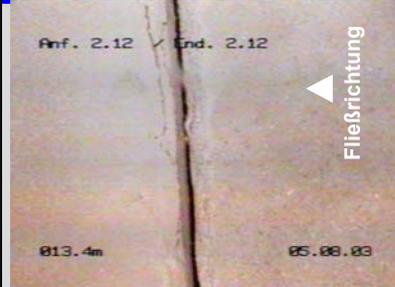


Bild 142: vor der HD-Belastung



Bild 143: nach 30 Zyklen

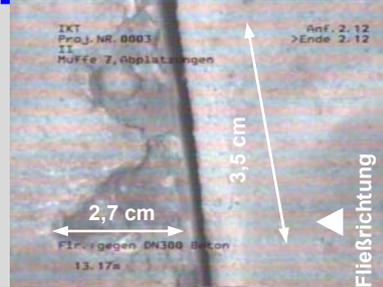


Bild 144: nach 50 Zyklen

Prüfung	maßgeblicher Ort der Materialveränderung Schaft/Verbindung/Abzweig	Größe des Abtrags		beobachtete Häufigkeit
		Fläche [cm²]/	max. Tiefe [mm]	
HD-Systemversuch	Verbindung	< 10	< 5	regelmäßig
Bemerkung: Materialveränderungen waren bereits nach 30 Reinigungszyklen zu beobachten				

5.4.2.1.3 Zusatzversuche

Im **Düsen-Fall-Versuch**, nach mechanischer Belastung der Rohrsohle durch den Fall der Düse aus Scheitelhöhe (DN 300) auf die Rohrsohle, wurden keine Materialveränderungen festgestellt.

5.4.2.1.4 Zusammenfassung

Vergleichende HD-Systemversuche

In den vergleichenden HD-Systemversuchen (0 und 5 Liter Splittzugabe, 50 Reinigungszyklen) zeigten sich Auswaschungen im Bereich der Rohrverbindung. Diese entsprachen in ihrem Ausmaß den Schwankungen in der Lieferqualität der Prüfrohre (Abplatzungen an den Innenkanten des Muffenspiegels).

Zusatzversuche

Im Düsenfallversuch zeigten sich die Probekörper widerstandsfähig gegenüber der mechanischen Belastung durch den Düsenkörper.

5.4.2.2 Berding Beton GmbH (Werk ehemals: Westrohr GmbH)

5.4.2.2.1 Produktbeschreibung und Versuchsübersicht

In Ergänzung zu den in Abschnitt 5.4.2.1 dargestellten Prüfungen an einem Betonrohrprodukt eines anderen Herstellers wurden die nachfolgend beschriebenen Zusatzversuche durchgeführt. Dabei wurden Rohre der Berding Beton GmbH (Werk Datteln, ehemals Westrohr GmbH) nach DIN 4032¹ [63] und FBS-Qualitätsrichtlinie [64] mit Kreisquerschnitt und Fuß der Nennweite DN 300 eingesetzt (vgl. Tabelle 42). Es wurden HD-Systemversuche mit erhöhter Splittzugabe bzw. auch erhöhter Anzahl der Reinigungszyklen sowie Düsen-Strahlversuche mit intensivem HD-Einzelstrahl ausgeführt.

Tabelle 42: Übersicht zu Probekörpern, Prüfungen und Prüfparametern

Rohre										
		FBS-Betonrohr DIN 4032¹ – KFW – M 300 x 2500 Wandverstärkte Betonrohre nach DIN 4032 ¹ [63] und FBS-Qualitätsrichtlinie [64] mit Kreisquerschnitt und Muffe, der Nennweite DN 300 mit Fuß und einer Baulänge von 2,50 m.								
Bild 145: FBS-Betonrohre										
Formstücke										
		FBS-Gelenkstücke DIN 4032¹ – KFW – M 300 x 1000 Wandverstärkte Gelenkstücke aus Beton nach DIN 4032 ¹ [63] und FBS-Qualitätsrichtlinie [64] mit Kreisquerschnitt, mit Muffe, der Nennweite DN 300 mit Fuß und einer Baulänge von 1,00 m. An den Gelenkstücken wurden werkseitig Kernbohrungen vorgenommen und diverse Anschlussstutzen eingesetzt. Einige Bohrlöcher wurden nicht mit Anschlusselementen versehen, so dass hier unmittelbar die Bohrkante belastet und hinsichtlich optischer Veränderungen bewertet wurde.								
Bild 146: FBS-Gelenkstück mit Kernbohrung										
Prüfmethode	HD- Systemversuch				Düsen-Strahlversuche			Düsen-Schleif-Versuch	Düsen-Fall-Versuch	
					Einzelstrahl	Spüldüse				
										
Anzahl der Bauteile Rohr/Verbindg./Anschluss	12/22/12				6/3/3			-	-	-
Prüfdüse (vgl. Abschn. 4.2)	D1	D2	D4	D20	D1	D2	D1	D1		
Splittzugabe [Liter/Zyklus]	0	5	0	20 ²	0	0	0	0	0	
Versuchsanzahl	-	-	-	2	3	-	-	-	-	

- nicht untersucht

■ **Vergleichende Systemversuche**

Zusatzversuche dienen der isolierten Betrachtung von Einflussfaktoren (Schleifen, HD-Einzelstrahl) und Variation der Reinigungsbedingungen, wie Ablagerungsmenge, Reinigungszyklen und Düseneigenschaften (Düsenstrahl und -winkel)

¹ teilweise ersetzt durch DIN EN 1916 [81], die Anwendung in Deutschland erfolgt zusammen mit der DIN V 1201 [82]

² bei 20 l Splittzugabe grundsätzlich mit 10 zusätzlichen Zyklen, d.h. insgesamt 60 Reinigungszyklen durchgeführt (vgl. Abschnitt 5.3)

5.4.2.2.2 Vergleichende HD-Systemversuche

Für das oben beschriebene Produkt wurden *keine* vergleichenden HD-Systemversuche durchgeführt.

5.4.2.2.3 Zusatzversuche

In zusätzlichen HD-Systemversuchen wurde die Belastung durch Zugabe von **20 Liter Splitt** je Reinigungszyklus und 10 zusätzliche Zyklen (insgesamt 60) gegenüber den *vergleichenden HD-Systemversuchen* erhöht. Im Ergebnis zeigte sich ein ähnliches Materialverhalten wie bei dem in Abschnitt 5.4.2.1 dargestellten Betonprodukt. Im Bereich der Rohrverbindung zeigten sich wiederholt Auswaschungen an den Innenkanten des Rohrspiegels (vgl. Bild 147 und Bild 148).

Im Rahmen der HD-Systemversuche wurden die Rohrstränge auch einer **stationären Belastung**, d.h. einer punktuellen Dauerbelastung durch eine über drei Minuten ortsfest gehaltene Düse, ausgesetzt. Infolge dieser Belastung traten lediglich Materialveränderungen auf, wie sie auch in der Prüfung mit beweglicher Düse beobachtet wurden.

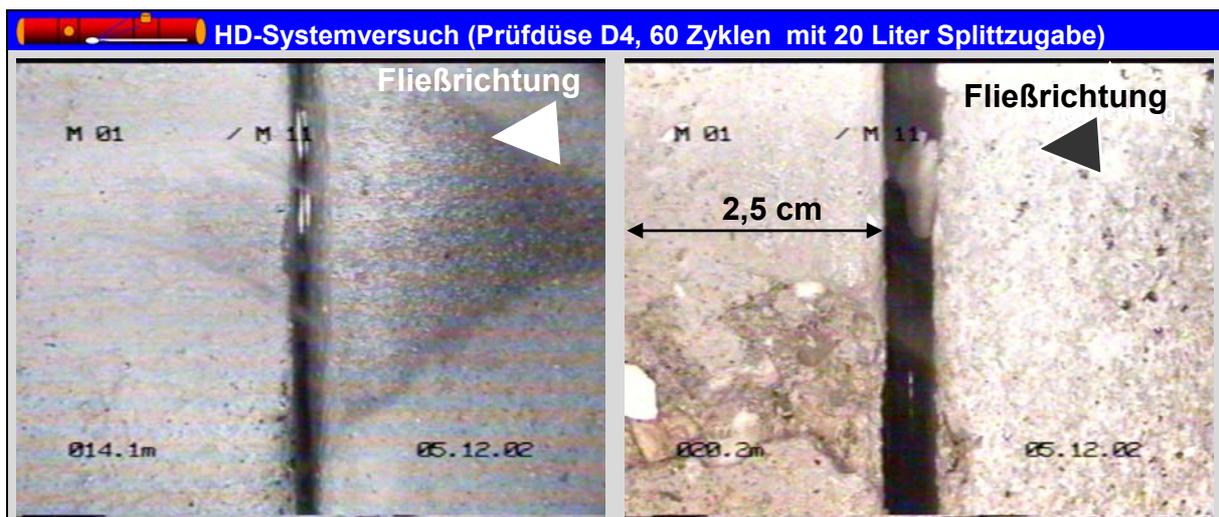


Bild 147: **Belastung:** 60 Zyklen- 20l Splitt -D4 (5x10°, 5x20°)

Bild 148: **Belastung:** 60 Zyklen- 20l Splitt -D4 (5x10°, 5x20°)

Prüfung	maßgeblicher Ort der Materialveränderung Schaft/Verbindung/Abzweig	Größe des Abtrags		beobachtete Häufigkeit
		Fläche [cm²]/	max. Tiefe [mm]	
HD-Systemversuch	Verbindung	< 10	< 5	regelmäßig

Bemerkung: Materialveränderung waren bereits nach 30 Reinigungszyklen zu beobachten

Bei den **Düsen-Strahlversuchen mit HD-Einzelstrahl** entstand an den Bauteilkanten der Rohrverbindung und an den Kanten des Abzweigs kleinflächiger Materialabtrag von max. 3 mm Tiefe und eine durchgehende Spülspur, vergleichbar mit der Rauigkeit des Prüfrohrs (vgl. Bild 149 und Bild 150).

Düsen-Strahlversuch mit HD-Einzelstrahl



Bild 149: **Belastung:** 50 Zyklen - D20 (1x30°)



Bild 150: **Belastung:** 50 Zyklen - D20 (1x30°)

Prüfung	maßgeblicher Ort der Materialveränderung Schaft/Verbindung/ Abzweig	Größe des Abtrags		beobachtete Häufigkeit
		Fläche [cm²]/	max. Tiefe [mm]	
HD-Einzelstrahl Prüfung	Verbindung/Abzweig	1	< 3	regelmäßig
Bemerkung:				

5.4.2.2.4 Zusammenfassung

Vergleichende HD-Systemversuche

Für dieses Produkt wurden keine vergleichenden HD-Systemversuche durchgeführt.

Zusatzversuche

Im erweiterten HD-Systemversuch, d.h. 20 Liter Splittzugabe und 10 zusätzliche Reinigungszyklen (insgesamt 60), zeigten sich in Folge der Splittzugabe Materialauswaschungen im Bereich der Rohrverbindung mit ähnlicher Intensität wie in den vergleichenden HD-Systemprüfungen des in Abschnitt 5.4.2.1 dargestellten Betonprodukts.

In den Düsen-Strahlversuchen mit HD-Einzelstrahl wurde das im Rahmen der HD-Systemversuche beobachtete Materialverhalten grundsätzlich bestätigt.

5.4.3 Steinzeug

5.4.3.1 Steinzeugrohre glasiert (Steinzeug Abwassersysteme GmbH)

5.4.3.1.1 Produktbeschreibung und Versuchsübersicht

In vergleichenden HD-Systemversuchen und Zusatzversuchen (Düsen-Strahl-, Düsen-Schleif-, Düsen-Fallversuche) wurden innen und außen glasierte Steinzeugrohre nach DIN EN 295 [65] bzw. WN 295 [66] des Herstellers Steinzeug Abwassersysteme GmbH mit der Nennweite DN 300 (vgl. Tabelle 43) eingesetzt.

Tabelle 43: Übersicht zu Probekörpern, Prüfungen und Prüfparametern

Rohre									
 <p>Bild 151: Steinzeugmuffenrohre und Formstücke</p>		<p>Glasierte Steinzeugrohre der Steinzeug Abwassersysteme GmbH CeraLong - Rohre mit Steckmuffe K (Verbindungssystem C) sowie CeraLong S Rohre mit Steckmuffe S (Verbindungssystem C) nach DIN EN 295 [65] bzw. WN 295 [66] der Nennweite DN 300 und Tragfähigkeitsklasse 160 (Normallastreihe N, Scheiteldruckkraft FN = 48 [kN/m]).</p> <p>Baulänge: 2,5 m</p>							
Formstücke									
 <p>Bild 152: 90° Abzweig</p>		<p>Glasierte Formstücke aus Steinzeug nach DIN EN 295 [65] bzw. WN 295 [66], Produktgruppe CeraLong der Steinzeug Abwassersysteme GmbH: Steinzeug-90° Abzweig, DN₁/DN₂=300/150 bzw. DN₁/DN₂=300/200 (Normallastreihe N, Tragfähigkeitsklasse 160/160), mit Steckmuffe K/K. Steinzeug-45° Abzweig, DN₁/DN₂=300/150 bzw. DN₁/DN₂=300/200 (Normallastreihe N, Tragfähigkeitsklasse 160/160) mit Steckmuffe K/K. Steinzeug-Gelenkstücke für den Zulauf (GZ) bzw. für den Ablauf (GA), Nennweite DN 300, Normallastreihe N, Tragfähigkeitsklasse 160, Scheiteldruckkraft FN = 48 [kN/m] mit Steckmuffe K nach dem Verbindungssystem C.</p>							
 <p>Bild 153: Gelenkstücke</p>									
Prüfmethode	HD- Systemversuch				Düsen-Strahlversuch			Düsen-Schleif-Versuch	Düsen-Fall-Versuch
					Einzelstrahl	Spüldüse			
Anzahl Bauteile Rohr/Verbindung/Anschluss	31/45/18				6/3/3	10/5/-		8/4/-	8/-/-
Prüfdüse (vgl. Abschn. 4.2)	D1	D2	D4	D20	D1	D2	D1	D1	
Splittzugabe [Liter/Zyklus]	0	5	0	20*	0	0	0	0	
Versuchsanzahl	2	1	-	1	3	5	-	4	8

- nicht untersucht

■ Vergleichende HD-Systemversuche mit 0 bzw. 5 Liter Splittzugabe

Zusatzversuche zur isolierten Betrachtung von Einflussfaktoren (Schleifen, HD-Einzelstrahl) und Variation der Reinigungsbedingungen, wie Ablagerungsmenge, Reinigungszyklen und Düseneigenschaften (Düsenstrahl und -winkel)

* bei 20 l Splittzugabe grundsätzlich mit 10 zusätzlichen Zyklen, d.h. insgesamt 60 Reinigungszyklen durchgeführt (vgl. Abschnitt 5.3)

5.4.3.1.2 Vergleichende HD-Systemversuche

Im Rahmen der zwei vergleichenden HD-Systemversuche **ohne Splitt** (vgl. Tabelle 43) war nach Belastungen mit beweglichem Düsenstrahl im Bereich der Rohrverbindung, insbesondere in der Sohle des Muffenrohres, regelmäßig ein kleinflächiger Abtrag der Glasur an der Rohrwand von ca. 1 cm² feststellbar. In einzelnen Fällen betrug die Abtragsfläche bis zu 15 cm² bei einer maximalen Tiefe von ca. 2 mm (vgl. Bild 154 und Bild 155).

Der Versuch mit Zugabe von **5 Liter Splitt** je Reinigungszyklus bestätigte grundsätzlich die Eindrücke aus den Versuchen ohne Splitzugabe. Hier war ebenfalls im Bereich der Rohrverbindung Materialabtrag von einer Fläche bis zu ca. 15 cm² bei einer maximalen Tiefe von 2 mm zu beobachten. Durch abgeschliffene Abtragskanten hatte der Abtrag jedoch eher eine abrasive Ausprägung.

HD-Systemversuche (0 und 5 Litersplittzugabe)

Bild 154: Belastung: 50 Zyklen- kein Splitt - D1 (8x30°)

Bild 155: Belastung: 50 Zyklen- kein Splitt - D1 (8x30°)

Bild 156: Belastung: 50 Zyklen- 5l Splitt - D1 (8x30°)

Bild 157: Belastung: 50 Zyklen- 5l Splitt - D1 (8x30°)

Prüfung	maßgeblicher Ort der Materialveränderung	Größe des Abtrags		beobachtete Häufigkeit
	Schaft (S) / Verbindung (V) / Abzweig (A)	Fläche [cm ²]/	max. Tiefe [mm]	
HD-Systemversuche	Verbindung	< 15	< 2	in Einzelfällen
Bemerkung: Ein Großteil der o.a. Materialveränderungen war bereits nach 30 Spüldurchgängen zu beobachten.				

Im Rahmen der HD-Systemversuche wurden die Rohrstränge auch einer **stationären Belastung**, d.h. einer punktuellen Dauerbelastung durch eine über drei Minuten ortsfest gehaltene Düse, ausgesetzt. Infolge dieser Belastung traten keine sichtbaren Materialveränderungen auf.

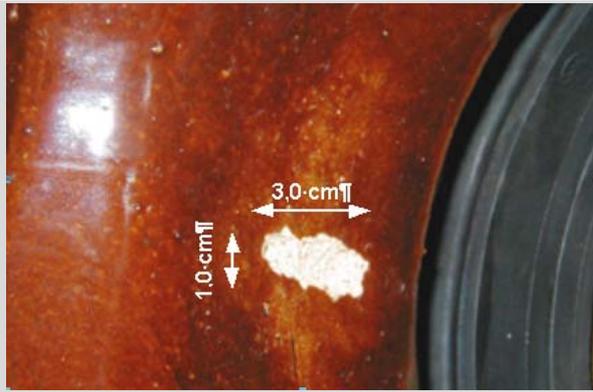
5.4.3.1.3 Zusatzversuche

Über die vergleichenden **HD-Systemversuche** hinaus wurden ergänzende HD-Systemversuche mit einer zusätzlichen Belastung, d.h. einer Zugabe von **20 Liter Splitt** je Reinigungszyklus und einer auf 60 Zyklen erhöhten Anzahl an Reinigungsdurchgängen, durchgeführt. Danach war im Bereich der Rohrverbindung ein Abtrag der Glasur mit abrasiver Ausprägung zu beobachten. In einzelnen Fällen wies der Materialabtrag im Sohlbereich eine Breite von ca. 1 cm auf und erstreckte sich bis in die unteren Kämpferbereiche (vgl. Bild 158 und Bild 159). Auch an den Seitenzuläufen traten deutlich erkennbare Materialveränderungen auf. An den Flächen, die den Hochdruckstrahlen zugewandt waren, trat wiederholt ein Abtrag der Glasur mit einer Fläche von bis zu ca. 50 cm² auf (vgl. Bild 160).



Nach den Belastungen im Rahmen der **Düsen-Strahlversuche mit HD-Einzelstrahl** wurde an allen drei getesteten Seitenzuläufen kleinflächiger Materialabtrag bis zu einer Fläche von ca. 3 cm² beobachtet (vgl. Bild 161). An zwei von drei Rohrverbindungen trat ebenfalls Materialabtrag mit einer Fläche von ca. 5 cm² auf. Die Abtragtiefe war dabei jeweils kleiner als 2 mm.

Im Rahmen der **Düsen-Strahlversuche mit HD-Spüldüse** wurden sowohl mit bewegtem als auch mit stationärem Düsenstrahl keine Materialveränderungen beobachtet (vgl. Bild 162).

Düsen-Strahlversuch mit HD-Einzelstrahl		Düsen-Strahlversuch mit HD-Spüldüse		
				
Bild 161: Belastung: 50 Zyklen - D20 (1x30°)		Bild 162: Belastung: 50 Zyklen - D1 (8x30°)		
Prüfung	maßgeblicher Ort der Materialveränderung Schaft (S) / Verbindung (V) / Abzweig (A)	Größe des Abtrags		beobachtete Häufigkeit
		Fläche [cm ²]	max. Tiefe [mm]	
HD-Einzelstrahl Prüfung	(A) Abzweig	< 3	< 2	3 (A) von 3 (A)
	(V) Verbindung	< 5	< 2	2 (V) von 3 (V)
HD-Spüldüsenprüfung	keine Veränderung	-	-	-
Bemerkung:				

Nach mechanischer Belastung der Rohrsohle im **Düsen-Schleifversuch** (vgl. Abschnitt 5.3.4) waren keine Materialveränderungen feststellbar (vgl. Bild 162).

Düsen-Fall-Versuch	
	
Bild 163: Rohrinnenansicht, Belastung: 1 Düsenfall, Düse1 (Gewicht: 4,5kg) Lagerung: Sandbettung mit Überschüttung	Bild 164: Ansicht Muffe, Belastung: 1 Düsenfall, Düse1 (Gewicht: 4,5kg) Lagerung: Sandbettung mit Überschüttung

Nach der Belastung im **Düsen-Fallversuch** (vgl. Abschnitt 5.3.5) wurden wiederholt deutlich erkennbare Materialveränderungen festgestellt. Zur Durchführung der Düsen-Fall-Versuche wurde eine 4,5 kg schwere Rundstrahldüse bis auf Scheitelhöhe des Rohrdurchmessers DN 300 hochgehoben und dann ein Mal fallengelassen. Infolge dieser Belastung bildete sich ausgehend von dem Auftreffpunkt der Düse ein feiner Haar-Riss von ca. 30 bis 50 cm Länge (vgl. Bild 163 und Bild 164). Um auszuschließen, dass allein die Rohrbettung einen maßgeblichen Einfluss auf das Ausmaß der Materialveränderungen hat, wurden die Düsen-Fall-Versuche unter unterschiedlichen Bettungsbedingungen durchgeführt (vgl. Abschnitt 5.3.5). In allen Fällen wurde die vorgenannte Beobachtung bestätigt.

5.4.3.1.4 Zusammenfassung

Vergleichende HD-Systemversuche

In den vergleichenden HD-Systemversuchen (0 und 5 Liter Splittzugabe, 50 Reinigungszyklen) wurde an einzelnen Rohrverbindungen und Abzweigen die Glasur und Anteile der keramischen Wandung (max. 2 mm) auf einer Fläche von bis zu 15 cm² abgetragen. In Folge der Splittzugabe (5 Liter) erhielt der Materialabtrag eine abrasive Ausprägung bei ähnlicher Fläche und Tiefe.

Zusatzversuche

Im erweiterten HD-Systemversuch, d.h. 20 Liter Splittzugabe und 10 zusätzliche Reinigungszyklen (insgesamt 60), zeigte sich in Folge der Splittzugabe ein Materialabtrag mit abrasiver Ausprägung und ähnlicher Tiefe wie bei geringerer Splittzugabe, allerdings mit deutlich größerer Fläche (bis zu 50 cm²). In den Düsen-Strahlversuchen mit HD-Einzelstrahl wurde ein ähnliches Materialverhalten (kleinflächiger Materialabtrag) wie in den vergleichenden HD-Systemversuchen ohne Splittzugabe beobachtet. In den Düsen-Strahlversuchen mit HD-Spüldüse waren keine Materialveränderungen optisch feststellbar. Im Düsen-Schleif-Versuch zeigten sich die Probekörper widerstandsfähig gegenüber der mechanischen Belastung durch den Düsenkörper. Der Fall eines Düsenkörpers aus Scheitelhöhe (DN 300) auf die Rohrwandung verursachte Risse in der Rohrwand.

5.4.3.2 Steinzeugrohre glasiert (EuroCeramic GmbH)

5.4.3.2.1 Produktbeschreibung und Versuchsübersicht

In Ergänzung zu den in Abschnitt 5.4.3.1 dargestellten Prüfungen an einem Steinzeugrohrprodukt eines anderen Herstellers wurden Zusatzversuche mit Schwerpunkt auf eine Belastung durch Feststoffe (20 Liter Splittzugabe) und den Fall eines Düsenkörper auf die Rohrsohle an innen und außen glasierten Steinzeugrohren nach DIN EN 295 [65] des Herstellers EuroCeramic GmbH mit der Nennweite DN 300 (vgl. Tabelle 44) ausgeführt.

Tabelle 44: Übersicht zu Probekörpern, Prüfungen und Prüfparametern

Rohre									
		Abwasserrohre aus Steinzeug, Produktgruppe Euro Trad der EuroCeramic GmbH EuroTrad Rohre nach DIN EN 295 [65], Nennweite DN 300, Tragfähigkeitsklasse 160 (Normallastreihe), Verbindungssystem C Baulänge: 2,00 m							
Bild 165: Steinzeugrohre									
Formstücke									
		Formstücke aus Steinzeug, Produktgruppe EuroTrad nach DIN EN 295 [65]: Steinzeug- Abzweig 90° , Nennweite DN 300/150 und DN 300/200 (Tragfähigkeitsklasse 160/160, Normallastreihe), Verbindungssystem C; Steinzeug- Abzweig 45° , Nennweite DN 300/150 und DN 300/200 (Tragfähigkeitsklasse 160/160, Normallastreihe), Verbindungssystem C; Steinzeug Sattelstück 45° Nennweite DN 150 und DN 200; Steinzeug Sattelstück 90° Nennweite DN 150 und DN 200; Steinzeug Anbohrstutzen 90° Nennweite DN 150 und DN 200							
Bild 166: Abzweig, 45°									
Prüfmethode	HD- Systemversuch				Düsen-Strahlversuch			Düsen-Schleif-Versuch	Düsen-Fall-Versuch
					Einzelstrahl	Spüldüse			
Anzahl Bauteile Rohr/Verbindung/Anschluss	8/11/11				-	-		-	3/-
Prüfdüse (vgl. Abschn. 4.2)	D1	D2	D4	D20	D1	D2	D1	D1	
Splittzugabe [Liter/Zyklus]	0	5	0	20*	0	0	0	0	
Versuchsanzahl	-	-	-	1	-	-	-	-	3

- nicht untersucht

■ Vergleichende HD-Systemversuche mit 0 bzw. 5 Liter Splittzugabe

□ Zusatzversuche dienen der isolierten Betrachtung von Einflussfaktoren (Schleifen, HD-Einzelstrahl) und Variation der Reinigungsbedingungen, wie Ablagerungsmenge, Reinigungszyklen und Düseneigenschaften (Düsenstrahl und -winkel).

* bei 20 l Splittzugabe grundsätzlich mit 10 zusätzlichen Zyklen, d.h. insgesamt 60 Reinigungszyklen durchgeführt (vgl. Abschnitt 5.3)

5.4.3.2.2 Vergleichende HD-Systemversuche

Für das oben beschriebene Produkt wurden *keine* vergleichenden HD-Systemversuche durchgeführt.

5.4.3.2.3 Zusatzversuche

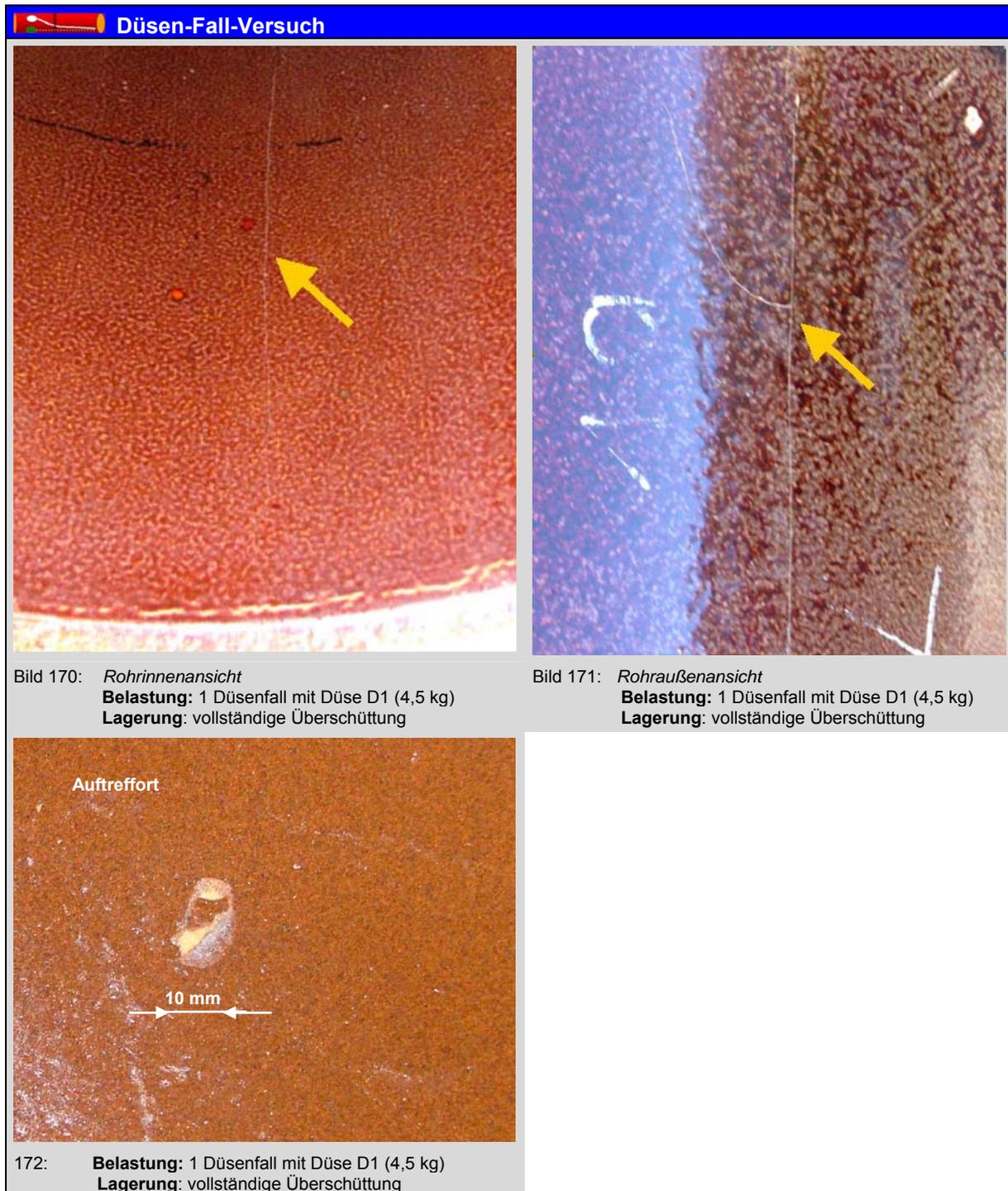
Da bei dem in Abschnitt 5.4.3.1 dargestellten Steinzeugprodukt im Rahmen der HD-Systemversuche Materialveränderungen bei zusätzlicher Splittbelastung auftraten, wurde mit dem vorliegenden Produkt ein weiterer HD-Systemversuch mit Zugabe von **20 Liter Splitt** je Reinigungszyklus durchgeführt. Danach trat im Bereich der Rohrverbindungen in der Sohle des Muffenrohres ein kleinflächiger Abtrag der inneren Glasur von ca. 1 cm² auf (vgl. Bild 168). Insbesondere an den Rohrverbindungen und seitlichen Anschlüssen in der Nähe der Splittzugabe-Station am Anfang der Prüfstrecke war ein deutlicher Abtrag der Glasur mit abrasiver Ausprägung zu beobachten. Dieser hatte im Sohlbereich eine Breite von bis zu 1 cm und erstreckte sich bis in den Kämpferbereich (vgl. Bild 167). Im Bereich der seitlichen Anschlüsse war der Materialabtrag auf den dem Spülstrahl zugewandten Flächen offensichtlich erkennbar, und von deutlich größerer Ausbildung (vgl. Bild 169).



Im Rahmen der HD-Systemversuche wurden die Rohrstränge auch einer **stationären Belastung**, d.h. einer punktuellen Dauerbelastung durch eine über drei

Minuten ortsfest gehaltene Düse, ausgesetzt. Infolge dieser Belastung waren keine Materialveränderungen erkennbar.

Im **Düsen-Fall-Versuch** zeigte sich in zwei von drei Versuchen bei Sandbettung bzw. vollständiger Sandüberschüttung des Prüfrohrs ein über die Wanddicke durchgehender Haar-Riss bis zur Rohrverbindung (vgl. Bild 170 und Bild 171). In einem Versuch trat ein ca. 1 cm² großer Materialabtrag ohne sichtbare Rissbildung an der Auftreffstelle auf (Bild 172).



5.4.3.2.4 Zusammenfassung

Vergleichende HD-Systemversuche

Vergleichende HD-Systemversuche (0 und 5 Liter Splittzugabe) wurden für dieses Produkt *nicht* durchgeführt.

Zusatzversuche

Im erweiterten HD-Systemversuch mit 20 Liter Splittzugabe und im Düsen-Fall-Versuch zeigte sich ein ähnliches Materialverhalten wie bei dem nach Abschnitt 5.4.3.1 untersuchten Produkt aus Steinzeug. An den Rohrverbindungen und Abzweigen wurden die Glasur und Anteile der keramischen Wandung abgetragen (max. 2 mm). In Folge der Splittzugabe erhielt der Materialabtrag eine abrasive Ausprägung. Der Fall eines Düsenkörpers aus Scheitelhöhe (DN 300) auf die Rohrwandung verursachte in zwei von drei Versuchen Risse in der Rohrwand.

5.4.4 Guss

5.4.4.1 Duktile Gussrohre mit Tonerdezementmörtelauskleidung (Saint Gobain Gussrohr GmbH & Co. KG)

5.4.4.1.1 Produktbeschreibung und Versuchsübersicht

In vergleichenden HD-Systemversuchen und Zusatzversuchen (Düsen-Strahl-, Düsen-Schleif-, Düsen-Fallversuche) wurden duktile Gussrohre mit Tonerdezementmörtelauskleidung nach DIN EN 598 [67] der Saint-Gobain Gussrohr GmbH & Co. KG eingesetzt (vgl. Tabelle 45).

Tabelle 45: Übersicht zu Probekörpern, Prüfungen und Prüfparametern

Rohre										
 <p>Bild 173: INTEGRAL®-Abwasser-Rohre DN 300</p>		<p>INTEGRAL®-Abwasser-Muffenrohre DN 300 aus duktilem Gusseisen mit Tonerdezementmörtelauskleidung nach DIN EN 598 [67] mit Steckmuffenverbindung Tyton nach DIN 28603 [83] einschließlich Dichtungen aus NBR.</p> <p>Baulängen: 6,0 m mit Muffe, 3,0 m mit Muffe sowie 3,00 m Glattrohre</p>								
Formstücke										
 <p>Bild 174: KSM-Kanalsattel</p>		<p>KSM Kanalsattel DN 300/150, 90° aus duktilem Gusseisen nach DIN EN 598 [67]; KSB Kanalsattel DN 300/150, 90° aus duktilem Gusseisen nach DIN EN 598 [67], Einsteckende für Rohre aus STZ/GGG; ABS-Stück, Anbohrersattelstück, DN 300/150, 45° aus duktilem Gusseisen nach DIN EN 598 [67], mit Muffen für Rohre aus STZ/GGG; INTEGRAL®-Rohrkupplung aus duktilem Gusseisen nach DIN EN 598 [67] mit Steckmuffenverbindung nach DIN 28603 [83] und Dichtungen aus NBR</p>								
Prüfmethode	HD- Systemversuch				Düsen-Strahlversuch			Düsen-Schleif-Versuch	Düsen-Fall-Versuch	
					Einzelstrahl	Spüldüse				
										
Anzahl Bauteile Rohr/Verbindung/Anschluss	20/15/16				9/3/3	12/6/-		14/7/-	3/-/-	
Prüfdüse (vgl. Abschn. 4.2)	D1		D2		D4		D20	D1	D2	D1
Splittzugabe [Liter/Zyklus]	0	5	0	20*	0	0	0	0	0	
Versuchsanzahl	2	1	-	2	3	6	-	7	3	

- nicht untersucht

■ Vergleichende HD-Systemversuche mit 0 bzw. 5 Liter Splittzugabe

□ Zusatzversuche dienen der isolierten Betrachtung von Einflussfaktoren (Schleifen, HD-Einzelstrahl) und Variation der Reinigungsbedingungen, wie Ablagerungsmenge, Reinigungszyklen und Düsenereigenschaften (Düsenstrahl und -winkel).

* bei 20 l Splittzugabe grundsätzlich mit 10 zusätzlichen Zyklen, d.h. insgesamt 60 Reinigungszyklen durchgeführt (vgl. Abschnitt 5.3)

5.4.4.1.2 Vergleichende HD-Systemversuche

Im Rahmen der vergleichenden HD-Systemversuche **ohne Splittzugabe** war wiederholt kleinflächiger Materialabtrag (bis zu 15 cm²) mit einer Tiefe von ein bis

maximal zwei Millimetern zu beobachten. Dieser trat überwiegend im Sohlbereich der Rohrverbindung, insbesondere an dem Rohrspiegel, der dem Düsenstrahl zugewandt war, auf (Bild 175 und Bild 176).

Im Ergebnis des HD-Systemversuchs mit **5 Liter Splittzugabe** war ein Einfluss aus Feststoffbelastung nicht erkennbar. Um den KSM-Kanalsattel einbauen zu können, mussten Kernbohrungen an dem Gussrohr vorgenommen werden. Dabei trat an den Bohrkanten kleinflächiger Materialabtrag auf. An diesen Stellen war infolge der Prüfbelastung keine nennenswerte Vergrößerung der Abtragsfläche erkennbar (vgl. Bild 177 und Bild 178).

Im Rahmen der HD-Systemversuche wurden die Rohrstränge auch einer **stationären Belastung**, d.h. einer punktuellen Dauerbelastung durch eine über drei Minuten ortsfest gehaltene Düse, ausgesetzt. Infolge dieser Belastung wurden optisch keine Materialveränderungen festgestellt.

HD-Systemversuch (ohne Splittzugabe)




Bild 175: **Belastung:** 50 Zyklen-kein Splitt-D1 (8x30°)

Bild 176: **Belastung:** 50 Zyklen-kein Splitt-D1 (8x30°)

HD-Systemversuch (mit 5 Liter Splittzugabe)




Bild 177: **Belastung:** 50 Zyklen-Splitt: 5 Liter- D1 (8x30°)

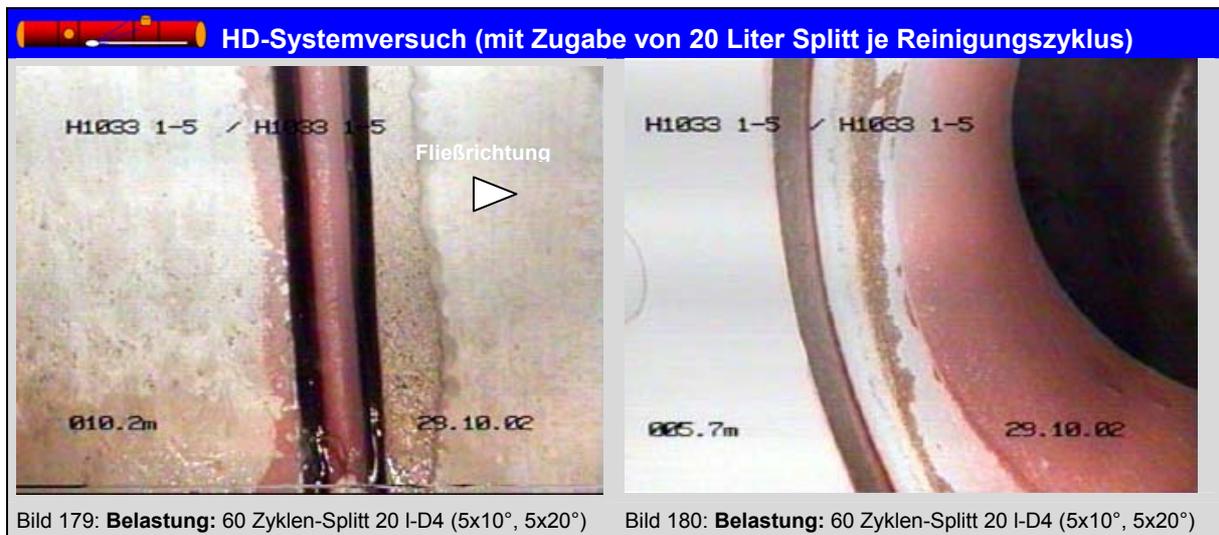
Bild 178: **Belastung:** 50 Zyklen- Splitt: 5 Liter- D1 (8x30°)

Prüfung	maßgeblicher Ort der Materialveränderung Schaft (S) / Verbindung (V) / Abzweig (A)	Größe des Abtrags		beobachtete Häufigkeit
		Fläche [cm²]	max. Tiefe [mm]	
HD-Systemversuch	Verbindung	< 6	< 2	regelmäßig

Bemerkung: Ein Großteil der o.a. Materialveränderungen war bereits nach 30 Spüldurchgängen zu beobachten.

5.4.4.1.3 Zusatzversuche

Über die vergleichenden HD-Systemversuche hinaus wurden ergänzende Versuche mit einer zusätzlichen Belastung, d.h. einer Zugabe von 20 Liter Splitt je Reinigungszyklus und einer auf 60 Zyklen erhöhten Anzahl an Reinigungsdurchgängen, durchgeführt. Danach zeigte sich in Folge der Splittzugabe an einzelnen Rohrverbindungen Materialabtrag in Form von Abrasion. Eine Zunahme der Tiefe und Fläche des Abtrags war nicht feststellbar (vgl. Bild 179). Im Bereich der Seitenzuläufe zeigten sich Abrasionserscheinungen an der Innenoberfläche der Abzweige, die dem Hochdruckwasserstrahl zugewandt war. Die Oberfläche des Materials (Farbbeschichtung) wurde dabei abgespült bzw. aufgeraut (vgl. Bild 180).



In den **Düsen-Strahlversuchen mit HD-Spüldüse** wurde in einzelnen Fällen ebenfalls Materialabtrag festgestellt. Im Vergleich zu den Beobachtungen bei den HD-Systemversuchen war die Abtragtiefe jedoch wesentlich geringer und auch die Abtragsflächen waren deutlich kleiner, so dass meistens lediglich die farbige Beschichtung am Rohrstoß abgetragen wurde (vgl. Bild 181).



Im Vergleich zu den o.a. Ergebnissen aus den HD-Systemversuchen mit und ohne Splittzugabe und den Düsen-Strahlversuchen mit HD-Spüldüse war der im Rahmen der **Düsen-Strahlversuche mit HD-Einzelstrahl** beobachtete Materialabtrag deutlich gravierender. Im Verbindungsbereich wurde bei zwei von drei Prüfungen die komplette Zementmörtelschicht großflächig abgetragen (vgl. Bild 182). Im Anschlussbereich wurde ebenfalls Materialabtrag festgestellt. Dabei wurde offensichtlich auch die Dichtung des Kanalsattels angegriffen (vgl. Bild 183). Hier zeigt sich sowohl im Bereich der Anschlüsse als auch der Rohrverbindung ein deutlicher Unterschied zu den Ergebnissen der praxisnahen HD-Systemversuche bzw. der Düsen-Strahlversuche mit Spüldüse.

Düsen-Strahlversuche mit HD-Einzelstrahl

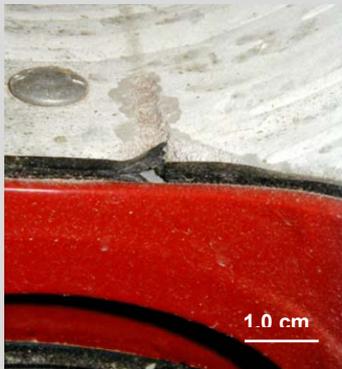



Bild 182: **Belastung:** 50 Zyklen - D20 (1x30°)

Bild 183: **Belastung:** 50 Zyklen - D20 (1x30°)

Prüfung	maßgeblicher Ort der Materialveränderung	Größe des Abtrags		beobachtete Häufigkeit
	Schaft (S) / Verbindung (V) / Abzweig (A)	Fläche [cm²]	max. Tiefe [mm]	
HD-Einzelstrahl Prüfung	Verbindung	400	2 - 8	2 (V) von 3 (V)
	Abzweig (Dichtung)	3	< 2	3 (A) von 3 (A)

Bemerkung: Ein Großteil der o.a. Materialveränderungen war bereits nach 30 Spüldurchgängen zu beobachten.

In den **Düsen-Schleif-Versuchen** wurden leichte Schleifspuren an der Oberfläche der Rohrwandung (vgl. Bild 177) und geringer Farbabtrag des Schutzanstriches im Verbindungsbereich beobachtet.

Im **Düsen-Fall-Versuch** war an den Auftreffstellen der Düse ein Abdruck in der Mörtelschicht von ca. 5 x 5 mm Größe erkennbar (vgl. Bild 178).

Düsen-Schleif-Versuch **Düsen-Fall-Versuch**




Bild 184: **Belastung:** 50 Zyklen - D1 (4,5 kg)

Bild 185: **Belastung:** 1 Düsenfall mit Düse D1 (4,5 kg)

5.4.4.1.4 Zusammenfassung

Vergleichende HD-Systemversuche

In den vergleichenden HD-Systemversuchen (0 und 5 Liter Splittzugabe, 50 Reinigungszyklen) wurde an einzelnen Rohrverbindungen deutlich erkennbar Material der Zementmörtelauskleidung abgetragen, allerdings ohne die Gussoberfläche freizulegen. Im Ergebnis des HD-Systemversuchs mit 5 Liter Splittzugabe war ein Einfluss aus Feststoffbelastung nicht erkennbar.

Zusatzversuche

Im erweiterten HD-Systemversuch, der mit 20 Liter Splittzugabe und 10 zusätzlichen Reinigungszyklen (insgesamt 60 Zyklen) über die Anforderungen der vergleichenden HD-Systemversuche hinausging, zeigte sich in Folge der Splittzugabe an einzelnen Rohrverbindungen und seitlichen Anschlüssen Materialabtrag in Form von Abrasion. Eine Zunahme der Tiefe und Fläche des Abtrags war nicht feststellbar. Sowohl im Düsen-Schleif- als auch im Düsen-Fall-Versuch zeigten sich die Probekörper widerstandsfähig gegenüber der mechanischen Belastung durch den Düsenkörper. In der HD-Einzelstrahlprüfung mit extremen Reinigungsparametern zeigten sich demgegenüber deutliche Abplatzungen im Verbindungsbereich mit freigelegter Gussoberfläche und ein Angriff an der Dichtung des Anschlusssattels. In der Betriebspraxis ist allerdings davon auszugehen, dass der HD-Strahl erst nach einem deutlich längeren Strahlweg auf den seitlichen Anschluss im Kämpfer bzw. Scheitel trifft (vgl. 8 mm Strahlabstand im Düsen-Strahlversuch mit HD-Einzelstrahl).

5.4.5 GFK

5.4.5.1 Geschleuderte GFK-Rohre (Hobas Rohre GmbH)

5.4.5.1.1 Produktbeschreibung und Versuchsübersicht

In vergleichenden HD-Systemversuchen und Zusatzversuchen (Düsen-Strahl-, Düsen-Schleif-, Düsen-Fallversuche) wurden geschleuderte GFK-Kanalrohre (glasfaserverstärkte Kunststoffrohre nach DIN 16869 Teil 1 [68] und Teil 2 [69] sowie DIN 19565 [70]) der Hobas Rohre GmbH eingesetzt (vgl. Tabelle 46).

Tabelle 46: Übersicht zu Probekörpern, Prüfungen und Prüfparametern

Rohre										
 <p>Bild 186: geschleuderte GFK-Rohre DN 300</p>		<p>Geschleuderte GFK Kanalrohre der Hobas Rohre GmbH: Kanalrohre aus geschleuderten, glasfaserverstärktem Polyesterharz (UP-GF) nach DIN 16869 [68 und 69] sowie DIN 19565 [70], ohne oder mit einseitig aufgezogener Kupplung (vgl. Formstücke), Nennweite DN 300, Nenndruck PN1 (Freispiegel) und einer Nennsteifigkeit SN 10.000 N/m². Die Baulänge der Rohre beträgt 0,5 m, 1,0 m und 3,0 m.</p>								
Formstücke										
 <p>Bild 187: 90° T-Stück DN 300/150 aus GFK</p>		<p>Formstücke aus geschleuderten, glasfaserverstärktem Polyesterharz (UP-GF) nach DIN 19565 [70] der Hobas Rohre GmbH: GFK-Kupplung für vg. Kanalrohre mit einer EPDM Dichtung (Membran), Nenndruck PN1 (Freispiegel) bzw. PN6 (Druckrohr). GFK-T-Stück 90°, Nennweite DN 300/150 (DA324/168) (vgl. Bild 187) und DN 300/200 (DA324/220), Abgang spitz, PN 1 (Freispiegel), SN 10.000 N/m²; GFK-Abzweig 45°, DN 300/150 (DA324/168) und DN 300/200, Abgang spitz, PN 01, SN 10.000 N/m²; GFK-Sattelstücke 90° mit PVC-Abgang, DN 300/150.</p>								
Prüfmethode	HD- Systemversuch				Düsen-Strahlversuch			Düsen-Schleif-Versuch	Düsen-Fall-Versuch	
	Einzelstrahl		Spüldüse		Einzelstrahl		Spüldüse			
Anzahl Bauteile Rohr/Verbindung/Anschluss	43/66/41				6/3/3		14/7/-		2/1/-	3/1/-
Prüfdüse (vgl. Abschn. 4.2)	D1		D2		D4		D20		D1	D1
Splittzugabe [Liter/Zyklus]	0	5	0	20*	0	0	0	0	0	
Versuchsanzahl	2	2	1	1	2	3	4	2	1	3

- nicht untersucht
- Vergleichende HD-Systemversuche mit 0 bzw. 5 Liter Splittzugabe
- Wiederholungsversuche dienen der Bestätigung bzw. Relativierung von Einzelbeobachtungen an demselben oder einem anderen Produkt der gleichen Werkstoffgruppe.
- Zusatzversuche dienen der isolierten Betrachtung von Einflussfaktoren (Schleifen, HD-Einzelstrahl) und Variation der Reinigungsbedingungen, wie Ablagerungsmenge, Reinigungszyklen und Düseneigenschaften (Düsenstrahl und -winkel).
- * bei 20 l Splittzugabe grundsätzlich mit 10 zusätzlichen Zyklen, d.h. insgesamt 60 Reinigungszyklen durchgeführt (vgl. Abschnitt 5.3)

5.4.5.1.2 Vergleichende HD-Systemversuche

Im Rahmen der vergleichenden HD-Systemversuche **ohne Splittzugabe** wurden an allen drei Prüfhaltungen Materialveränderungen beobachtet. Klein- bis großflächige Delaminationen der harzreichen Innenschicht (ca. 10 – 200 cm²) waren die wesentlichsten und am häufigsten auftretenden Materialveränderungen. Sie traten

ausschließlich im Bereich der Rohrverbindungen auf, insbesondere an den Rohrspiegeln, die dem Düsenstrahl zugewandt sind. Die Dicke der abgetragenen bzw. delaminierten Schicht betrug maximal 2 mm und reichte bis zu einer innenliegenden glasfaserverstärkten Schicht, so dass auch einzelne Glasfasern freigelegt wurden (vgl. Bild 188 und Bild 189). Der überwiegende Teil der Materialveränderungen beschränkte sich jedoch auf den durch die äußere Kupplung und die umlaufende Dichtung gekammerten Bereich bis 4 cm Rohrlänge (Bild 190 Abschnitt 5.4.5.1.4). Im Ergebnis des HD-Systemversuchs mit **5 Liter Splittzugabe** war ein Einfluss aus Feststoffbelastung nicht erkennbar.

HD-Systemversuch (ohne Splittzugabe)



Bild 188: **Belastung:** 50 Zyklen-kein Splitt-D1 (8x30°)

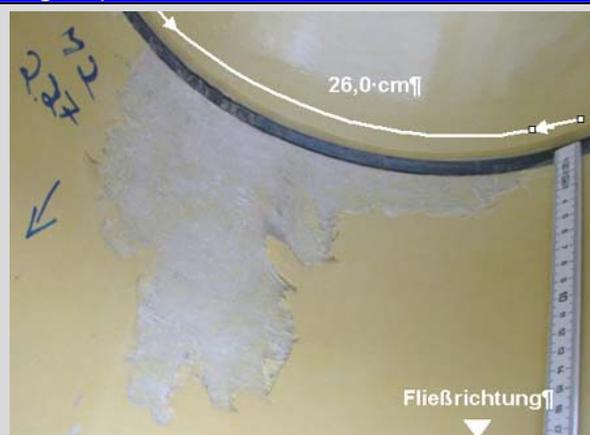


Bild 189: **Belastung:** 50 Zyklen-kein Splitt-D1 (8x30°)

HD-Systemversuch (mit 5 Liter Splittzugabe)

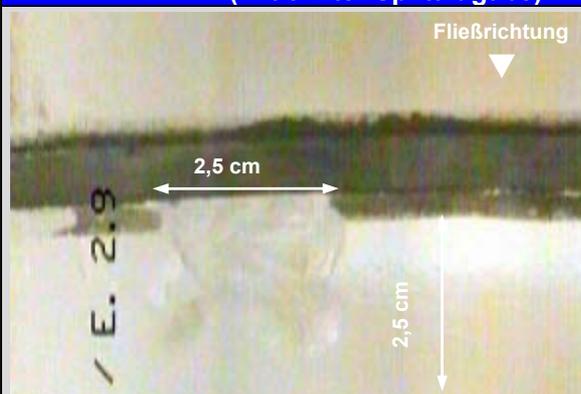


Bild 190: **Belastung:** 50 Zyklen-5 l Splitt-D1 (8x30°)

HD-Systemversuch (stationäre Belastung)

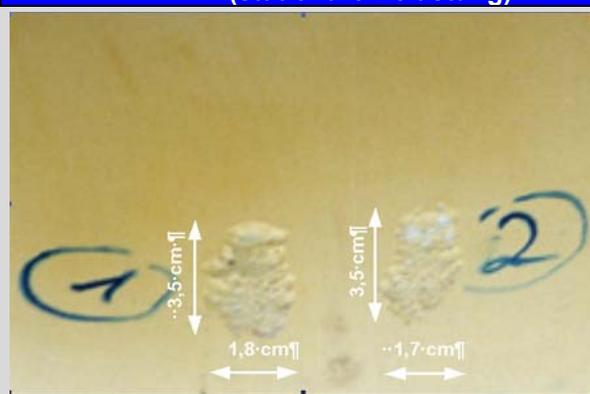


Bild 191: **Belastung:** 3 min stationär - D1 (8x30°)

Prüfung	maßgeblicher Ort der Materialveränderung Schaft(S) / Verbindung (V) / Abzweig (A)	beobachtete Häufigkeit	Größe des Abtrags	
			Fläche [cm ²]	max. Tiefe [mm]
HD-Systemversuch	(V), Materialveränderung beschränkte sich auf den gekammerten Verbindungsbereich	13 von 27 (V)	L _{Rohrachse} < 4 cm	< 2
	(V), Materialveränderung ging über den gekammerten Verbindungsbereich hinaus (> 4 cm Rohrlänge)	7 von 27 (V)	bis 200	< 2

Bemerkung: Ein Großteil der o.a. Materialveränderungen war bereits nach 30 Spüldurchgängen zu beobachten

Im Rahmen der HD-Systemversuche wurden die Rohrstränge auch einer **stationären Belastung**, d.h. einer punktuellen Dauerbelastung durch eine über drei Minuten ortsfest gehaltene Düse, ausgesetzt. Infolge dieser Belastung wurde kleinflächiger Materialabtrag bis zu 10 cm² mit einer Abtragstiefe von max. 1,5 mm in der Rohrsohle beobachtet (vgl. Bild 191).

5.4.5.1.3 Wiederholungsversuche

Um die o.a. Versuchsergebnisse ggf. zu bestätigen bzw. auch zu relativieren wurden zwei weitere HD-Systemversuche ohne Splittzugabe durchgeführt. In diesen Versuchen wurden die Ergebnisse aus den vergleichenden HD-Systemversuchen bestätigt, auch hier waren Materialveränderungen ähnlicher Intensität als klein- bis großflächige Delaminationen der harzreichen Innenschicht zu beobachten.

5.4.5.1.4 Zusatzversuche

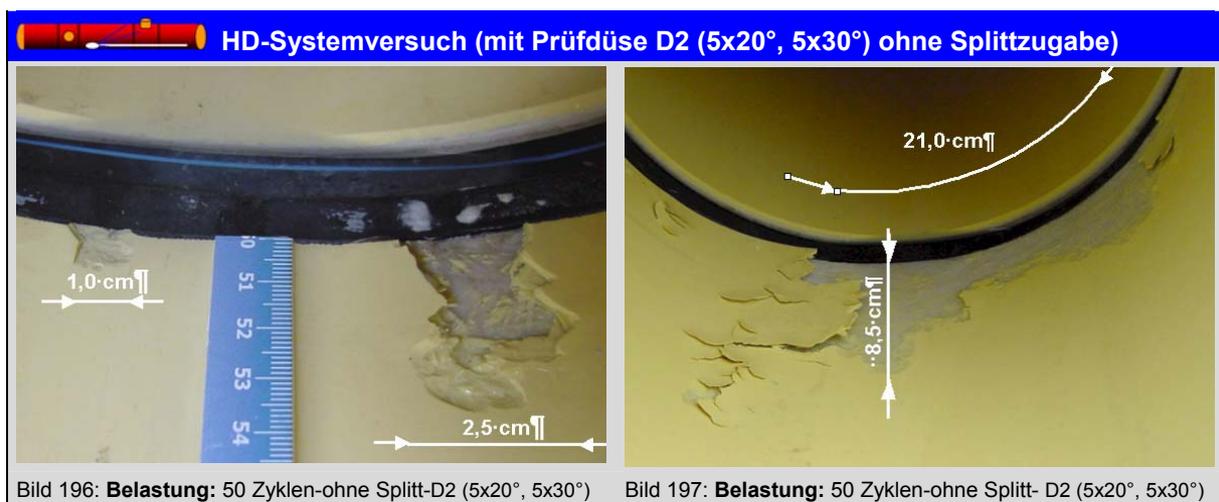
Über die vergleichenden HD-Systemversuche hinaus wurden ergänzende Versuche mit einer zusätzlichen Belastung, d.h. einer Zugabe von **20 Liter Splitt** je Reinigungszyklus und einer auf 60 Zyklen erhöhten Anzahl an Reinigungsdurchgängen, durchgeführt. Infolge der Feststoffbelastung hatte der Materialabtrag nun eine abrasive Ausprägung (vgl. Bild 192 und Bild 193).



Eine Zunahme der Intensität der Veränderungen gegenüber den Ergebnissen der Versuche mit geringer bzw. ohne Splittbelastung war nicht feststellbar. Jedoch traten an den Abzweigen erst durch die Splittzugabe Materialveränderungen auf. Dort wurde Abrasion geringerer Tiefe (vgl. Bild 194) und kleinflächiger Materialabtrag beobachtet (Bild 195).



Darüber hinaus wurde ein zusätzlicher HD-Systemversuch **ohne Splittzugabe** mit der 10-strahligen Prüfdüse D2, die über zwei verschiedene Düsenstrahlwinkel (5x20° und 5x30°) verfügt, durchgeführt. Auch nach dieser Belastungssituation waren klein- bis großflächige Delaminationen der harzreichen Innenschicht zu beobachten (vgl. Bild 196 und Bild 197)



Im **Düsen-Strahlversuch mit HD-Einzelstrahl** zeigte sich Materialabtrag im Bereich der Rohrverbindung mit einer Fläche von ca. 10 cm². Die maximale Abtragstiefe war jedoch im Vergleich zu den HD-Systemversuchen deutlich höher. An der Kante des Rohrspiegels wurde über die gesamte Wanddicke Material abgetragen (Bild 198).

Die **Düsen-Strahlversuche** mit **HD-Spüldüse** ergaben ähnliche Materialveränderungen wie bereits in den HD-Systemversuchen ohne Splittzugabe beobachtet, allerdings von kleinerer Fläche (Bild 199).

Düsen-Strahlversuch mit HD-Einzelstrahl		Düsen-Strahlversuch mit HD-Spüldüse		
Bild 198: Belastung: 50 Zyklen - D20 (1x30°)		Bild 199: Belastung: 50 Zyklen (100bar) - D2 (5x20°, 5x30°)		
Prüfung	maßgeblicher Ort der Materialveränderung Schaft(S) /Verbindung (V)/ Abzweig (A)	beobachtete Häufigkeit	Größe des Abtrags	
			Fläche [cm ²]	max. Tiefe [mm]
HD-Einzelstrahl-Prüfung	Verbindung	3 (V) von 3 (V)	< 15	< 6
HD-Spüldüsen-Prüfung	Verbindung	6 (V) von 7 (V)	< 15	< 2

Nach mechanischen Belastungen der Rohrsohle im **Düsen-Schleif-Versuch** und **Düsen-Fall-Versuch** waren keine Materialveränderungen erkennbar (vgl. Bild 200 und Bild 201).

Düsen-Schleif-Versuch	Düsen-Fall-Versuch
Bild 200: Belastung: 50 Zyklen ohne Wasser, Prüfdüse D1	Bild 201: Belastung: 1 Düsenfall, Prüfdüse D1 Lagerung: Sandbettung

Ergänzende Düsen-Strahlversuche mit HD-Spüldüse

Aufgrund der deutlichen Materialveränderungen nach HD-Strahlbelastung wurden 20 zusätzliche Düsen-Strahlversuche mit HD-Spüldüse im Pipe-Tester mit verschiedenen Düsen, erhöhtem Strahlabstand und verschiedenen Düsendrücken durchgeführt. Um einen definierten Strahlabstand einzurichten, wurde die Düse an eine freitragende Stange fixiert. Der Abstand zwischen der Unterkante des Düsenkörpers und der Rohrsohle betrug dabei ca. 1cm (Bild 202). In der Praxis kann der Strahlabstand durch Verwendung eines Düsenschlittens bzw. -korbes ebenfalls erhöht werden. Um den Einfluss flacher Abstrahlwinkel hinsichtlich der

Rohrbeanspruchung beobachten zu können wurde in diesen Versuchen auch die Düse D19 (8x20°) mit ausschließlich flachen Abstrahlwinkeln von 20° eingesetzt (vgl. Abschnitt 4.2, Tabelle 19).



Bild 202: Vorrichtung zur Einstellung eines definierten Strahlabstandes durch Fixierung der Düse an einer freitragenden Stange, das Rohrprüfstück auf dem Schwenktisch ist unterhalb der Düse frei beweglich

Die Versuchsergebnisse dieser ergänzenden Versuche zeigten deutliche Unterschiede in der Wirkung verschiedener Düsensysteme. Während in den Versuchen unter Einsatz der Prüfdüse D2 (5x20°, 5x30°) auch bei einem Düsenabstand von ca. 1 cm und einem reduzierten Druck von 100 bar noch deutlich sichtbare Materialveränderungen im Verbindungsbereich festgestellt wurden (vgl. Bild 203), wiesen die Rohre nach Einsatz der achtstrahligen-Düse D19 mit ausschließlich flachen Abstrahlwinkeln von 20° (vgl. Tabelle 19) auch unter hohen Drücken von 120 bar keine wesentlichen Veränderungen auf (vgl. Bild 204).

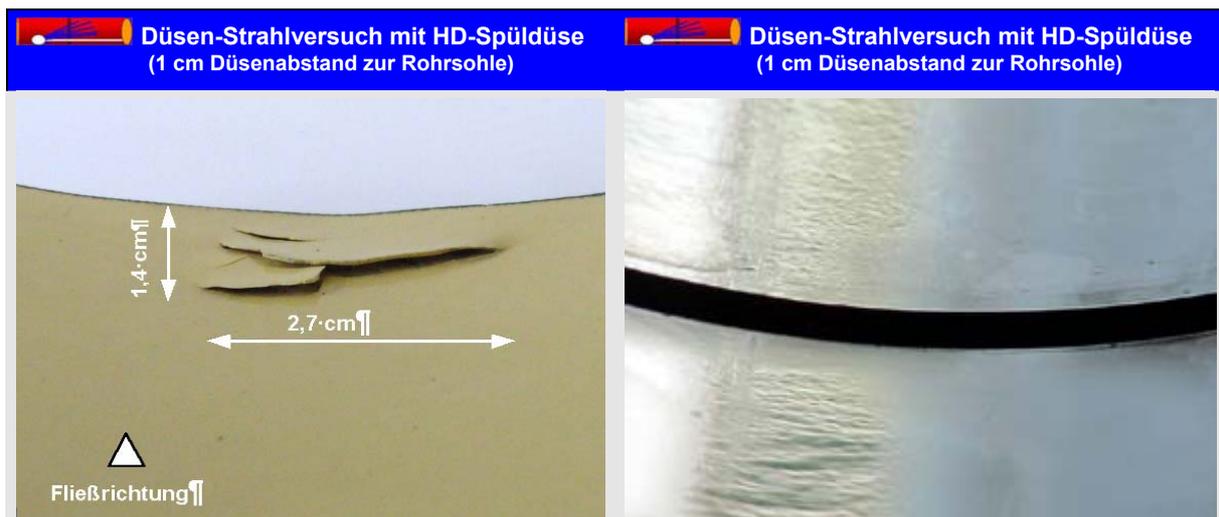


Bild 203: **Belastung:** 50 Zyklen - 100 bar - D2 (5x20°, 5x30°) Bild 204: **Belastung:** 50 Zyklen - 120 bar - D19 (8x20°)

Wasserundurchlässigkeitsprüfung und Dichtheit

Die Wasserundurchlässigkeit des Materials wurde im Bereich erkennbar beanspruchter Rohrstellen stichprobenhaft untersucht. Dazu wurden drei Rohrstellen

mit deutlichem Materialabtrag aus dem Rohr herausgeschnitten und mit der Außenseite auf eine Dichtung gepresst, die an ein Kolbengefäß anschließt. Mit Hilfe einer Vakuumpumpe wurde in dem Kolben ein Unterdruck von 0,5 bar über eine Prüfzeit von 15 min aufgebracht. Zu Beginn der Prüfung wurde die beanspruchte Rohrrinnenfläche mit gefärbtem Wasser beträufelt. Befindet sich nach Abschluss der Prüfzeit kein Wasser im Kolbengefäß, bzw. auf der Außenseite des Rohrabschnittes, gilt das Prüfkriterium der Wasserundurchlässigkeit als erfüllt. In den drei Versuchen wurden die Prüfkriterien stets erfüllt und die Wasserundurchlässigkeit des Materials im Bereich der beanspruchten Rohrstellen bestätigt (vgl. Bild 205 und Bild 206).

Wasserundurchlässigkeitsprüfung

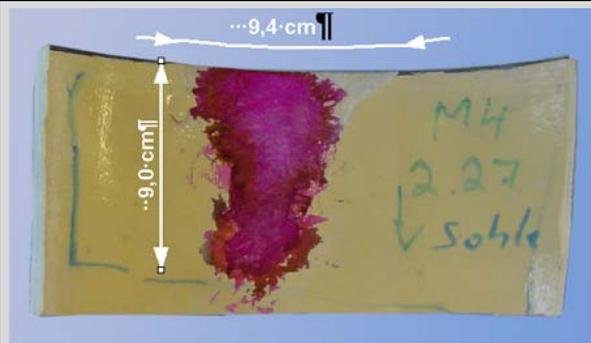


Bild 205: Haltung 2.27, Verbindung 4, (Rohrrinnenfläche)



Bild 206: Haltung 2.27, Verbindung 4, (Rohraußenfläche nach Prüfabschluss)

Konstruktionsbedingt ist zu erwarten, dass die Rohrverbindungen unabhängig von der Tiefe der Materialveränderung dicht bleiben, wenn diese Veränderungen ausschließlich im gekammerten Bereich der Überschiebkupplung liegen. Dies wurde durch eine ergänzende Dichtheitsprüfung (Muffenprüfung) an einer Rohrverbindung bestätigt, aus der zuvor ein Abschnitt von 3,2 cm x 6 cm (Rohrlänge x Umfang) Größe am Rohrende herausgeschnitten wurde (vgl. Bild 208). Die von diesem vollständigen „Materialabtrag“ betroffene Rohrverbindung wurde in Anlehnung an DIN EN 1610 [62] durch eine Wasserdruckprüfung mit einem Prüfdruck von 0,5 bar, d.h. mit 5 m Wassersäule, auf Dichtheit überprüft. Während der Prüfzeit trat kein Wasser an der Rohraußenseite oder im Verbindungsbereich aus.

Dichtheitsprüfung an Rohrverbindung mit Rohrausschnitt



Bild 207: Zusammengebauete Prüfkörper

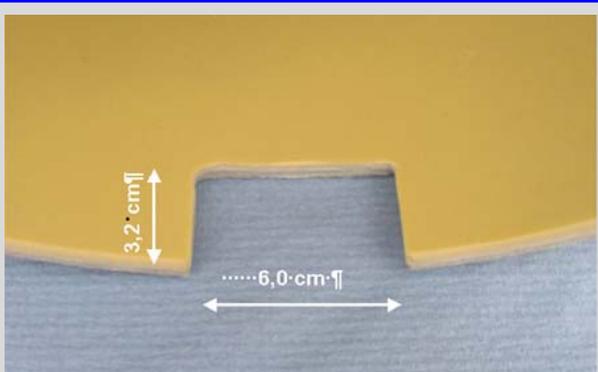


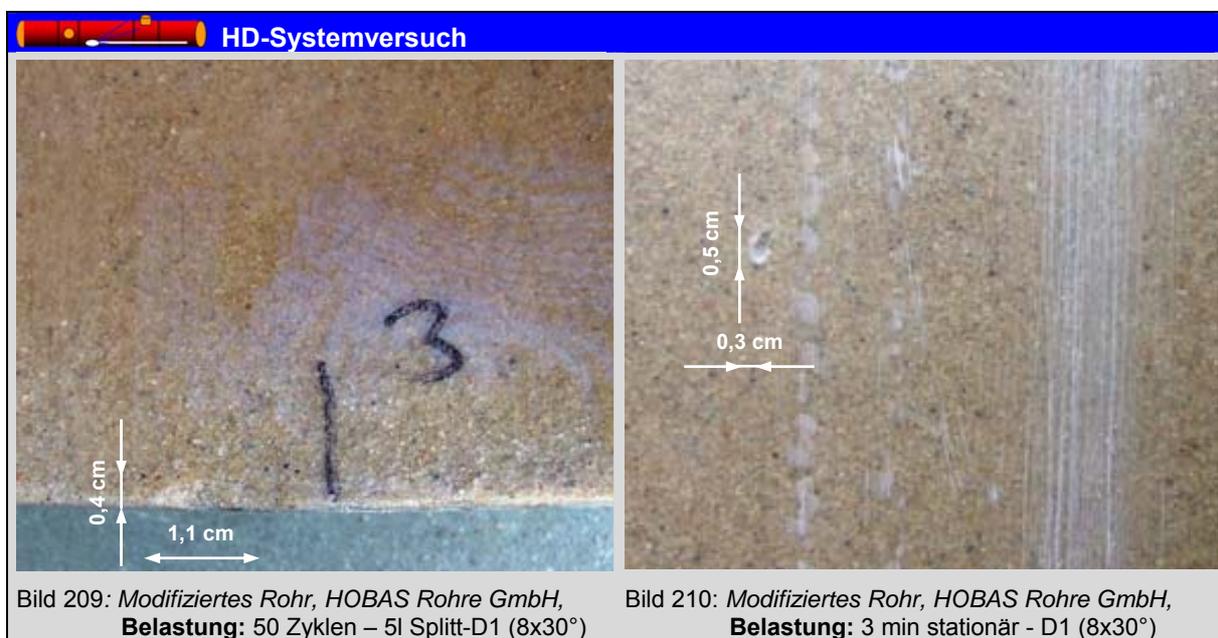
Bild 208: Prüfstück mit Ausschnitt 3,2 cm x 6 cm am Rohrstoß

Wiederholungsuntersuchung nach Produktmodifikationen

Im Zuge der Untersuchungen veranlasste die Hobas Rohre GmbH bereits eine Produktweiterentwicklung. Die Rohreigenschaften wurden in mehreren Entwicklungsschritten mit dem Ziel einer verbesserten Widerstandsfähigkeit gegenüber der HD-Strahlbelastung modifiziert. Anschließend beauftragte der Rohrhersteller die Prüfstelle für Bauprodukte des IKT, Gelsenkirchen mit einem **HD-Systemversuch mit Splittzugabe** an den modifizierten Rohren. Die Ergebnisse wurden in einem umfassenden Prüfbericht für den Auftraggeber zusammengestellt [84].

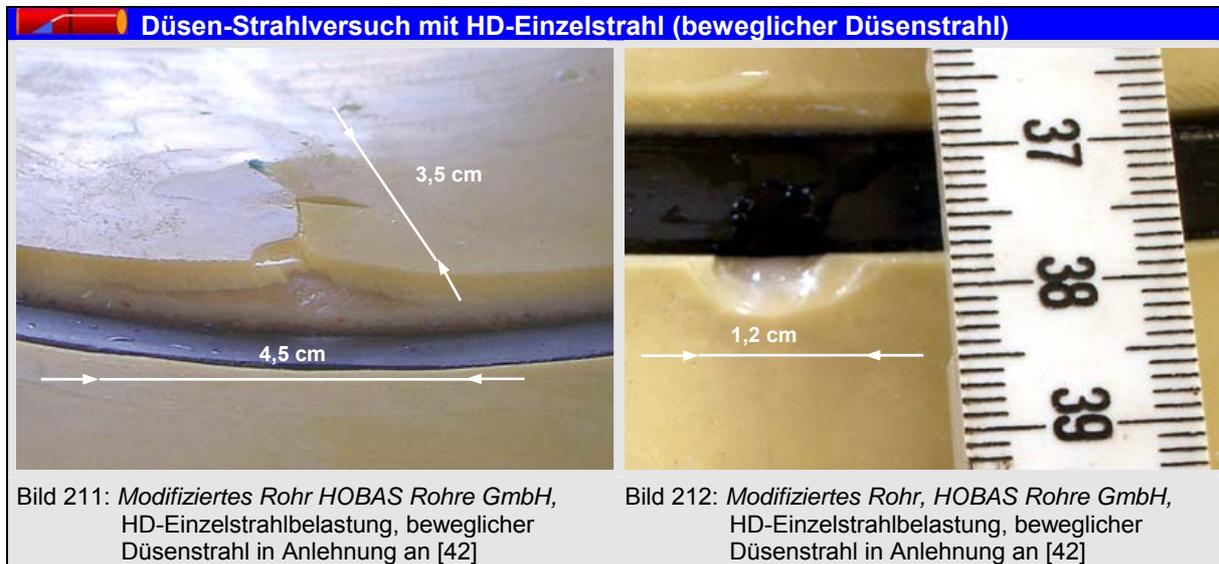
Im Gesamtblick der Ergebnisse wurden an den **modifizierten Rohren** an zwei von drei Rohrverbindungen punktförmiger Materialabtrag geringer Größe (ca. 4 x 11 mm) beobachtet (vgl. Bild 209). Der Materialabtrag reichte an der Kante des Rohrspiegels über die harzreiche Verschleißschicht hinaus. Es wurden jedoch keine Glasfasern freigelegt.

Ergänzend wurden an den modifizierten Rohren drei **stationäre Belastungen** über drei Minuten mit 120 ± 3 bar an der stillstehenden Düse durchgeführt. In zwei Fällen wurden visuell keinerlei Veränderungen festgestellt. Die dritte stationäre Belastung führte in der Rohrsohle zu einem Materialabtrag von ca. 5 mm Länge (in Rohrachse) und ca. 3 mm Breite. Die Abtragstiefe betrug maximal ca. 1 mm und lag im Grenzbereich der harzreichen Innenschicht. Freiliegende Fasern waren nicht feststellbar (vgl. Bild 210).



Darüber hinaus wurden zwei **Düsen-Strahlversuche mit HD-Einzelstrahl** in Anlehnung an DIN V 19517 [42] an den modifizierten Rohren durchgeführt. Im ersten Fall trat im 46. Reinigungszyklus, nachdem 45 Belastungen in gleicher Spülspur ohne sichtbare Veränderungen blieben, eine deutliche Materialveränderung in Form einer delaminierten Fläche von ca. 35 x 45 mm auf (vgl. Bild 211). Im zweiten

Versuch lag nach Abschluss der 50 Reinigungszyklen ein kleinflächiger Materialabtrag von ca. 4 x 12 mm vor. Freiliegende Fasern waren in diesem Fall nicht feststellbar (vgl. Bild 212).



5.4.5.1.5 Zusammenfassung

Vergleichende HD-Systemversuche

In den vergleichenden HD-Systemversuchen (0 und 5 Liter Splittzugabe, 50 Reinigungszyklen) wurde an einzelnen Rohrverbindungen deutlich erkennbar Material abgetragen, so dass Faserbereiche freilagen. In Folge der Splittzugabe (5 Liter) erhielt der Materialabtrag eine abrasive Ausprägung bei ähnlicher Fläche und Tiefe.

Wiederholungsversuche

Im Rahmen der Wiederholungsversuche wurden die Ergebnisse aus den vergleichenden HD-Systemversuchen bestätigt, auch hier waren im Verbindungsbereich Materialveränderungen ähnlicher Intensität als klein- bis großflächige Delaminationen der harzreichen Innenschicht zu beobachten.

Zusatzversuche

Im erweiterten HD-Systemversuch, d.h. 20 Liter Splittzugabe und 10 zusätzliche Reinigungszyklen (insgesamt 60), zeigten sich ähnliche Materialveränderungen wie im vergleichenden HD-Systemversuch mit 5 Liter Splitt. Eine Zunahme in der Intensität der Materialveränderungen war nicht feststellbar. In den Düsen-Strahlversuchen mit HD-Spüldüse und HD-Einzelstrahl wurden die Beobachtungen aus den vergleichenden HD-Systemversuchen ohne Splittzugabe grundsätzlich bestätigt. Allerdings zeigten ergänzende Düsen-Strahlversuche mit HD-Spüldüse bei einem Düsenabstand zur Rohrsohle von ca. 1cm deutliche Unterschiede in der

Wirkung verschiedener Düsensysteme. Während bei Einsatz von Düsen mit großem Abstrahlwinkel (Düse D2, 5x30°, 5x20°) sichtbare Veränderungen in den Rohrverbindungen auftraten, wiesen die Rohre nach Einsatz einer Düse mit ausschließlich flachen Abstrahlwinkeln von 20° auch unter hohen Drücken von 120 bar nahezu keine Veränderungen auf. Im Düsenschleif- und –fallversuch zeigten sich die Probekörper widerstandsfähig gegenüber der mechanischen Belastung durch den Düsenkörper.

Ergänzende Untersuchungen an modifizierten Prüfkörpern

Die zusammenfassende Betrachtung der Prüfergebnisse an den **modifizierten Prüfkörpern** zeigt, dass in diesen Fällen die Widerstandsfähigkeit gegenüber den HD-Strahlbelastungen sowohl in den HD-System- als auch Düsen-Strahlversuchen mit HD-Einzelstrahl deutlich verbessert wurde.

5.4.5.2 Gewickelte GFK-Rohre (Amitech Germany GmbH)

5.4.5.2.1 Produktbeschreibung und Versuchsübersicht

Zur Bestätigung bzw. Relativierung des in Abschnitt 5.4.5.1 beobachteten Materialverhaltens wurden HD-Systemversuche an Rohrleitungen einer weiteren Produktvariante aus GFK wiederholt und Zusatzversuche (HD-Systemversuch mit Prüfdüse D2, Düsen-Strahlversuche mit Prüfdüse D1 sowie Düsen-Schleif- und Düsen-Fall-Versuche) ausgeführt. Dazu eingesetzt wurden gewickelte GFK-Rohre (Rohre aus glasfaserverstärktem Polyesterharz) nach DIN 16868 Teil 1 [71] und Teil 2 [72] sowie DIN 19565 [70]) der Amitech Germany GmbH (vgl. Tabelle 47).

Tabelle 47: Übersicht zu Probekörpern, Prüfungen und Prüfparametern

Rohre									
		<p>Flowtite GFK Kanalrohre der Amitech Germany GmbH Kanalrohre aus gewickeltem, glasfaserverstärktem Polyesterharz (UP-GF) nach DIN 16868 [71 und 72] sowie DIN 19565 [70], ohne oder mit einseitig aufgezogener Kupplung (vgl. Formstücke), Nennweite DN 300, Nenndruck PN 1 (Freispiegel) und einer Nennsteifigkeit SN 10.000 N/m², mit versiegelten Rohrspiegelkanten. Die Baulänge der Rohre beträgt 6 m.</p>							
Formstücke									
		<p>Formstücke aus gewickeltem, glasfaserverstärktem Polyesterharz (UP-GF) nach DIN 16868 [71 und 72] sowie DIN 19565 [70]: REKA Kupplung für Flowtite Kanalrohre (vgl. auch Bild 213) mit Dichtringen aus EPDM und Anschlagring für vg. Flowtite Kanalrohre. GFK-Anschlussstutzen DN150 (vgl. Bild 214), direkt einlamiert, 45° und einem Nenndruck PN 1 (Freispiegel). GFK-Gelenkstücke ohne oder mit einseitig aufgezogener Kupplung, Nennweite DN 300, Nenndruck PN 1 (Freispiegel) und einer Nennsteifigkeit SN 10.000 N/m². Die Baulänge der Gelenkstücke beträgt 1 m.</p>							
Prüfmethode	HD- Systemversuch				Düsen-Strahlversuch			Düsen-Schleif-Versuch	Düsen-Fall-Versuch
					Einzelstrahl	Spüldüse			
									
Anzahl Bauteile Rohr/Verbindung/Anschluss	11/8/12				-	24/12/-		14/7/-	3/-/-
Prüfdüse (vgl. Abschn. 4.2)	D1	D2	D4	D20	D1	D2	D1	D1	
Splittzugabe [Liter/Zyklus]	0	5	0 ¹	20 ²	0	0	0	0	0
Versuchsanzahl	2	-	1	-	-	5	-	7	3

- nicht untersucht

■ **Vergleichende HD-Systemversuche mit 0 bzw. 5 Liter Splittzugabe**

■ **Wiederholungsversuche** dienen der Bestätigung bzw. Relativierung von Einzelbeobachtungen an demselben oder einem anderen Produkt der gleichen Werkstoffgruppe.

□ **Zusatzversuche** dienen der isolierten Betrachtung von Einflussfaktoren (Schleifen, HD-Einzelstrahl) und Variation der Reinigungsbedingungen, wie Ablagerungsmenge, Reinigungszyklen und Düseneigenschaften (Düsenstrahl und -winkel).

1 30 Reinigungszyklen durchgeführt (vgl. Abschnitt 5.3)

2 bei 20 l Splittzugabe grundsätzlich mit 10 zusätzlichen Zyklen, d.h. insgesamt 60 Reinigungszyklen durchgeführt (vgl. Abschnitt 5.3)

5.4.5.2.2 Vergleichende HD-Systemversuche

Für das oben beschriebene Produkt wurden *keine* vergleichenden HD-Systemversuche durchgeführt.

5.4.5.2.3 Wiederholungsversuche

Zur Bestätigung bzw. Relativierung des in Abschnitt 5.4.5.1 beobachteten Materialverhaltens an einem anderen Produkt der gleichen Werkstoffgruppe wurden mit dem hier eingesetzten Produkt insgesamt zwei Wiederholungsversuche als **HD-Systemversuch ohne Splittzugabe** durchgeführt. Im Gesamtblick beider Versuche wurde an 3 von 6 Rohrverbindungen kleinflächiger Materialabtrag im Bereich des Rohrspiegels, der dem Düsenstrahl zugewandt ist, festgestellt. Die Abtragsflächen haben eine Größe von ca. 3 bis 25 cm² und eine maximale Tiefe von 2,0 mm. Die harzreiche Innenschicht ist dabei stellenweise abgetragen, so dass Fasern der Tragschicht freiliegen (vgl. Bild 215). An der Oberfläche der Abzweige waren keine Materialveränderung optisch feststellbar (vgl. Bild 216 und Bild 217).

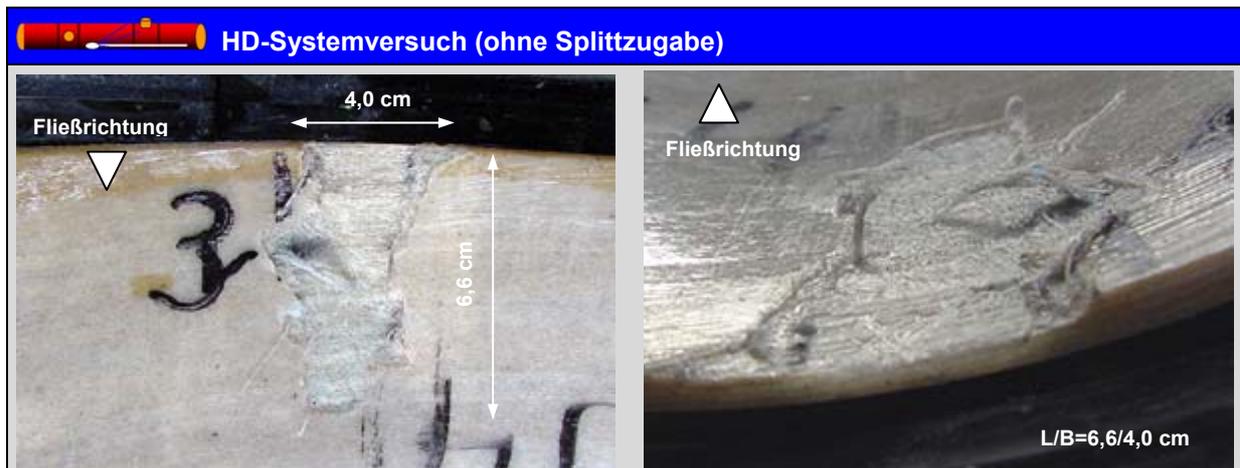


Bild 215: **Belastung:** 50 Zyklen- kein Splitt- Düse D1 (8 * 30°), rechts vergrößert dargestellt



Bild 216: **Belastung:** 50 Zyklen-kein Splitt-D1 (8x30°)

Bild 217: **Belastung:** 50 Zyklen-keinSplitt-D1 (8x30°)

Prüfung	maßgeblicher Ort der Materialveränderung	Größe des Abtrags		beobachtete Häufigkeit
	Schaft(S) /Verbindung (V)/ Abzweig (A)	Fläche [cm ²]	max. Tiefe [mm]	
HD-Systemversuch	(V), Materialveränderung beschränkte sich auf den gekammerten Verbindungsbereich	< 25	< 2	3 (V) von 6 (V)

Bemerkung: Nach den Prüfbelastungen wurden durch Materialabtrag Textilglas-Fasern freigelegt

Im Rahmen der HD-Systemversuche wurden die Rohrstränge auch einer **stationären Belastung**, d.h. einer punktuellen Dauerbelastung durch eine über drei Minuten ortsfest gehaltene Düse, ausgesetzt. Infolge dieser Belastung zeigten sich an der Rohroberfläche optisch keine Veränderungen (vgl. Bild 218 und Bild 219). Die auf den Bildern sichtbaren schwarzen Verfärbungen resultieren aus dem Abrieb des Spülschlauchmaterials.



Bild 218: **Belastung:** 3 min stationär - kein Splitt- D1 (8x30°)

Bild 219: **Belastung:** 3 min stationär - kein Splitt- D1 (8x30°)

5.4.5.2.4 Zusatzversuche

Über die Wiederholungsversuche hinaus wurde ein HD-Systemversuch mit der Prüfdüse D2 und 30 Reinigungszyklen ohne Splittzugabe durchgeführt. Im Ergebnis wurden nach dieser Versuchsbelastung keine nennenswerten Materialveränderungen beobachtet (vgl. Bild 222 und Bild 221).

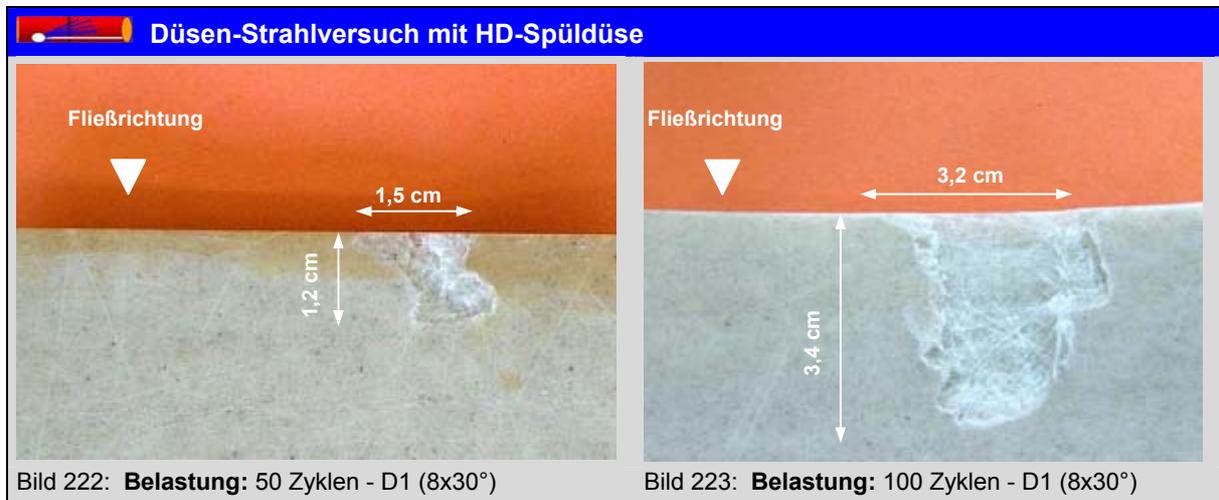


Bild 220: **Belastung:** 30 Zyklen -kein Splitt-D2 (5x20°, 5x30°)

Bild 221: **Belastung:** 30 Zyklen -kein Splitt- D2 (5x20°, 5x30°)

Im Rahmen der **Düsen-Strahlversuche mit HD-Spüldüse** wurde die Belastung mit der Prüfdüse D1, die über 8 Düseneinsätze unter einem Strahlwinkel von 30° verfügt, aufgebracht. Dabei wurde an zwei von fünf Rohrverbindungen ebenfalls Materialabtrag festgestellt (vgl. Bild 222). Die Ausprägung der beobachteten Materialveränderungen ist vergleichbar mit den Ergebnissen aus dem HD-Systemversuch. Um den Einfluss der Zahl der Reinigungsvorgänge zu verifizieren, wurde in einer Sonderprüfung die Prüfbelastung auf 100 Reinigungszyklen

gesteigert. Die Abtragsfläche vergrößerte sich durch abrasive Ausprägung, allerdings überstieg die Gesamtfläche nicht das bereits in den HD-Systemversuchen bei 50 Zyklen beobachtete Maß (vgl. Bild 223).



Nach den **Düsen-Schleif-** und **Düsen-Fall-Versuchen** waren keine Materialveränderungen optisch feststellbar.

Tabelle 48: Material nach mechanischer Belastung durch Düse



Wasserundurchlässigkeit und Dichtheit

Die drei Rohrstellen mit deutlichem Materialabtrag in den HD-Systemversuchen wurden aus dem Rohr herausgeschnitten und hinsichtlich ihrer Wasserundurchlässigkeit (vgl. auch Abschnitt 5.4.2) überprüft. Bei sämtlichen drei Prüfungen wurden die Prüfkriterien der Wasserundurchlässigkeit erfüllt (vgl. Bild 226 und Bild 227).

Wasserundurchlässigkeitsprüfung

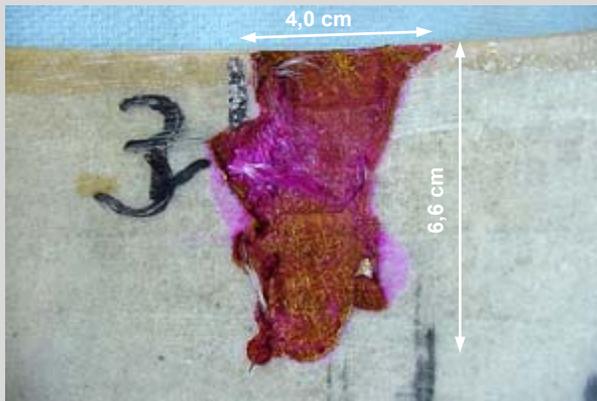


Bild 226: Ort: Haltung 2.17, Rohrstoß 3, Rohrinnenfläche



Bild 227: Ort: Haltung 2.17, Rohrstoß 3, Rohraußenfläche nach Prüfabschluss

Konstruktionsbedingt ist zu erwarten, dass die Rohrverbindungen unabhängig von der Tiefe der Materialveränderung dicht bleiben, wenn diese Veränderungen ausschließlich im Überdeckungsbereich der Überschiebkupplung liegen. Dies wurde durch eine ergänzende Dichtheitsprüfung (Muffenprüfung) an einer Rohrverbindung bestätigt, aus der zuvor ein Abschnitt von 4,0 x 6,6 cm Größe im Überdeckungsbereich der Überschiebkupplung herausgeschnitten wurde (vgl. Bild 229). Die von diesem Materialabtrag betroffene Rohrverbindung wurde in Anlehnung an DIN EN 1610 [62] durch eine Wasserdruckprüfung mit einem Prüfdruck von 0,5 bar, d.h. mit 5 m Wassersäule, auf Dichtheit überprüft. Während der Prüfzeit trat kein Wasser an der Rohraußenseite oder im Verbindungsbereich aus. In den vorliegenden HD-Belastungsversuchen wurden in keinem Fall Abtragsflächen an den Rohrverbindungen festgestellt, die das hier angesetzte Maß von 4,0 x 6,6 cm überschritten.

Dichtheitsprüfung an Rohrverbindung mit Rohrausschnitt

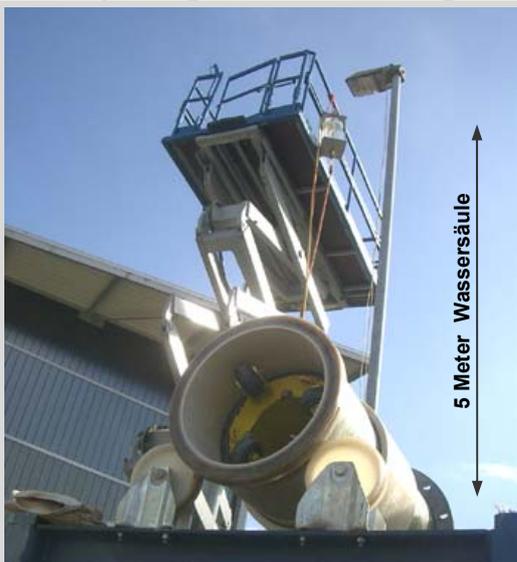


Bild 228: Prüfaufbau



Bild 229: Prüfstück mit Ausschnitt am Rohrstoß

5.4.5.2.5 Zusammenfassung

Vergleichende HD-Systemversuche

Vergleichende HD-Systemversuche (2 Versuche ohne Splittzugabe und 1 Versuch mit 5 Liter Splittzugabe) wurden für dieses Produkt *nicht* durchgeführt.

Wiederholungsversuche

Zur Bestätigung bzw. Relativierung des in Abschnitt 5.4.5.1 beobachteten Materialverhaltens an einem anderen Rohrprodukt der gleichen Werkstoffgruppe wurden einzelne HD-Systemversuche an dem hier dargestellten Produkt durchgeführt. In zwei HD-Systemversuchen ohne Splittzugabe wurde an einzelnen Rohrverbindungen deutlich erkennbar Material abgetragen, so dass Faserbereiche freigelagen.

Zusatzversuche

In den Düsen-Strahlversuchen mit HD-Spüldüse wurden die o.a. Beobachtungen der *Wiederholungsversuche* grundsätzlich bestätigt. Auch hier wurde an einzelnen Rohrverbindungen deutlich erkennbar Material abgetragen, so dass Faserbereiche freigelagen. Im Vergleich war der Materialabtrag jedoch kleinflächiger ($< 3 \text{ cm}^2$). In einem HD-Systemversuch mit der Prüfdüse D2 und 30 Belastungszyklen ohne Splittzugabe wurden keine nennenswerten Materialveränderungen festgestellt. Im Düsenschleif- und –fallversuch zeigten sich die Probekörper widerstandsfähig gegenüber der mechanischen Belastung durch den Düsenkörper.

5.4.6 PE-HD

5.4.6.1 Vollwandrohre aus PE-HD (AGRU-FRANK GmbH)

5.4.6.1.1 Produktbeschreibung und Versuchsübersicht

Im Bereich des Werkstoffs PE-HD wurden zunächst Prüfungen an Vollwandrohren ausgeführt. Dabei wurden im Rahmen der vergleichenden HD-Systemversuche glattwandige Vollwandrohre aus PE 80 (Rohre aus Polyethylen hoher Dichte) für Abwasserkanäle und -leitungen nach DIN 19537 [73, 74], DIN 8074 [75] und DIN 8075 [76] der Nennweite DN 300 des Herstellers AGRU-FRANK GmbH eingesetzt (vgl. Tabelle 49).

Tabelle 49: Übersicht zu Probekörpern, Anzahl der Prüfungen und Prüfparametern

Rohre									
 Bild 230: PE 80 Kanalrohre		Extrudierte Kanalrohre aus PEHD der Agru-Frank GmbH, Rohr nach DIN 19537 – DN 300 x 6 - 4, Glattwandige Vollwandrohre aus PE 80 (Rohre aus Polyethylen hoher Dichte) Nennweite DN 300, $d_1 = 355\text{mm}$, $s = 20,1\text{ mm}$, SDR 17,6, PN 6 für Abwasserkanäle und -leitungen nach DIN 19537 [73, 74], DIN 8074 [75] sowie 8075 [76] mit heller Innenbeschichtung. Die Baulänge beträgt 6,0 m. Jeweils 2 Rohrverbindungen wurden mit einer Stumpfschweißnaht ausgeführt. Bei einer Verbindung wurde die Innenwulst entfernt. Die dritte Verbindung wurde mit einer Heißwendelschweißmuffe hergestellt.							
		Formstücke							
 Bild 231: PE 80 Seitenzuläufe		Heißwendelschweißmuffe aus PE 100, SDR11, PN16, in Anlehnung an DIN 16963 Teil 5 [85] für v.g. PE-HD Rohre. Eingeschweißte 90° bzw. 45° Seitenzuläufe aus glattwandigen Vollwandrohren aus PE 80 (Rohre aus Polyethylen hoher Dichte), $d_1 = 160\text{mm}$, $s=9,1\text{ mm}$, SDR 17,6 nach DIN 19537 [73, 74], DIN 8074 [75] sowie 8075 [76] mit heller Innenbeschichtung (vgl. Bild 231).							
		Prüfmethode	HD- Systemversuch			Düsen-Strahlversuch			Düsen-Schleif-Versuch
Einzelstrahl	Spüldüse								
									
Anzahl Bauteile Rohr/Verbindung/Anschluss	12/9/12			-	-		-		
Prüfdüse (vgl. Abschn.4.2)	D1	D2	D4	D20	D1	D2	D1	D1	
Splitzugabe [Liter/Zyklus]	0	5	0	20 ¹	0	0	0	0	0
Versuchsanzahl	2	1	-	-	-	-	-	-	-

- nicht untersucht

■ Vergleichende HD-Systemversuche mit 0 bzw. 5 Liter Splitzugabe

□ Zusatzversuche dienen der isolierten Betrachtung von Einflussfaktoren (Schleifen, HD-Einzelstrahl) und Variation der Reinigungsbedingungen, wie Ablagerungsmenge, Reinigungszyklen und Düseneigenschaften (Düsenstrahl und -winkel)

1 bei 20 l Splitzugabe grundsätzlich mit 10 zusätzlichen Zyklen, d.h. insgesamt 60 Reinigungszyklen durchgeführt (vgl. Abschnitt 5.3)

5.4.6.1.2 Vergleichende HD-Systemversuche

Im Rahmen der zwei vergleichenden HD-Systemversuche **ohne Splitt** waren nach Belastung mit beweglichem Düsenstrahl lediglich leichte Schleifspuren in der Rohrsohle der Verbindungsbereiche feststellbar.

Nach Zugabe von **5 Liter Splitt** je Reinigungszyklus war im Sohlbereich der Rohre und an den Rohrverbindungen im Vergleich zu den Ergebnissen ohne Splittzugabe der Abrieb etwas ausgeprägter. Insbesondere war nahe der Splittzugabe-Station die Rohrwandung und der Einbindungsbereich der dortigen Abzweige leicht aufgeraut. Der Materialabtrag lag dabei unterhalb von 1 mm.

Im Rahmen der HD-Systemversuche wurden die Rohrstränge auch einer **stationären Belastung**, d.h. einer punktuellen Dauerbelastung durch eine über drei Minuten ortsfest gehaltene Düse, ausgesetzt. Infolge dieser Belastung traten keine sichtbaren Materialveränderungen auf.

Die Materialveränderungen waren durch TV-Inspektion kaum feststellbar. Sie waren erst durch die unmittelbare Inaugenscheinnahme der Bauteiloberflächen nach dem Aufschneiden der Prüfkörper erkennbar.

HD-Systemversuch (ohne Splittzugabe)



Bild 232: **Belastung:** 50 Zyklen-ohne Splitt-D1 (8x30°)



Bild 233: **Belastung:** 50 Zyklen-ohne Splitt-D1 (8x30°)

HD-Systemversuch (mit Zugabe von 5 Liter Splitt je Zyklus)



Bild 234: **Belastung:** 50 Zyklen-Splitt: 5l-D1 (8x30°)



Bild 235: **Belastung:** 50 Zyklen-Splitt: 5l-D1 (8x30°)

Prüfung	maßgeblicher Ort der Materialveränderung	beobachtete Häufigkeit	Größe des Abtrags	
			Fläche [cm²]	max. Tiefe [mm]
HD-Systemversuche	Verbindung/Abzweig	regelmäßig	unregelmäßig	leicht aufgeraut
*Bemerkung: -				

5.4.6.1.3 Zusammenfassung

Vergleichende HD-Systemversuche

In den vergleichenden HD-Systemversuchen (0 und 5 Liter Splittzugabe, 50 Reinigungszyklen) zeigte sich an einzelnen Rohrverbindungen und Abzweigen ein Materialabtrag von max. 1 mm Tiefe. Die Materialveränderungen waren durch TV-Inspektion kaum feststellbar. Sie waren erst durch die unmittelbare Inaugenscheinnahme der Bauteiloberflächen nach dem Aufschneiden der Prüfkörper erkennbar.

5.4.6.2 Vollwandrohre aus PE-HD (egeplast Werner Strumann GmbH & Co. KG)

5.4.6.2.1 Produktbeschreibung und Versuchsübersicht

In Ergänzung zu den in Abschnitt 5.4.6.1 dargestellten Prüfungen an einem PE-HD-Rohrprodukt eines anderen Herstellers wurden die nachfolgend beschriebenen Zusatzversuche durchgeführt. Dabei wurden glattwandige Vollwandrohre aus PE 80 (Rohre aus Polyethylen hoher Dichte) für Abwasserkanäle und -leitungen nach DIN 19537 ([73, 74]), DIN 8074 [75] und DIN 8075 [76] des Herstellers egeplast Werner Strumann GmbH & Co. KG eingesetzt (vgl. Tabelle 50). Es wurden HD-Systemversuche mit erhöhter Splittzugabe bzw. auch erhöhter Anzahl der Reinigungszyklen und Düsen-Strahlversuche mit intensivem HD-Einzelstrahl sowie Düsen-Fall-Versuche ausgeführt.

Tabelle 50: Übersicht zu Probekörpern, Prüfungen und Prüfparametern

Rohre										
		PE-HD Rohr, egeplast SL-(Safety-Line®) Kanalrohre Glattwandige Vollwandrohre aus PE 80 (Rohre aus Polyethylen hoher Dichte), $d_e = 315 \times 17,9$ mm (HD-Systemversuche) und $d_e = 355 \times 20,1$ mm (Düsen-Strahlversuch mit HD-Einzelstrahl), SDR 17,6, PN 06 für Abwasserkanäle und -leitungen nach DIN 19537 [73, 74] und DIN 8074 [75] sowie 8075 [76] mit heller Innenbeschichtung. Baulänge: 6,0 m, 3,0 m ^{*1} , 1,0 m ^{*1}								
Formstücke/Verbindungsmitel										
		Abwassersystem FRIAFIT® der FRIATEC AG Heizwendelschweißmuffe Friafit® AM, SDR17, PE 100 nach DIN 19537 [73, 74] für PE-HD Rohre DA 315 und DA 355 (vgl. Bild 236). Heizwendelschweißsattel FRIAFIT® ASA-TL d = 315/160 und d = 355/160 aus PE 100.								
Prüfmethode	HD- Systemversuch				Düsen-Strahlversuch			Düsen-Schleif-Versuch	Düsen-Fall-Versuch	
					Einzelstrahl	Spüldüse				
										
Anzahl Bauteile Rohr/Verbindung/Anschluss	10/8/8				6/3/2			-	-	3/-/-
Prüfdüse (vgl. Abschn. 4.2)	D1		D2		D4		D20	D1	D2	D1
Splittzugabe [Liter/Zyklus]	0	5	0	20 ^{*2}		0	0	0	0	0
Versuchsanzahl	-	-	-	2		3	-	-	-	3

- nicht untersucht

■ Vergleichende HD-Systemversuche mit 0 bzw. 5 Liter Splittzugabe

Zusatzversuche zur isolierten Betrachtung von Einflussfaktoren (Schleifen, HD-Einzelstrahl) und Variation der Reinigungsbedingungen, wie Ablagerungsmenge, Reinigungszyklen und Düseneigenschaften (Düsenstrahl und -winkel)

*1 keine Standardbaulängen, die Probekörper wurden auf die erforderlichen Längen geschnitten

*2 bei 20 l Splittzugabe grundsätzlich mit 10 zusätzlichen Zyklen, d.h. insgesamt 60 Reinigungszyklen durchgeführt (vgl. Abschnitt 5.3)

5.4.6.2.2 Vergleichende HD-Systemversuche

Für das oben beschriebene Produkt wurden *keine* vergleichenden HD-Systemversuche (2 Versuche ohne Splittzugabe und ein Versuch mit 5 Liter Splittzugabe) durchgeführt.

5.4.6.2.3 Zusatzversuche

In den zwei HD-Systemversuchen mit zusätzlicher Belastung durch Splittzugabe von **20 Litern** je Reinigungszyklus und 10 zusätzlichen Reinigungszyklen (insgesamt 60 Zyklen) zeigten sich leichte Schleifspuren und vereinzelt auch punktförmiger Materialabtrag von maximal 1 mm Tiefe. Insbesondere im Bereich der Splittzugabestelle wurde eine leicht aufgeraute Rohrwandung über den Rohrumfang beobachtet. Die Rohrstöbe zeigen im Sohlbereich, auf der dem Wasserstrahl zugewandten Seite, geringen Materialabtrag auf kleiner Fläche (vgl. Bild 239). Geringfügiger Materialabtrag wurde auch im Einbindungsbereich der Heizwendelschweißsättel an den Bohrkanten beobachtet. Dieser erstreckte sich mit einer Breite von 0,5 cm über eine Umfangslänge von ca. 20 cm (vgl. Bild 240 und Bild 241).

Im Rahmen der HD-Systemversuche wurden die Rohrstränge auch einer **stationären Belastung**, d.h. einer punktuellen Dauerbelastung durch eine über drei Minuten ortsfest gehaltene Düse, ausgesetzt. Infolge dieser Belastung waren optisch keine Materialveränderungen feststellbar.

HD-Systemversuch (mit 20 Litern Splittzugabe je Zyklus)

Bild 238: **Belastung:** 60 Zyklen-Splitt: 20I-D4 (5x10°, 5x20°)

Bild 239: **Belastung:** 60 Zyklen-Splitt: 20I-D4 (5x10°, 5x20°)

Bild 240: **Belastung:** 60 Zyklen-Splitt: 20 I-D4 (5x10°, 5x20°)

Bild 241: **Ort:** Detailansicht von Bild 240

Prüfung	maßgeblicher Ort der Materialveränderung Schaft (S)/Verbindung (V)/ Abzweig (A)	Größe des Abtrags		beobachtete Häufigkeit
		Fläche [cm²]	max. Tiefe [mm]	
HD-Systemversuch	Verbindung, Abzweig	10	1	regelmäßig

Bemerkung: ---

Bei den **Düsen-Strahlversuchen mit HD-Einzelstrahl** konnten im Bereich des Rohrschaftes und der Verbindungen keine Materialveränderungen optisch festgestellt werden. Bei allen drei durchgeführten Prüfungen war jedoch bereits nach den ersten Belastungszyklen eine Undichtigkeit an den angeschweißten Sattelstücken durch sichtbar austretendes Spülwasser erkennbar. Im Bereich der Schnittkante der Kernbohrung des Rohres und der während der Prüfung nicht abgedeckten Schweißzone war Materialabtrag deutlich erkennbar (vgl. Bild 242). Offen bleibt, ob diese Undichtigkeiten bereits nach Einbau der Sattelstücke, d.h. vor der Spühlstrahlbelastung, bestanden.

Düsen-Strahlversuch mit HD-Einzelstrahl

Bild 242: **Belastung:** 50 Zyklen - D20 (1x30°)

Bild 243: **Belastung:** 50 Zyklen - D20 (1x30°)

Prüfung	maßgeblicher Ort der Materialveränderung	Größe des Abtrags		beobachtete Häufigkeit
	Schaft (S)/Verbindung (V)/ Abzweig (A)	Fläche [cm²]/	max. Tiefe [mm]	
HD-Einzelstrahlprüfung	Abzweig (A)		1	regelmäßig

Bemerkung: An der Rohraußenseite im Sattelbereich sichtbar austretendes Wasser während der HD-Einzelstrahlprüfung

Im **Düsen-Fall-Versuch**, nach mechanischer Belastung der Rohrsohle durch den Fall der Düse aus Scheitelhöhe (DN 300) auf die Rohrsohle, wurden optisch keine Materialveränderungen festgestellt.

Düsen-Fall-Versuch

Auftreffort

Bild 244: **Belastung:** 1 Düsenfall, Düse D1 (4,5 kg)
Lagerung: Sandbettung

5.4.6.2.4 Zusammenfassung

Vergleichende HD-Systemversuche

Für dieses Produkt wurden *keine* vergleichenden HD-Systemversuche durchgeführt.

Zusatzversuche

In den zwei erweiterten HD-Systemversuchen mit 20 Liter Splittzugabe und 10 zusätzlichen Reinigungszyklen (insgesamt 60) zeigte sich an einzelnen Rohrverbindungen ein Materialabtrag von max. 1 mm. In den Düsen-Strahlversuchen mit HD-Einzelstrahl und extremen Reinigungsparametern wurden diese Beobachtungen für die Rohrwandung grundsätzlich bestätigt. Jedoch waren im Anschlussbereich der Heizwendelschweißsättel offensichtliche Materialveränderungen feststellbar. Darüber hinaus zeigten sich Undichtigkeiten an den Sattelstücken. Offen bleibt allerdings, ob diese Undichtigkeiten bereits nach Einbau der Sattelstücke, d.h. vor der Spühlstrahlbelastung, bestanden. In der Betriebspraxis ist allerdings davon auszugehen, dass der HD-Strahl erst nach einem deutlich längeren Strahlweg auf den seitlichen Anschluss im Kämpfer bzw. Scheitel trifft (vgl. 8 mm Strahlabstand in der HD-Einzelstrahlprüfung). Im Düsen-Fall-Versuch zeigten sich die Probekörper widerstandsfähig gegenüber der mechanischen Belastung durch den Düsenkörper.

5.4.6.3 Profilierte Kunststoffrohre aus PE-HD (Henze GmbH)

5.4.6.3.1 Produktbeschreibung und Versuchsübersicht

Neben den Untersuchungen an Vollwandrohren wurden auch an profilierten Rohren aus PE-HD vergleichende HD-Systemprüfungen und Zusatzversuche (Düsen-Strahlversuche mit HD-Spüldüse, Düsen-Schleif- und Düsen-Fall-Versuche) ausgeführt. Dabei wurden Rohre und Formstücke aus PE-HD mit profilierter Wandung und glatter Rohrrinnenfläche nach DIN 16961 Teil 1 [77] und Entwurf DIN 19568-100 [78] bzw. prEN 13476 T.1 [79] mit einem Außendurchmesser von DA 360 des Herstellers Henze GmbH eingesetzt (vgl. Tabelle 51).

Tabelle 51: Übersicht zu Probekörpern, Prüfungen und Prüfparametern

Rohre									
		Profilierte Kunststoffrohre aus PE 80 der Henze GmbH Profil-Wickelrohr nach DIN 16961 [77] und Entwurf DIN 19568-100 [78] bzw. prEN 13476 T.1 [79] mit glatter, gelber Innenfläche und hohlem spiralförmig profilierten Außenprofil der Henze-Profilausführung Typ II aus PE-80, Rohrnennweite DN 300, Außendurchmesser DA 374, Mindeswanddicke 5,0 mm, Ringsteifigkeit $S_{R24} = 90 \text{ KN/m}^2$. Die Baulänge der Abwasserrohre beträgt 6,0 m. Die Verbindung besteht aus Spitzende und Muffe und wurde durch Extrusionsschweißen hergestellt.							
Bild 245: Profilierte Rohre									
Formstücke									
		Eingeschweißte Seitenzuläufe aus PE-80 der Henze GmbH Eingeschweißte Abzweige aus PE 80 (Abzweige aus Polyethylen hoher Dichte) nach DIN 16961 [77], 90° bzw. 45°, Rohrnennweite DN ₁ 300 / DN ₂ 150, DA ₁ 374 / DA ₂ 160, s = 4,9 mm und SDR 33.							
Bild 246: Anschlüsse									
Prüfmethode	HD- Systemversuch				Düsen-Strahlversuch			Düsen-Schleif-Versuch	Düsen-Fall-Versuch
					Einzelstrahl	Spüldüse			
									
Anzahl Bauteile Rohr/Verbindung/Anschluss	12/9/12				--	10/5/-		6/3/-	3/-/-
Prüfdüse (vgl. Abschn. 4.2)	D1	D2	D4	D20	D1	D2	D1	D1	
Spültzugabe [Liter/Zyklus]	0	5	0	20 ¹	0	0	0	0	
Versuchsanzahl	2	1	-	-	-	4	-	3	3

- nicht untersucht

■ Vergleichende HD-Systemversuche mit 0 bzw. 5 Liter Splittzugabe

□ Zusatzversuche zur isolierten Betrachtung von Einflussfaktoren (Schleifen, HD-Einzelstrahl) und Variation der Reinigungsbedingungen, wie Ablagerungsmenge, Reinigungszyklen und Düseneigenschaften (Düsenstrahl und -winkel)

* bei 20 l Splittzugabe grundsätzlich mit 10 zusätzlichen Zyklen, d.h. insgesamt 60 Reinigungszyklen durchgeführt (vgl. Abschnitt 5.3)

5.4.6.3.2 Vergleichende HD-Systemversuche

Im Rahmen der drei vergleichenden **HD-Systemversuche** (2 Versuche ohne und 1 Versuch mit 5 Liter Splittzugabe) wurden lediglich leichte Materialveränderungen in

Form von geringfügigem Abtrag und Schleifspuren im Sohlbereich festgestellt. In den zwei Versuchen **ohne Splittzugabe** wurden herstellungsbedingte Nahtkanten der gelben Innenschicht in einzelnen Fällen geringfügig abgetragen (vgl. Bild 248).

Im Rahmen des Versuchs mit einer zusätzlichen Belastung durch Zugabe von **5 Liter Splitt** je Reinigungszyklus war kein signifikant verändertes Materialverhalten zu beobachten. Es wurde lediglich die gelbe Innenschicht im Sohlbereich stärker aufgeraut und an einzelnen Stellen kleinflächig abgetragen (vgl. Bild 249). Bild 250 zeigt einen Versatz im Verbindungsbereich der Sohle, der bereits vor der Prüfung vorhanden war. Durch den Spülvorgang und zusätzliche Belastung durch Splitt wurde die vorstehende Kante der gelben Innenschicht abgeschliffen.

▶ HD-Systemversuch (ohne Splittzugabe)



Bild 247: **Belastung:** 50 Zyklen-kein Splitt-D1 (8x30°)

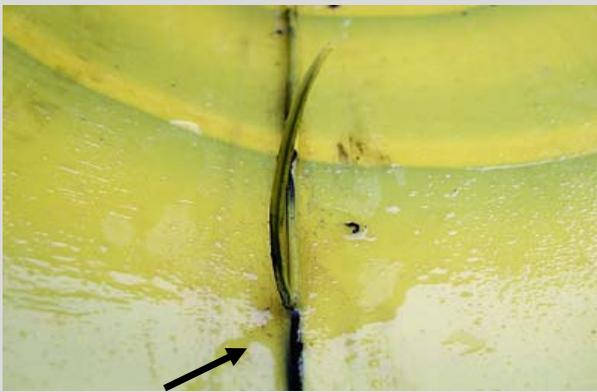


Bild 248: **Belastung:** 50 Zyklen-kein Splitt-D1 (8x30°)

▶ HD-Systemversuch (mit Zugabe von 5 Litern Splitt)



Bild 249: **Belastung:** 50 Zyklen-Splitt: 5l-D1 (8x30°)



Bild 250: **Belastung:** 50 Zyklen-Splitt: 5l-D1 (8x30°)

Prüfung	maßgeblicher Ort der Materialveränderung	beobachtete Häufigkeit	Größe des Abtrags	
	Schaft(S) /Verbindung (V)/ Abzweig (A)		Fläche [cm²]	max. Tiefe [mm]
HD-Systemversuch	S	in Einzelfällen	3	1
*Bemerkung:				

Im Rahmen der HD-Systemversuche wurden die Rohrstränge auch einer **stationären Belastung**, d.h. einer punktuellen Dauerbelastung durch eine über drei Minuten ortsfest gehaltene Düse, ausgesetzt. Infolge dieser Belastung traten keine sichtbaren Materialveränderungen auf.

Im TV-Inspektionsvideo erschienen die Materialveränderungen aufgrund des starken Farbkontrastes zwischen der gelben Innenschicht und dem schwarzen Rohrmaterial optisch als sehr gravierend. Erst durch das Aufschneiden der Prüfkörper konnte nachgewiesen werden, dass es sich um unwesentliche Materialveränderungen handelte, die mit Qualitätsschwankungen im Rahmen der Lieferqualität der Prüfkörper vergleichbar waren.

5.4.6.3.3 Zusatzversuche

Bei den **Düsen-Strahlversuchen mit HD-Spüldüse** konnten im Bereich des Rohrschaftes, der Verbindungen sowie der seitlichen Anschlüsse ebenfalls keine Materialveränderungen festgestellt werden. Die in Bild 251 sichtbare Fehlstelle der gelben Innenschicht ist im Rahmen der Rohrfertigung entstanden. Durch die Hochdruckspülbelastung wurden keine weitergehenden Materialveränderungen verursacht (vgl. Bild 251).



Nach mechanischer Belastung der Rohrsohle im **Düsen-Schleif-Versuch** und **Düsen-Fall-Versuch** waren optisch keine Materialveränderungen feststellbar.

5.4.6.3.4 Zusammenfassung

Vergleichende HD-Systemversuche

In den vergleichenden HD-Systemversuchen (0 und 5 Liter Splitzugabe, 50 Reinigungszyklen) zeigte sich an einzelnen Rohrverbindungen ein Materialabtrag von maximal 1 mm. Infolge der Splitzugabe war lediglich stellenweise eine Aufrauung der Oberfläche der Rohrwandung erkennbar. Die Bewertung der o.a. Materialveränderungen allein auf der Grundlage der TV-Inspektionsergebnisse war unsicher. Im TV-Inspektionsvideo erschienen die Materialveränderungen aufgrund des starken Farbkontrastes zwischen der gelben Innenschicht und dem schwarzen Rohrmaterial optisch als sehr gravierend. Erst durch das Aufschneiden der Prüfkörper konnte nachgewiesen werden, dass es sich um unwesentliche

Materialveränderungen handelte, die mit Qualitätsschwankungen im Rahmen der Lieferqualität der Prüfkörper vergleichbar waren.

Zusatzversuche

In den Düsen-Strahlversuchen mit HD-Spüldüse wurden die Beobachtungen der vergleichenden HD-Systemversuche grundsätzlich bestätigt. Sowohl im Düsen-Schleifversuch als auch im Düsen-Fallversuch zeigten sich die Probekörper widerstandsfähig gegenüber der mechanischen Belastung durch den Düsenkörper.

5.4.6.4 Profilierte Kunststoffrohre aus PE-HD (FRANK & KRAH Wickelrohr GmbH)

5.4.6.4.1 Produktbeschreibung und Versuchsübersicht

Zur Bestätigung bzw. Relativierung des in Abschnitt 5.4.6.3 beobachteten Materialverhaltens wurden HD-Systemversuche an einer weiteren Produktvariante mit zwei unterschiedlichen gemessenen Grundwanddicken (ca. 6 mm bzw. 12 mm) wiederholt. Dabei wurden Rohre und Formstücke aus PE-HD mit profilierter Wandung und glatter Rohrinnefläche nach DIN 16961 [77] des Herstellers FRANK & KRAH Wickelrohr GmbH eingesetzt (vgl. Tabelle 52). Im Vergleich zu dem in Abschnitt 5.4.6.3 untersuchten Prüfkörpern verfügten diese über eine andere Wandungsgeometrie und Anschluss technik.

Tabelle 52: Übersicht zu Probekörpern, Prüfungen und Prüfparametern

Rohre									
		Profilierte Kunststoffrohre aus PE 80 der FRANK & KRAH Wickelrohr GmbH PKS-Profilkanalrohre nach DIN 16961 [77] und Entwurf DIN 19568-100 [78] bzw. prEN 13476 T.1 [79] mit glatter, gelber Innenfläche und hohlem spiralförmig gerippten Außenprofil der Frank & Krah Reihe PR 34 aus PE-80, gemessene Wanddicke ca. 6 bzw. 12 mm, Ringsteifigkeit > $S_{R24} = 63 \text{ kN/m}^2$, Verbindung mit Heißwendelschweißmuffe und -spitzende, Baulänge: 6,00 m.							
		Bild 252: PKS-Rohr							
Formstücke									
		Abwassersattel Typ Condor E/i der Frank & Krah Wickelrohr GmbH Abwassersattel DN 150 für Profilverwickelrohr DA 355 aus PE 100 nach DIN 16961 [77] u. Entwurf DIN 19568-100 [78] bzw. prEN 13476 T.1 [79] Eingeschweißte 45° Seitenzuläufe aus glattwandigen Vollwandrohren aus PE 80 (Rohre aus Polyethylen hoher Dichte), $d_1 = 160 \text{ mm}$, $s=9,1 \text{ mm}$, SDR 17,6 nach DIN 19537 [73, 74], DIN 8074 [75] sowie 8075 [76] mit heller Innenbeschichtung.							
		Bild 253: Anschluss							
Prüfmethode	HD- Systemversuch				Düsen-Strahlversuch			Düsen-Schleif-Versuch	Düsen-Fall-Versuch
					Einzelstrahl	Spüldüse			
Anzahl Bauteile <small>Rohr/Verbindung/Anschluss</small>	4/3/4				-	-		-	-
Prüfdüse <small>(vgl. Abschn. 4.2)</small>	D1	D2	D4	D20	D1	D2		D1	D1
Splittzugabe <small>[Liter/Zyklus]</small>	0	5	0	20 ¹	0	0		0	0
Versuchsanzahl	1 ²	1 ³	-	-	-	-		-	-

- nicht untersucht

■ **Vergleichende HD-Systemversuche mit 0 bzw. 5 Liter Splittzugabe**

■ **Wiederholungsversuche** dienen der Bestätigung bzw. Relativierung von Einzelbeobachtungen an demselben oder einem anderen Produkt der gleichen Werkstoffgruppe.

□ **Zusatzversuche** dienen der isolierten Betrachtung von Einflussfaktoren (Schleifen, HD-Einzelstrahl) und Variation der Reinigungsbedingungen, wie Ablagerungsmenge, Reinigungszyklen und Düseneigenschaften (Düsenstrahl und -winkel)

- 1 bei 20 l Splittzugabe grundsätzlich mit 10 zusätzlichen Zyklen, d.h. insgesamt 60 Reinigungszyklen durchgeführt (vgl. Abschnitt 5.3)
- 2 Produktvariante mit ca. 6 mm gemessener Grundwanddicke
- 3 Produktvariante mit ca. 12 mm gemessener Grundwanddicke

5.4.6.4.2 Vergleichende HD-Systemversuche

Für dieses Produkt wurden *keine* vergleichenden HD-Systemversuche (2 Versuche ohne Splittzugabe und ein Versuch mit 5 Liter Splittzugabe) durchgeführt.

5.4.6.4.3 Wiederholungsversuche

Zur Bestätigung bzw. Relativierung des in Abschnitt 5.4.6.3 beobachteten Materialverhaltens eines anderen Produktes der gleichen Werkstoffgruppe wurden mit dem hier eingesetzten Produkt zwei ergänzende HD-Systemversuche durchgeführt. In dem HD-Systemversuch ohne Splittzugabe wurden Prüfkörper mit einer gemessenen Grundwanddicke von 6 mm (Produkt A) untersucht. In dem Versuch mit 5 Litern Splittzugabe betrug die gemessene Grundwanddicke 12 mm (Produkt B).

Produkt A, gemessene Grundwanddicke 6 mm

Im Rahmen der HD-Systemversuche **ohne Splittzugabe** wurden Materialveränderungen optisch festgestellt. In einzelnen Fällen war Material der gelben Innenschicht geringfügig abgetragen bzw. auch aufgeschoben worden (vgl. Bild 254 und Bild 255).

Im Rahmen der HD-Systemversuche wurden die Rohrstränge auch einer **stationären Belastung**, d.h. einer punktuellen Dauerbelastung durch eine über drei Minuten ortsfest gehaltene Düse, ausgesetzt. Infolge dieser Belastung waren keine Materialveränderungen feststellbar.

Tabelle 53: Materialveränderungen nach HD-Systemversuch, ohne Splittzugabe

HD-Systemversuch				
Prüfung	maßgeblicher Ort der Materialveränderung	Größe des Abtrags		beobachtete Häufigkeit
		Fläche [cm ²]/	max. Tiefe [mm]	
HD-Systemversuch	Schaft/Verbindung/ Abzweig	< 30	1	in Einzelfällen
*Bemerkung: ---				

Produkt B, Grundwanddicke 12 mm

Bei diesem Produkt handelt es sich ebenfalls um Rohre und Formstücke aus PE-HD mit profilierter Wandung und glatter Rohrrinnenfläche nach DIN 16961 [77] des Herstellers FRANK & KRAH Wickelrohr GmbH mit einer gemessenen Grundwanddicke von 12 mm (vgl. Tabelle 52).

Nach der Prüfbelastung im Rahmen eines HD-Systemversuchs mit Zugabe von **5 Liter Splitt** je Reinigungszyklus wurden im TV-Inspektionsvideo Materialveränderungen festgestellt. In einzelnen Fällen war Material der gelben Innenschicht geringfügig abgetragen bzw. auch aufgeschoben worden. In Folge der Splittzugabe traten darüber hinaus an Rohrschaft und Abzweig oberflächliche Materialveränderungen (Aufrauung) an der gelben Innenbeschichtung auf (vgl. Bild 256 und Bild 257).

Im Rahmen der HD-Systemversuche wurden die Rohrstränge auch einer **stationären Belastung**, d.h. einer punktuellen Dauerbelastung durch eine über drei Minuten ortsfest gehaltene Düse, ausgesetzt. Infolge dieser Belastung waren keine Materialveränderungen feststellbar.



5.4.6.4.4 Zusammenfassung

Vergleichende HD-Systemprüfungen

Vergleichende HD-Systemprüfungen (insgesamt 2 Versuche ohne Splittzugabe und ein Versuch mit 5 Liter Splittzugabe) wurden für dieses Produkt *nicht* durchgeführt.

Wiederholungsversuche

Zur Bestätigung bzw. Relativierung des in Abschnitt 5.4.6.3 beobachteten Materialverhaltens an einem anderen Produkt der gleichen Werkstoffgruppe wurden mit dem hier eingesetzten Produkt HD-Systemversuche ohne und mit 5 Liter Splittzugabe durchgeführt. Für die Prüfkörper mit einer gemessenen Grundwanddicke von 6 mm zeigte sich in dem HD-Systemversuch ohne Splittzugabe

an einzelnen Stellen der Rohrsohle ein Materialabtrag von maximal 1 mm Tiefe. Die Prüfkörper mit einer gemessenen Grundwanddicke von 12 mm zeigten ein ähnliches Materialverhalten in dem HD-Systemversuch mit 5 Liter Splittzugabe.

5.4.7 PVC-U

5.4.7.1 Mehrschichtige Rohre aus PVC-U (Funke Kunststoff GmbH)

5.4.7.1.1 Produktbeschreibung und Versuchsübersicht

In vergleichenden HD-Systemversuchen sowie Düsen-Fall-Versuchen wurden Rohre und Formstücke des Herstellers Funke Kunststoff GmbH aus PVC-U (weichmacherfreiem Polyvinylchlorid), SN 8, SDR 34 nach DIN EN 13476 Teil 1 [79] der Nennweite DN 300 eingesetzt (vgl. Tabelle 54).

Tabelle 54: Übersicht zu Probekörpern, Prüfungen und Prüfparametern

Rohre									
		<p>Abwasserrohre aus PVC-U, Produktgruppe CONNEX® der Funke Kunststoffe GmbH Kanalrohre aus PVC-U (weichmacherfreiem Polyvinylchlorid) mit einem dreischichtigen Wandaufbau und geschäumter Mittelschicht, Nennweite DN/OD 315, Wanddicke e= 9,2 mm, SDR 34, Nenn-Ringsteifigkeit SN 8 nach DIN EN 1401 [80] (Konstruktionsmaße) sowie prEN 13476 [79] (Produktion, Wandaufbau), mit angeformter Steckmuffe und fest integriertem Zweikomponenten CONNEX®-CI-Dichtsystem inkl. gelben Stützring aus Polypropylen (PP). Die Baulänge der Rohre beträgt 3,0 m.</p>							
		<p>Bild 258: CONNEX®-Kanalrohr mit HD-Düse</p>							
Formstücke									
		<p>Kompaktabzweige aus PVC-U (weichmacherfreiem Polyvinylchlorid) der Produktgruppe CONNEX®, Nennweite DN₁/OD₁ / DN₂/OD₂ =315/160, 45° nach sowie prEN 13476 [79] (Produktion, Wandaufbau). Sattelstücke aus PVC-U (weichmacherfreiem Polyvinylchlorid), DN/OD 200, 90°, zum Anschluß von FABEKUN®-HS- oder KG-Rohren nach DIN EN 1401 DN/OD 200 (bzw. DN/OD 160 mittels Übergangsrohr) an CONNEX®-Kanalrohre.</p>							
		<p>Bild 259: Anschluss</p>							
Prüfmethode	HD- Systemversuch				Düsen-Strahlversuch			Düsen-Schleif-Versuch	Düsen-Fall-Versuch
					Einzelstrahl	HD-Spüldüse			
									
Anzahl Bauteile Rohr/Verbindung/Anschluss	9/4/12				2/1/1	-		-	3/-/-
Prüfdüse (vgl. Abschn. 4.2)	D1	D2	D4	D20	D1	D2	D1	D1	
Splittzugabe [Liter/Zyklus]	0	5	0	20*	0	0	0	0	0
Versuchsanzahl	2	1	-	-	-	-	-	-	3

- nicht untersucht

■ Vergleichende HD-Systemversuche mit 0 bzw. 5 Liter Splittzugabe

Zusatzversuche dienen der isolierten Betrachtung von Einflussfaktoren (Schleifen, HD-Einzelstrahl) und Variation der Reinigungsbedingungen, wie Ablagerungsmenge, Reinigungszyklen und Düseneigenschaften (Düsenstrahl und -winkel).

* bei 20 l Splittzugabe grundsätzlich mit 10 zusätzlichen Zyklen, d.h. insgesamt 60 Reinigungszyklen durchgeführt (vgl. Abschnitt 5.3)

5.4.7.1.2 Vergleichende HD-Systemversuche

Im Rahmen der vergleichenden HD-Systemversuche **ohne Splittzugabe** waren lediglich leichte Schleifspuren im Sohlbereich feststellbar. In einzelnen Fällen wurde Klebe-Material im Bereich der seitlichen Anschlüsse abgetragen (vgl. Bild 260 und Bild 261).

Nach einer zusätzlichen Belastung, durch Zugabe von **5 Liter Splitt** je Reinigungszyklus, war in einzelnen Fällen im Bereich der seitlichen Anschlüsse und der Rohrsohle die Rohroberfläche leicht aufgeraut (Bild 262 und Bild 263).

Im Rahmen der HD-Systemversuche wurden die Rohrstränge auch einer **stationären Belastung**, d.h. einer punktuellen Dauerbelastung durch eine über drei Minuten ortsfest gehaltene Düse, ausgesetzt. Infolge dieser Belastung traten keine sichtbaren Materialveränderungen auf.

HD-Systemversuch (ohne Splittzugabe)



Bild 260: **Belastung:** 50 Zyklen - kein Splitt - D1 (8x30°)



Bild 261: **Belastung:** 50 Zyklen - kein Splitt - D1 (8x30°)

HD-Systemversuch (mit Zugabe von 5 Litern Splitt)



Bild 262: **Belastung:** 50 Zyklen-Splitt 5 I-D1 (8x30°)



Bild 263: **Belastung:** 50 Zyklen-Splitt 5 I-D1 (8x30°)

Prüfung	maßgeblicher Ort der Materialveränderung/Schaft/Verbindung/Abzweig	Größe des Abtrags		beobachtete Häufigkeit
		Fläche [cm²]/	max. Tiefe [mm]	
HD-Systemversuch	Schaft/Verbindung	unregelmäßig	aufgeraut	Streckenbeginn
*Bemerkung: -				

5.4.7.1.3 Zusatzversuche

Nach mechanischer Belastung der Rohrsohle im **Düsen-Fall-Versuch** waren keine sichtbaren Materialveränderungen feststellbar.

5.4.7.1.4 Zusammenfassung

Vergleichende HD-Systemprüfungen

In den vergleichenden HD-Systemversuchen (0 und 5 Liter Splittzugabe) zeigten sich lediglich oberflächliche Materialveränderungen (Aufrauhung), insbesondere in Folge der Splittzugabe.

Zusatzversuche

Im Düsenfallversuch zeigten sich die Probekörper widerstandsfähig gegenüber der mechanischen Belastung durch den Düsenkörper.

5.5 Schlussfolgerungen

Die Ergebnisse der Belastungsversuche an Rohrwerkstoffen zeigen, dass unter üblichen Reinigungsbedingungen an den untersuchten Produkten z.T. deutlich erkennbare Materialveränderungen auftreten. Die Intensität der Beanspruchung reichte von geringen Schleifspuren bis hin zu deutlichen Veränderungen mit Risiken für die Dichtfunktion. Besondere Angriffspunkte bieten sich offensichtlich in der Sohle der Rohrverbindungen und an den seitlichen Anschlüssen, da dort Flächenbereiche direkt dem HD-Düsenstrahl zugewandt sind (vgl. Bild 264). Häufig traten Materialveränderungen gleichzeitig im Rohrverbindungs- und Anschlussbereich der seitlichen Zuläufe auf, mit tendenziell stärkerer Ausprägung im Sohlbereich der Verbindung (vgl. Abschnitt 5.4.2 bis 5.4.7).

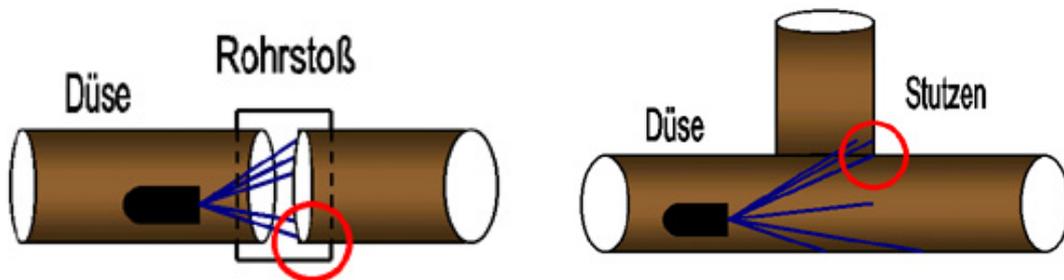


Bild 264: Besondere Angriffspunkte für Materialveränderungen, Rohrverbindung (links), seitlicher Anschluss (rechts)

Netzbetreibern, die die beobachteten Auswirkungen während der Kanalreinigung vermeiden wollen, wird empfohlen, den **Reinigungsprozess** ggf. durch eine veränderte Auswahl und Anwendung der Reinigungswerkzeuge anzupassen, um den **Rohrwerkstoff zu schonen**. Dabei bieten sich folgende grundsätzliche **Ansatzpunkte** an:

- Schon in der **Reinigungsplanung** sollten Kanalhaltungen mit besonderen Risiken für die Netzsubstanz identifiziert werden. Hierzu gehören insbesondere Strecken, die bereits in der TV-Inspektion besondere Angriffspunkte für die HD-Reinigung zeigten, wie z.B. brüchige Schadstellen, Versätze und einragende Stutzen.
- Als Grundlage für die **Düsenauswahl** ist der **Reinigungszweck** zu beachten, d.h. ob neben der Transportleistung auch eine Lösewirkung der Düsen verlangt wird. Steht allein das Transportverhalten im Vordergrund, sollten nach Möglichkeit **Düsen mit flachen Abstrahlwinkeln** (kleiner 20°) oder Düsen mit Ejektorwirkung eingesetzt werden. Werden aggressive Düsen eingesetzt, sollte durch Stichprobenkontrolle an einzelnen Kanalhaltungen (parallele TV-Inspektion) die Wirkung der eingesetzten Düsenysteme auf Rohrprodukte, Anschluss- und Verbindungstechnik unter betriebsüblichen Reinigungsbedingungen überprüft werden.

- Unerwünschte Materialveränderungen können häufig bereits durch **Erhöhung des Strahlabstandes** zur Rohrwandung, z.B. durch Verwendung eines Düsenschlittens, vermieden werden.
- In der Regel lassen sich übliche Reinigungsaufgaben mit Drücken **unter 120 bar** zuverlässig lösen. Durch regelmäßige **Leistungskontrollen** (vgl. Abschnitt 3.3) lässt sich die Wirkung der gewählten Düseneinsatzdurchmesser, Pumpenleistung und Schlauchlängen auf Förderstrom und Düsendruck erkennen und einschätzen.

Risiken für die Netzsubstanz lassen sich vielfach schon durch **einfache Betriebsmaßnahmen** deutlich verringern:

- Beim **Einlassen der Düsen** in den Kanal ist ein Aufschlagen auf die Schacht- oder Rohrwandung zu vermeiden.
- Die **Düsengeschwindigkeit** sollte überwacht werden. Ein Freilauf der Düse ist in jedem Falle auszuschließen.
- Durch fortlaufende Überwachung der Pumpendrucke und korrespondierenden Motordrehzahl lassen sich **Unregelmäßigkeiten erkennen**. So kann ein Druckanstieg auf Verstopfungen der Düseneinsätze und somit Gefahren durch übermäßig aggressive HD-Strahlen hinweisen. Geringe Pumpendrucke lassen wiederum auf abgenutzte Düseneinsätze mit mangelhafter Lösewirkung schließen.
- Der **Pumpendruck** sollte nach Möglichkeit langsam zurückgefahren werden, um ein Fallen des Düsenkörpers auf die Rohrwand auszuschließen.
- In jedem Fall empfiehlt sich die **Beobachtung des Spülwassers**, um evtl. Einbrüche bei bereits bestehenden Kanalschäden frühzeitig zu erkennen.

Mit Blick auf die eingesetzten **Prüfverfahren**, deren Aussagekraft und Anwendungsbereiche lassen sich folgende Schlussfolgerungen zusammenfassen:

- Die in der Praxis relevanten **Grundbelastungsarten** (HD-Strahl, Feststoff, Schleifen, Fallen) lassen sich durch die fünf im Rahmen des Vorhabens eingesetzten Prüfmethode gezielt nachempfinden.
- Zur Identifizierung von Einflüssen aus HD-Reinigung auf verschiedene Rohrprodukte bieten sich die **HD-Systemprüfungen** an. Die Systemversuche gestatten es, gleichzeitig mehrere Grundbelastungsarten praxisnah zu simulieren. Dabei wird das Gesamtsystem aus Rohren, Rohrverbindungen, Anschlussformteilen und nachträglichen Anschlüssen durch Düse und Schlauch, auftreffende Wasserstrahlen und aufgewirbeltes Räumgut belastet.

- In den **Düsen-Strahlversuchen mit HD-Einzelstrahl** zeigten sich in einzelnen Fällen deutliche Abweichungen zu den Beobachtungen aus den HD-Systemprüfungen. Insbesondere die Dichtungssysteme im Anschlussbereich werden aufgrund des geringen Strahlabstandes (ca. 1 cm) deutlich stärker belastet, als dies in der Praxis zu erwarten ist.
- Die Intensität der Materialveränderungen wurde durch die **Zugabe von Splitt** in den HD-Systemprüfungen kaum beeinflusst. Die Abtragsflächen erhielten i.d.R. lediglich eine abrasive Ausprägung. Ein Einfluss war häufig erst bei 20 Liter Splittzugabe im Rahmen der Zusatzversuche zu erkennen.
- Aus den **Düsen-Schleif-Versuchen** ließen sich für die untersuchten Werkstoffgruppen keine nennenswerten Erkenntnisse gewinnen. Im **Düsen-Fall-Versuch** zeigten sich nur bei wenigen Produkten sichtbare Materialveränderungen.

Abschließend lässt sich festhalten, dass der Reinigungsprozess, die eingesetzte Gerätetechnik und die Schulung des Personals zahlreiche Ansatzpunkte zur schonenden und damit schadensfreien Reinigung des Netzes bieten. Darüber hinaus kann in Einzelfällen auch durch die Rohrhersteller das Materialverhalten mit Blick auf die Kanalreinigung optimiert werden. Dabei sind allerdings stets auch weitere bautechnische und betriebliche Qualitätsanforderungen zu berücksichtigen.

6 Zusammenfassung und Schlussfolgerungen

Die Reinigung der Abwasserkanäle gehört zu den Kernaufgaben der kommunalen Netzbetreiber. Sie sichert den Entwässerungskomfort der Bürger, z.B. durch Beseitigung von Geruchsbelästigungen und Verstopfungen, trägt aber auch wesentlich zum Werterhalt der Netze bei, z.B. durch Verringerung von Korrosionserscheinungen. Künftig ist mit einer wachsenden Bedeutung der Kanalreinigung zu rechnen, da bei gleichen Rohrdurchmessern deutlich weniger Abwasser abgeleitet wird und damit eine stärkere Bildung von Kanalablagerungen zu erwarten ist. Ursachen sind z.B. Trinkwassereinsparung, Regenwasserrückhalt, und ein verringertes Fremdwasseraufkommen.

Derzeit ist vor einem Reinigungseinsatz jedoch häufig nicht einmal bekannt, ob überhaupt Ablagerungen im Kanal zu erwarten sind und welche Beschaffenheit diese haben könnten. Von den 396 Netzbetreibern in NRW vergeben 77 % die Kanalreinigung an private Dienstleister. Ein Rückfluss von Betriebsinformationen über das Ablagerungsaufkommen an den auftraggebenden Kanalbetrieb findet dabei selten statt. Diesen Kanalbetrieben fehlen so jedoch notwendige Planungsgrundlagen zur Spülplanerstellung. Doch auch die kleinere Gruppe der meist größeren Kanalbetriebe, die mit eigenem Personal reinigen, beginnt i.d.R. erst jetzt Ablagerungsdaten systematisch für die Reinigungsplanung zu nutzen. Häufig mit dem Ziel, die Betriebssicherheit zu erhöhen und gleichzeitig den Reinigungsaufwand zu senken. Denn für den Fall, dass Netzbetreiber keine eigene Planung vorlegen können, hat der nordrhein-westfälische Gesetzgeber Überwachungshäufigkeiten und Reinigungsfristen festgelegt.

Konkret wird in der **Selbstüberwachungsverordnung Kanal (SüwV Kan) [4]** gefordert, dass die Ablagerungssituation auf Grundlage eines Einsatz- bzw. Spülplanes oder, bei Nichtvorliegen eines solchen Planes, alle 2 Jahre überprüft werden muss. Werden bei dieser Überprüfung Ablagerungen festgestellt, sind die im **Runderlass [5] des Ministeriums für Umwelt, Raumordnung und Landwirtschaft** beschriebenen Maßnahmen durchzuführen. So ist bei Ablagerungshöhen von mehr als 15 % der Profilhöhe (geschätzt) nach Reinigungsplan zu reinigen. Liegt ein solcher Plan nicht vor, sind Leitungen bis DN 1000 innerhalb von 3 Monaten und Leitungen größer DN 1000 innerhalb von 6 Monaten zu reinigen. Eine umfassende IKT-Erhebung bei sämtlichen NRW-Betreibern aus dem Jahr 2001 zeigt im Gesamtblick, dass das nordrhein-westfälische Kanalnetz von ca. 90.000 km Länge innerhalb von 2-3 Jahren vollständig gereinigt wird (vgl. [1]). Offensichtlich werden seitens der Netzbetreiber nur selten eigenständige Einsatz- bzw. Spülpläne entwickelt und stattdessen die Standardvorgaben nach SüwV Kan (2-jährliche Ablagerungskontrolle) übernommen.

Offen bleibt derzeit, wie die Reinigungsprozesse und -intervalle unter **wirtschaftlichen Gesichtspunkten** optimiert werden können. Diese Situation verschärft sich insbesondere dadurch, dass es kaum dokumentiertes Wissen gibt

über Möglichkeiten zur effizienten, wirkungsvollen und den Rohrwerkstoff schonenden Kanalreinigung. Die Reinigungsarbeit findet weitestgehend im **"Kanal dunkeln"** statt. Auch aus Kostengründen wird meist auf eine Kontrolle des Reinigungserfolges gänzlich verzichtet. Entsprechend hängt auch die Auswahl wichtiger Reinigungsparameter wie Düsen, Düseneinsätze, Pumpendruck und Durchzugsgeschwindigkeit in der Regel allein von den Erfahrungen und subjektiven Einschätzungen der Verantwortlichen vor Ort ab. Belastbare Aussagen als Grundlage für eine weitergehende Optimierung der Reinigungsprozesse und –strategien fehlen.

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

Ziel des Vorhabens ist es, Empfehlungen für die technische und wirtschaftliche Optimierung des Kanalreinigungsprozesses mit dem Hochdruckspülverfahren zu erarbeiten. Im Vordergrund steht dabei sowohl der optimale Einsatz der verwendeten Geräte als auch die Durchführung des Verfahrens an sich mit Blick auf die wesentlichen verfahrenstechnischen Parameter. Ein besonderes Augenmerk gilt der Auswahl geeigneter Düsen für die jeweilige Reinigungsaufgabe sowie der Sicherung der bestehenden Netzsubstanz durch Vermeidung übermäßiger Belastungen aus Hochdruckstrahlen oder Düsenkörper- bzw. Schlauchbewegung. Um dieses Ziel zu erreichen, wurde eine stark **praxisorientierte Vorgehensweise** gewählt. Zunächst wurden zahlreiche Reinigungseinsätze vor Ort begleitet, um die relevanten technischen Parameter und den mit heutigen Mitteln erzielbaren Reinigungserfolg zu ermitteln. Darüber hinaus wurden weitere betriebliche Einflussfaktoren, wie Mitarbeiter- und Fahrzeugeinsatz, Reinigungsabläufe und spezifische Ablagerungssituationen, aufgenommen. Diese Praxiserfahrungen bildeten die Basis, d.h. die Anforderungen, für die weiteren Untersuchungen unter reproduzierbaren Randbedingungen. Ein Teil dieser Untersuchungen, die Bewertung typischer Kanalablagerungen, war dabei eng mit den Vor-Ort-Einsätzen verknüpft.

Zur Erfassung der wesentlichen Randbedingungen des Reinigungsprozesses und als Basis für die Auslegung der praxisorientierten Versuche in den IKT-Prüfstrecken wurden **Reinigungseinsätze in den Kanalnetzen** der beteiligten Netzbetreiber vor Ort begleitet und die Ablagerungseigenschaften auf Grundlage von umfassenden Probenentnahmen untersucht. Im Vordergrund stand dabei insbesondere die Aufnahme von betrieblichen Einflussfaktoren, die in Laborversuchen nur schwer nachzubilden sind, wie Mitarbeiter- und Fahrzeugeinsatz, Reinigungsabläufe und die spezifische Ablagerungs- und Reinigungssituation, wie sie oft erst nach mehrmonatiger Betriebsdauer durch komplexe mechanische und biologische Prozesse entsteht.

Im Einzelnen wurden Untersuchungen in den Netzen der Städte **Bochum, Detmold, Gelsenkirchen, Hagen, Holzwickede, München, Ratingen, Recklinghausen, Warendorf, Witten und Wuppertal** durchgeführt und dabei über 100 Reinigungseinsätze begleitet. Es wurden elf verschiedene Fahrzeugtypen und vierzehn Düsenprodukte eingesetzt. In allen Fällen wurden die vor Ort eingesetzte Gerätetechnik erfasst und das Betriebspersonal bzw. die beteiligten Dienstleister hinsichtlich der üblichen und speziellen Reinigungsmethoden sowie Praxisprobleme und der derzeit umgesetzten Lösungsansätze befragt. Im Ergebnis konnten weitreichende Schlussfolgerungen zur Zusammensetzung von Ablagerungen, deren Bildung, Menge und Eigenschaften sowie den Reinigungsprozessen und -situationen gezogen werden.

Um die **Zusammensetzung von Ablagerungen** näher zu beschreiben und auch **praxisnahe Modellsedimente** für die labortechnischen Versuche zur Untersuchung der Leistungsfähigkeit von HD-Düsen auswählen zu können, wurden in den Kanalnetzen der Städte Bochum, Gelsenkirchen, Hagen, Holzwickede, Recklinghausen und München Ablagerungsproben aus insgesamt 64 Haltungen entnommen und unmittelbar nach der Entnahme hinsichtlich der Parameter Trockensubstanz (TS), Glühverlust (σ TS), gesamter Chemischer Sauerstoffbedarf (CSB_{tot}) und gelöster Chemischer Sauerstoffbedarf (CSB_{diss}) untersucht. Darüber hinaus wurden im Bodenlabor des IKT die physikalischen Parameter Dichte, mittlerer Korndurchmesser und die Sieblinie ermittelt und mit Literaturangaben verglichen. Als Fazit kann festgestellt werden, dass die Anteile von organischem und mineralischem Material insbesondere in Mischwasserkanälen sehr unterschiedlich ausfallen und auch jahreszeitlichen Schwankungen unterliegen können. So wurden in vier Haltungen der Stadt München über das gesamte Jahr verteilt mehrfach Proben entnommen. In den Wintermonaten wurde ein erhöhter Eintrag von mineralischem Material, sehr wahrscheinlich Winterstreusplitt, festgestellt. Darüber hinaus verändern sich einige Eigenschaften der Ablagerungen, wie bspw. die Kohäsion und Lagerungsdichte, mit zunehmendem Alter. Im Einzelfall kann dies evtl. zu einer starken Verfestigung führen.

Zur Einschätzung der **Ablagerungsbildung und -mengen** sowie des Einflusses der Reinigungshäufigkeit wurden weitergehende Untersuchungen in den Kanalnetzen der Stadt München und der Gemeinde Holzwickede in Nordrhein-Westfalen durchgeführt. Die **Stadtentwässerungswerke München** betreiben ca. 2300 km Kanalnetz. Aus diesen wurden 4 verschiedene Netzstränge (bestehend aus 5 Haltungen) mit ähnlichen Nennweiten, Querschnitten und Netzsituationen (Mischwasser-Hauptsammler) ausgewählt. Insgesamt wurde eine Kanallänge von ca. 1,6 km untersucht, um die zeitliche Entwicklung von Ablagerungen zu erfassen. Durchschnittlich wurden 3,4 kg Ablagerungen pro Kanalmeter entnommen. Im Kanalnetz der **Gemeinde Holzwickede** (Gesamtlänge ca. 92 km) wurde über 2 Jahre die Entwicklung der Ablagerungssituation an 2.280 Haltungen beobachtet. Ausgangspunkt war die Aufnahme der Ablagerungssituation im Schachtgerinne im

Rahmen der nach ATV A 147, Teil 1 geforderten 2-jährlichen Schachtinspektion. Darüber hinaus wurden auch die oberhalb und unterhalb angeschlossenen Haltungen eingesehen - zunächst mit Hilfe der klassischen Methode des Spiegels bzw. im zweiten Untersuchungsjahr auch durch eine speziell für diesen Einsatz entwickelte Schacht-Videokamera. In Holzwickede wurden die Ergebnisse der Schachtinspektion und Spiegelung optisch eingeschätzt, drei Verschmutzungsklassen zugeordnet und die Verschmutzungssituationen anhand von Bildbeispielen aus der Schachtinspektion katalogisiert. Grundsätzlich lässt sich feststellen, dass in den betrachteten Untersuchungsgebieten zum Zeitpunkt der eigentlich turnusmäßig geplanten Kanalreinigung der überwiegende Teil der Haltungen als nur gering verschmutzt und somit ohne Reinigungsbedarf bewertet wurde. Die Literaturangabe [24], dass „im Allgemeinen Ablagerungen in Kanälen nicht als kontinuierliche Fläche sondern als Dünen auftreten, die Längen zwischen 2 m und 5 m besitzen“, konnte im Rahmen der Untersuchungen bestätigt werden. Große Ablagerungsmengen und hartnäckige Inkrustationen traten hier nur in Ausnahmefällen und fast immer aufgrund von Besonderheiten der örtlichen Netzsituation, z.B. durch seitlich steil angeschlossene Zuläufe, die den Abfluss im Hauptkanal einschränken, auf.

Die einzelnen **Abläufe bei der HD-Reinigung** wurden in der Praxis detailliert erfasst und dokumentiert. Der Reinigungsablauf vor Ort am Arbeitsschacht gliederte sich in der Regel in die Arbeitsschritte „Herablassen der HD-Düse in den Schacht“, „Einschwenken in den Zulauf“, „Einspülen“, „Rückzug von Schlauch und HD-Düse“ und „Absaugen des Spülwassers“. Grundsätzlich wurden die eingesetzten Geräte, wie HD-Fahrzeug, HD-Pumpe, HD-Schlauch und weitere Reinigungswerkzeuge durch das Betriebspersonal in Abhängigkeit der jeweiligen **Reinigungssituation**, d.h. Bauwerks-, Netz- und Ablagerungsbedingungen, ausgewählt. Im Gesamtblick wurde deutlich, dass einige Netzbetreiber über leistungsstarke HD-Pumpensysteme verfügen und diese in Einzelfällen auch mit Düsendrücken über 120 bar und Förderströmen von mehr als 320 l/min einsetzen. Die aufgenommenen Messergebnisse waren auch Grundlage für die Wahl der Belastungsparameter in den Werkstoff-Tests zur Hochdruckspülbeständigkeit.

Vor dem Hintergrund der zahlreichen vor Ort begleiteten Reinigungseinsätze sowie der intensiven Gespräche mit den beteiligten Netzbetreibern lassen sich die für das Hochdruckspülverfahren in der Praxis beobachteten **Reinigungssituationen** in 9 Einzelsituationen gliedern (vgl. Tabelle 17), die wiederum zu den folgenden drei **Grundsituationen** zusammengefasst werden können:

- **Standardsituationen**, wie sie z.B. im Rahmen der betrieblichen Wartung als Unterhaltungsreinigung oder bei der Reinigung zur Vorbereitung einer Inspektion häufig auftreten. Der Düsendruck beträgt weniger als 120 bar. Der Durchfluss ist angepasst an Kanalinnenweite, Wasserstand im Rohr, Ablagerungsgrad und -menge. Die Düse bewegt sich in moderatem Tempo

(Düsenrückzugsgeschwindigkeit ca. 5 - 30 m/min) mittig in der Sohle. Bei rundumstrahlenden Düsen beträgt der Strahlwinkel weniger als 30°.

- **Ausnahmesituationen**, wie sie i.d.R. selten, z.B. bei einer Intensiv-Reinigung zur Lösung von hartnäckigen Inkrustationen oder zur Vorbereitung einer Sanierungsmaßnahme, zu beobachten sind, aber auch bei gestörten HD-Strahlen durch verstopfte Düseneinsätze oder ungeeignete Abstimmung des Durchmessers der Düseneinsätze auf Pumpenleistung, Schlauchlänge und Düsentyp auftreten können. Eine Ausnahmesituation ist gekennzeichnet durch extreme Strahleigenschaften, z.B. hinsichtlich Druck, Durchfluss und Strahlwinkel. Darüber hinaus kann es in Ausnahmesituationen, bspw. bei einer Verstopfung, zum Stillstand der Düse und damit verbunden zu einer stationären Belastung des Rohrwerkstoffs kommen.
- **Anwendungsfehler**, die zwar derzeit in der betrieblichen Praxis auftreten, aber grundsätzlich zu übermäßigen Beanspruchungen der Rohrsubstanz führen und daher durch geeignete Personalunterweisung und entsprechenden Geräteeinsatz zu vermeiden sind. Hier sind bspw. extreme Einlass- und Rückzugsgeschwindigkeiten (>> 30 m/min), insbesondere zur Verringerung des Zeitaufwandes für die Reinigung ohne Rücksicht auf den Kanalzustand, und mögliche Belastungen der Bausubstanz durch den Düsenkörper zu nennen. Ein extremer Fall ist dabei der sogenannte „Düsen-Freilauf“ zum Durchstoßen einer Verstopfung. Darüber hinaus stellt das Aufprallen des Düsenkörpers, z.B. beim Herablassen der Düse in den Schacht und Einschwenken in die Haltung einen vermeidbaren Anwendungsfehler dar.

Die labortechnischen Versuche bauen auf diesem Hintergrund auf und setzen sich aus Untersuchungen zur Düsenwirkung und den aus HD-Reinigung resultierenden Netzbelastungen zusammen. Die einzelnen Prüfaufgaben wurden z.T. parallel bearbeitet. Wechselwirkungen zwischen einzelnen Ergebnissen und übergreifende Schlussfolgerungen konnten so frühzeitig in der Entwicklung der Prüfaufbauten, der Ergebnisbewertung sowie den In-situ-Untersuchungen berücksichtigt werden.

Im Rahmen der **Untersuchungen zur Düsenwirkung** wurden zahlreiche der am Markt verfügbaren **Düsen und Düseneinsätze** untersucht (vgl. Marktübersicht „HD-Düsen“ unter www.ikt.de). Ziel war es, praxisorientierte Empfehlungen zur Düsenauswahl zu entwickeln. Hierzu wurden die Bewegungen der Düsen beobachtet, die Aggressivität der Hochdruckstrahlen und ihr tatsächlicher Einfluss auf das Lösen von Ablagerungen beschrieben und die Transport- bzw. Räumleistung der Düsen in Versuchen mit unterschiedlichen Druck- und Durchflussszenarien untersucht. Im Vordergrund dieser praxisorientierten Untersuchungen stand die Identifizierung und Beobachtung der wesentlichen Einflussfaktoren, wie Betriebsparameter, Düseneigenschaften und Ablagerungssituation, für die Reinigungsleistung von Hochdruckdüsen und deren Wechselwirkungen mit der

Kanalrohr-Beanspruchung. Den Schwerpunkt bildeten rundumstrahlende und flachstrahlende Düsen, da diese in der Betriebspraxis, in den Standardsituationen der Unterhaltungsreinigung, am häufigsten eingesetzt werden.

Die **Transport- bzw. Räumleistung** der Düsen wurde in Versuchen mit unterschiedlichen Druck- und Durchflussszenarien untersucht. Insbesondere der Rückzugsgeschwindigkeit kam dabei eine besondere Bedeutung zu. Voraussetzung für eine vergleichende Betrachtung war die Herstellung von reproduzierbaren Ablagerungssituationen. Hierzu wurden zwei oberirdische Versuchsstrecken von jeweils ca. 35 m Länge mit den Nennweiten DN 800 (PVC) bzw. DN 300 (Plexiglas) errichtet.

Die **Modellsedimente** (lockere bis leicht verfestigte Ablagerungen; Kies-/Sandgemisch 0-16 mm) wurden in den Versuchen auf einer Prüfstreckenlänge von ca. vier, sieben und in Einzelfällen sogar 35 Meter Länge eingebaut. Die Einbauhöhe bzw. der Verschmutzungsgrad betrug dabei 15%, 30%, 45% bzw. auch 100 % (Verstopfung, DN 300) des Rohrdurchmessers. In den Versuchsstrecken DN 300 und DN 800 wurden **10 unterschiedliche Düsen-Systeme** unter Variation der Reinigungsparameter Düsendruck, -durchfluss und -geschwindigkeit betrachtet. Die Ausstattung der Düsensysteme mit Düseneinsätzen erfolgte nach Herstellerangaben. Im Versuchskanal DN 800 kamen neben rundumstrahlenden Düsen auch Sohlenreiniger zum Einsatz. Zur Durchführung der Reinigungsversuche wurden marktübliche Hochdruck-Spülfahrzeug eingesetzt. Für jeden Versuch wurden das Bewegungsverhalten der Düse, die Zugleistung bzw. das Vermögen, die Ablagerungen zu überwinden, die Anzahl der notwendigen Reinigungszyklen zur vollständigen Reinigung der Versuchsstrecke und evtl. auftretende Besonderheiten dokumentiert. Insgesamt wurden über 600 Einzelversuche (einschließlich Vorversuche) durchgeführt und gezielt Parametervariationen vorgenommen. Dies betraf insbesondere die Wahl des Verschmutzungsgrades, der Düsen, der Düsen-Rückzugsgeschwindigkeit und des Förderstroms.

Mehrere Reinigungszyklen wurden im Rahmen der Transportversuche immer dann notwendig, wenn die Düse unter den eingestellten Randbedingungen nicht in der Lage war, die aufgewirbelten Ablagerungsmengen vollständig weiter zu transportieren. Dann entsteht durch die erneute Ablagerungsbildung ein Wasserrückstau vor der Düse, der zusätzlich die Reinigungswirkung der Hochdruckstrahlen reduziert. Typischerweise bildet sich dabei wiederum eine Ablagerungsbank, die dann von der Düse überfahren wird und im Kanal zurückbleibt. Für das Bedienpersonal am Fahrzeug war dieser Vorgang nur in Extremfällen anhand der Schlauchbewegungen bzw. des stockenden Rückzugs feststellbar, wenn sich z.B. Schlauch und Düse in den zuvor aufgewirbelten Ablagerungen festgesetzt hatten. In einigen Fällen, insbesondere bei geringer Durchflussrate und niedriger Einlassgeschwindigkeit, konnte die Düse die Modellsedimente erst gar nicht überfahren und grub sich in die Ablagerungsbank ein. Erst durch erneutes

Zurückziehen der Düse und deutliche Erhöhung des Pumpendrucks konnte die Ablagerung überwunden werden.

Im Gesamtblick der Transportversuche für die Teststrecken DN 300 und DN 800 lassen sich folgende Schlussfolgerungen festhalten:

In der Versuchsstrecke **DN 300** (Plexiglas) wurde deutlich, dass auch mit niedrigeren Förderströmen (ca. 240 l/min) und schnelleren Düsenrückzugsgeschwindigkeiten (ca. 24 m/min) bereits eine ausreichende Transportleistung erzielt werden kann, um größere Ablagerungsmengen zu transportieren. Dies lässt sich im Wesentlichen dadurch begründen, dass insbesondere in kleineren Querschnitten die Sedimente nicht nur durch das beschleunigte Spülwasser, sondern auch in besonderem Maße durch den Luftstrom mitgerissen und transportiert werden. Vor diesem Hintergrund wirken sich Leistungsunterschiede von HD-Düsen im Hinblick auf den Feststofftransport vornehmlich nur bei extremen Ablagerungsmengen und –graden aus.

In der Versuchsstrecke **DN 800** (PVC) zeigte sich, dass bei einem Füllgrad von 15 % der Querschnittshöhe alle Düsen die Modellsedimente noch mit einem einzigen Reinigungszyklus aus der Versuchsstrecke befördern konnten. Jedoch stieg bei Füllhöhen von 30 % und 45 % (auf einer Länge von ca. 4 Metern) die Anzahl der notwendigen Reinigungszyklen deutlich an. Eine Verbesserung der Transportleistung zeigte sich bei Erhöhung des Förderstroms, z.B. auf 320 liter/min. Mit niedrigen Rückzugsgeschwindigkeiten (12 m/min) ließen sich die Reinigungssituationen häufig in einem einzelnen, stets aber in maximal zwei Zyklen bewältigen. Auch im Kanal DN 800 zeigten die verschiedenen Düsenprodukte erkennbare Unterschiede in der Transportleistung.

Bevor verfestigte Ablagerungen transportiert und aus dem Kanal geräumt werden, müssen sie zunächst von der Rohrwandung gelöst werden. In der Betriebspraxis der Unterhaltungs-Reinigung - zur Verbesserung der hydraulischen Kanaleigenschaften - stellt das **Lösen von Ablagerungen** jedoch vergleichsweise selten ein Problem dar. Starke Verfestigungen und hartnäckige Inkrustationen sind eher die Ausnahme und dabei oft Ursache einzelner Fehleinleitungen, z.B. aus Abscheideanlagen oder Baustellenrückständen. Dann haften sie häufig so hartnäckig an der Rohrwandung, dass seltener HD-Düsen, sondern bevorzugt an die Einzelfallsituation angepasste Spezialwerkzeuge wie bspw. Kettenschleudern oder Kanalfräsen angewendet werden. Die Lösewirksamkeit von Düsen wird häufig dann diskutiert, wenn die gesamte Rohrwandung vorbereitend für eine Inspektions- oder Sanierungsmaßnahme **komplett** zu reinigen ist. In diesem Fall bestimmen die für die jeweilige Düse charakteristischen Hochdruck-Wasserstrahleigenschaften in Verbindung mit den angewendeten Betriebsparametern (Druck, Durchfluss und Geschwindigkeit der Düse) wesentlich den Reinigungserfolg.

Zunächst wurde das **Strahlbild** rundumstrahlender Düsen näher erfasst. Dabei zeigten die Düsensysteme sehr unterschiedliche Strahlbilder bei annähernd gleichen Reinigungsparametern (Durchfluss und Druck in der Düse). Es wurden sowohl sehr kompakte und gebündelte Strahlen als auch weit auffächernde Strahlen beobachtet. Die charakteristische Ausbildung des Einzelstrahls ist maßgeblich von der Wasserführung am Düsenaustritt bzw. von der Geometrie des Düseneinsatzes abhängig. Um die **Wirkung von HD-Strahlen** am Auftreff-Ort untersuchen zu können, wurden eine Versuchseinrichtung und ein Messprogramm entwickelt, mit denen das Strahl- und Druckbild von HD-Einzelstrahlen weitgehend erfasst werden konnten. Ziel der Versuche war es, die charakteristische Druckverteilung von HD-Strahlen auf einer bestrahlten Oberfläche messen zu können. Dazu wurde jeweils ein einzelner Strahl einer mehrstrahligen Düse auf eine **Druckmessfolie** geleitet.

Es wurden die Strahlbilder von zwei Düsen beispielhaft untersucht. Bei der Auswahl der Düsen wurden möglichst unterschiedliche Strahlwinkel und Strahldurchflüsse berücksichtigt. Es wurden weit über 200 Versuche mit der Messfolie aufgezeichnet. Dabei wurde die **Strahlaufrefffläche** bestimmt und deren Form betrachtet. Es zeigte sich, dass die über Drucksensoren ermittelte Auftreff-Fläche deutlich größer ist, als nach den geometrischen Berechnungen zu erwarten war. Die Anschauung der Druckbilder und auch die Beobachtung von HD-Strahlen in einem durchsichtigen Plexiglaskanal lassen vermuten, dass ein Teil des auftreffenden Wassers zurückspritzt, aber ein anderer Teil als Film über die Oberfläche abfließt. Dieser Film verteilt vermutlich die Druckkraft.

In den gemessenen Druckprofilen waren prinzipiell ausgeprägte Druckspitzen im Strahlkern erkennbar. Ein Vergleich der **Druckbilder für verschiedene Düseneinsätze** zeigte, dass diese einen erheblichen Einfluss auf das Strahldruckbild haben. Inwieweit diese Eigenschaften des Druckprofils tatsächlich die Aggressivität bzw. abrasive Wirkung des HD-Strahls gegenüber einer Ablagerung oder einem Rohrwerkstoff charakterisieren, konnte allein auf Basis dieser Messungen aber nicht geklärt werden. Anschaulich ist die abrasive Wirkung eines HD-Strahls auf eine Oberfläche immer auch von der Einwirkzeit und den dortigen Materialeigenschaften abhängig. Vor diesem Hintergrund wurden weitergehende Versuche zur Abbildung der **Lösewirkung von HD-Strahlen an Modellsedimenten** durchgeführt.

Im Rahmen von ersten Vorversuchen wurden Rohrsegmente mit Mörtel beschichtet und durch einzelne Hochdruckwasserstrahlen belastet. Um die Abrasionswirkung von HD-Strahlen reproduzierbar untersuchen zu können, wurden weitergehende Untersuchungen mit industriell hergestellten Steinen aus **Porenbeton** durchgeführt. Neben abrasivem Materialverhalten waren auch Abplatzungen zu erkennen. Im Kanalnetz sind ebenfalls deutliche Unterschiede im Materialverhalten von Inkrustationen und Verfestigungen zu erwarten, da sie meist aus unterschiedlichen Quellen und Entstehungsprozessen stammen. Die Versuche mit Porenbeton stellten vor diesem Hintergrund Orientierungsversuche dar, um die grundsätzlichen Einflüsse

von Strahlgeometrie und Belastungsparametern auf die Abrasionswirkung von HD-Strahlen zu erfassen. Insgesamt wurden in dem Düsen-Versuchsstand weit über 500 Belastungsversuche auf simulierte Modell-Verfestigungen (Mörtel und Porenbeton) mit variierenden Parametern (Strahlabstand, Auftreffwinkel, Abstrahlwinkel, Ausbreitungswinkel, Druck und Durchfluss) durchgeführt.

Zusammenfassend lässt sich feststellen, dass die **Erosionsbilder** in deutlichem Zusammenhang zu den charakteristischen Merkmalen der zugehörigen **Druckprofilmessungen** stehen. Dort wurde mit zunehmendem Druck ein Anstieg des Spitzendrucks und der strahlwirksamen Fläche gemessen. Eine Überlagerung der Umrisskante der Materialabtragsflächen mit den Druckprofilbildern aus den Druckfolienmessungen bestätigte den Zusammenhang zwischen der anfänglichen Flächencharakteristik der Erosionsfläche und Fläche des gemessenen Druckbildes. Im Rahmen der Druckfolienmessungen wurde aber auch der große Einfluss des Strahlabstandes auf die Druckspitzenwerte deutlich. Es bestätigte sich, dass der **Strahlabstand** tatsächlich die Erosionswirkung des HD-Strahls maßgeblich bestimmt. Nach einer Erhöhung des Abstandes um 50 mm von 18,5 auf 68,5 mm ist selbst bei dem hohen Strahlwinkel von 30° kaum noch Materialabtrag feststellbar. Der **Strahlwinkel** hat ebenfalls großen Einfluss auf die Abrasionswirkung des Strahls. Während bei einem Strahlwinkel von 30° deutlicher Materialabtrag auftritt, ist bereits bei einem Strahlwinkel von 20° selbst bei kurzem Strahlabstand lediglich geringer Abtrag feststellbar. Bei einem Strahlwinkel von 10° ist nur noch optisch kleinflächiger Abrieb erkennbar, eine Abtragtiefe ist nicht mehr messbar.

Die **Düsenbewegungen** wurden während des gesamten Reinigungsprozesses, insbesondere in Extremsituationen bei starker Beschleunigung, beobachtet. Während der Versuche wurden keine Anhaltspunkte für ein unkontrolliertes Schlagen der Düsen im Rohrkörper gefunden. Andererseits zeigte sich, dass Düsen im Kanal schweben oder beim Zurückziehen an Muffenversätzen haken können. Dies wurde auch durch die Betreibererfahrungen bestätigt. Allerdings sind **schwebende Düsen** meist auf extreme Betriebsparameter zurückzuführen. Stark beschleunigte Düsenkörper, z.B. durch Freilauf der Düsen zur Verstopfungsbeseitigung, sollten als Anwendungsfehler grundsätzlich im Rahmen der Unterweisung des Betriebspersonals ausgeschlossen werden.

Im Rahmen der Versuche zur **Belastung aus HD-Reinigung** wurde untersucht, inwieweit diese Belastungen den Kanal selbst beanspruchen und dort zu Schadensrisiken führen können. Düse und Schlauch werden durch die Vorschubkräfte des Wasserstrahls oder mittels Winde über die Kanaloberfläche gezogen, die austretenden HD-Wasserstrahlen treffen nicht nur auf verfestigte und lose Ablagerungen, sondern auch unmittelbar auf das Rohr, und aus den aufgewirbelten Ablagerungen werden Feststoffpartikel beschleunigt und z.T. mit hoher Geschwindigkeit gegen einzelne Kanalbauteile geschleudert. In einzelnen Reinigungssituationen wurde beobachtet, dass ein Düsenkörper während des

Reinigungsvorganges schweben bzw. abheben und auf die Rohrwandung fallen kann. In einigen Fällen werden darüber hinaus Düsen im Freilauf stark beschleunigt, um Verstopfungen zu lösen, und dabei ein unkontrolliertes Auftreffen auf die Rohrwandung bzw. die seitlichen Anschlüsse in Kauf genommen. **Ziel der Versuche** zur Belastung aus HD-Reinigung war es vor diesem Hintergrund, Empfehlungen für eine schonende HD-Reinigung abzuleiten.

Um einen Einfluss von Alterungseffekten oder Vorschädigungen durch Bau- und Betriebsbelastungen auf die Prüfergebnisse auszuschließen, wurden in den Laboruntersuchungen **Neurohre** eingesetzt. Neben einem definierten Ausgangszustand vor der Prüfung konnten so auch gezielt verschiedene Rohrwerkstoffe und -geometrien in den Versuchsreihen berücksichtigt werden. Vor diesem Hintergrund sei ausdrücklich darauf hingewiesen, dass die Ergebnisse nicht zur allgemeinen Quantifizierung von Versagensgrenzen (z.B. Druck, Durchfluss) einzelner Werkstoffe dienen. So lassen die unterschiedlichen Werkstoffrezepturen, Herstellverfahren und Anschluss- bzw. Verbindungssysteme der heutigen Produkthanbieter eine werkstoffbezogene Verallgemeinerung einzelner Prüfergebnisse nicht zu. Eingesetzt wurden klassische Kanalrohrwerkstoffe wie Beton und Steinzeug mit zusammen 90 % Netzbestand. Darüber hinaus wurden Produkte aus Guss, GFK, PE-HD (vollwandig/profiliert) und PVC (mehrschichtig) einbezogen. Zum Einsatz kamen Rohre der Nennweite DN 300 (vgl. [41], [42], [44]).

Insgesamt wurden in den Versuchen **vielfältige Reinigungssituationen und Randbedingungen** berücksichtigt. So wird die Belastung durch Hochdruckstrahlen nicht allein von Parametern wie Druck und Durchfluss, sondern auch durch die Ablagerungssituation und Anzahl der Reinigungszyklen beeinflusst. Die Form des Düsenkörpers und der Düseneinsätze wiederum bestimmt maßgeblich die Strahleigenschaften.

Als Ausgangspunkt für eine differenzierte Betrachtung der Belastungsszenarien, die während der Hochdruckreinigung auf das Rohrmaterial wirken können, wurden zunächst **fünf Grundbelastungsarten (HD-Strahl, Feststoff, Schleifen, Fallen, Prallen)** eingeführt, die in Abhängigkeit der örtlichen Reinigungssituation in ihrer Stärke und Intensität variieren können. In der Regel treten Kombinationen aus diesen Grundbelastungsarten mit unterschiedlicher Gewichtung auf. Bei der Intensiv-Reinigung zur Vorbereitung einer Sanierungsmaßnahme steht bspw. die Belastung durch den **HD-Wasserstrahl** im Vordergrund. Im Vergleich dazu gewinnt die Belastung aus beschleunigten **Feststoffpartikeln** besonders stark bei der Beseitigung von großen Ablagerungsmengen mit scharfkantigem Grobkorn (z.B. aus Einspülungen von Winterstreusplitt oder Schottermaterial von Baumaßnahmen) an Bedeutung.

Um den Einfluss sämtlicher Grundbelastungsarten weitestgehend reproduzierbar nachempfinden zu können, wurden **fünf unterschiedliche Prüfmetho-**

angewendet. Im Mittelpunkt standen dabei die Systemversuche nach dem Hamburger Modell [40], da hier gleichzeitig drei Grundbelastungsarten mit wesentlichem Einfluss für die Standard-Reinigungssituation praxisnah simuliert werden. Dabei wird das Gesamtsystem aus Rohren, Rohrverbindungen, Anschlussformteilen und nachträglichen Anschlüssen durch Düse und Schlauch, auftreffende Wasserstrahlen und aufgewirbeltes Räumgut belastet. Die HD-Systemversuche wurden einerseits unter identischen Bedingungen als vergleichende HD-Systemversuche und andererseits unter wechselnden Einflüssen als Zusatzversuche ausgeführt. Weitere Zusatzversuche (Düsen-Strahl, -Schleif- und Fallversuche) dienten der weitgehend isolierten Betrachtung einzelner Einflussfaktoren (HD-Einzelstrahl, Schleifen, Fallen) bzw. der Variation der Reinigungsbedingungen, Reinigungszyklen und Düseneigenschaften (Düsenstrahl und -winkel).

Die eingesetzten Produkte und entsprechenden **Versuchsergebnisse** sind im vorliegenden Bericht detailliert beschrieben. Der maßgebliche Ort der jeweiligen Materialveränderung wird den Kategorien Rohrschaft, Rohrverbindung und Abzweig zugeordnet. Im Falle eines deutlichen Materialabtrags ist dessen Fläche und maximale Tiefe dokumentiert worden. Die Häufigkeit, mit der eine Materialveränderung auftrat, wurde nach den Kategorien „in Einzelfällen“ (selten, mindestens zwei Mal beobachtet) oder „regelmäßig“ (Häufigkeit über 50 %)“ bewertet oder in Relation zur Gesamtzahl der geprüften Bauteile (Schaft, Verbindung, Abzweig) dargestellt.

Im Gesamtblick zeigen die **Ergebnisse der Belastungsversuche** an Rohrwerkstoffen, dass unter üblichen Reinigungsbedingungen an den untersuchten Produkten z.T. deutlich erkennbare Materialveränderungen auftreten. Die Intensität der Beanspruchung reichte von geringen Schleifspuren bis hin zu deutlichen Veränderungen mit Risiken für die Dichtfunktion. Besondere Angriffspunkte bieten sich offensichtlich in der Sohle der Rohrverbindungen und an den seitlichen Anschlüssen, da dort Flächenbereiche direkt dem HD-Düsenstrahl zugewandt sind. Häufig traten Materialveränderungen gleichzeitig im Rohrverbindungs- und Anschlussbereich der seitlichen Zuläufe auf, mit tendenziell stärkerer Ausprägung im Sohlbereich der Verbindung.

Netzbetreibern, die die beobachteten Auswirkungen während der Kanalreinigung vermeiden wollen, wird empfohlen, den **Reinigungsprozess** ggf. durch eine veränderte Auswahl und Anwendung der Reinigungswerkzeuge anzupassen, um den **Rohrwerkstoff zu schonen**. Wesentliche Risiken für die Netzsubstanz lassen sich vielfach schon durch **einfache Betriebsmaßnahmen** deutlich verringern. Mit Blick auf die eingesetzten **Prüfverfahren**, deren Aussagekraft und Anwendungsbereiche ist insbesondere festzuhalten, dass es die **HD-Systemprüfungen** gestatten, gleichzeitig mehrere Grundbelastungsarten praxisnah

zu simulieren. In den **Düsen-Strahlversuchen mit HD-Einzelstrahl** zeigten sich allerdings in einzelnen Fällen deutliche Abweichungen zu den Beobachtungen aus den HD-Systemprüfungen. Aus den **Düsen-Schleif-Versuchen** ließen sich für die untersuchten Werkstoffgruppen keine nennenswerten Erkenntnisse gewinnen. Im **Düsen-Fall-Versuch** zeigten sich nur bei wenigen Produkten sichtbare Materialveränderungen.

Abschließend bleibt festzustellen, dass der Reinigungsprozess, die eingesetzte Gerätetechnik und die Schulung des Personals zahlreiche Ansatzpunkte zur schonenden und damit schadensfreien Reinigung des Netzes bieten. Darüber hinaus kann in Einzelfällen auch durch die Rohrhersteller das Materialverhalten mit Blick auf die Kanalreinigung optimiert werden. Dabei sind allerdings stets auch weitere bautechnische und betriebliche Qualitätsanforderungen zu berücksichtigen.

7 Fazit

Insgesamt zeigten die **Praxiserfahrungen**, dass vor einem Reinigungseinsatz häufig nicht bekannt ist, ob überhaupt Ablagerungen im Kanal zu erwarten sind und welche Beschaffenheit diese haben könnten. Insbesondere wenn die Kanalreinigung an private Dienstleister vergeben wird, fließen kaum Betriebsinformationen über das Ablagerungsaufkommen an den auftraggebenden Kanalbetrieb zurück. In der Folge fehlen die notwendigen Planungsgrundlagen zur Spülplanerstellung, so dass auch die Möglichkeiten zur eigenverantwortlichen Selbstüberwachung und Reinigungsplanung nach SüwV Kan [4] bzw. Runderlass [5] nicht optimal genutzt werden. Vor diesem Hintergrund ist es zu empfehlen, die **Ablagerungssituation vor und während der Reinigung zu bewerten** und verwandte Betriebsprozesse enger zu verzahnen, so z.B. indem weitergehende Informationen zur Ablagerungssituation auch im Rahmen der regelmäßigen **Schachtinspektion** gewonnen werden.

Der Reinigungserfolg kann im Wesentlichen nur durch Einsatz leistungsfähiger Düsen und die Einstellung geeigneter Reinigungsparameter gesichert werden. Aufgrund der Produktvielfalt (Düsen und Düseneinsätze) und unterschiedlichen Randbedingungen im jeweiligen Kanalnetz (Ablagerungen, Netzzustand) empfiehlt es sich grundsätzlich, vor jedem Kauf einer HD-Düse die **Leistung des Düsenprodukts vor Ort stichprobenhaft mit begleitender TV-Inspektion zu überprüfen**. Für diese Düsen-Tests bietet es sich an, möglichst extreme Reinigungssituationen (z.B. hartnäckige Ablagerungen oder hohes Ablagerungsaufkommen) auch in kritischen Netzbereichen (Schwachstellen, ausgebesserte Streckenabschnitte) entsprechend dem Anwendungsgebiet der HD-Düse auszuwählen. Aussagen zur Leistungsfähigkeit und Aggressivität von 5 bis 10 Düsenprodukten lassen sich dabei bereits im Rahmen eines Tageseinsatzes mit einem einzelnen Reinigungsfahrzeug erzielen.

Netzbetreibern, die eine möglicherweise schädigende Wirkung aus HD-Reinigung vermeiden wollen, wird empfohlen, den **Reinigungsprozess** ggf. durch eine veränderte Auswahl und Anwendung der Reinigungswerkzeuge anzupassen, um den **Rohrwerkstoff zu schonen**. Dabei bieten sich folgende grundsätzliche **Ansatzpunkte** an:

- Schon in der **Reinigungsplanung** sollten Kanalhaltungen mit besonderen Risiken für die Netzsubstanz identifiziert werden. Hierzu gehören insbesondere Strecken, die bereits in der TV-Inspektion besondere Angriffspunkte für die HD-Reinigung zeigten, wie z.B. brüchige Schadstellen, Versätze und einragende Stützen.
- Als Grundlage für die **Düsenauswahl** ist der **Reinigungszweck** zu beachten, d.h. ob neben der Transportleistung auch eine Lösewirkung der Düsen verlangt wird. Steht allein das Transportverhalten im Vordergrund, sollten nach

Möglichkeit **Düsen mit flachen Abstrahlwinkeln** (kleiner 20°) oder Düsen mit Ejektorwirkung eingesetzt werden. Werden aggressive Düsen eingesetzt, sollte durch Stichprobenkontrolle an einzelnen Kanalhaltungen (parallele TV-Inspektion) die Wirkung der eingesetzten Düsensysteme auf Rohrprodukte, Anschluss- und Verbindungstechnik unter betriebsüblichen Reinigungsbedingungen überprüft werden.

- Unerwünschte Materialveränderungen können häufig bereits durch **Erhöhung des Strahlabstandes** zur Rohrwandung, z.B. durch Verwendung eines Düsenschlittens, vermieden werden.
- In der Regel lassen sich übliche Reinigungsaufgaben mit Drücken **unter 120 bar** zuverlässig lösen. Durch regelmäßige **Leistungskontrollen** lässt sich die Wirkung der gewählten Düseneinsatzdurchmesser, Pumpenleistung und Schlauchlängen auf Förderstrom und Düsendruck erkennen und einschätzen.

Wesentliche Risiken für die Netzsubstanz lassen sich vielfach schon durch **einfache Betriebsmaßnahmen** deutlich verringern:

- Beim **Einlassen der Düsen** in den Kanal ist ein Aufschlagen auf die Schacht- oder Rohrwandung zu vermeiden.
- Die **Düsengeschwindigkeit** sollte überwacht werden. Ein Freilauf der Düse ist in jedem Falle auszuschließen.
- Durch fortlaufende Überwachung der Pumpendrucke und korrespondierenden Motordrehzahl lassen sich **Unregelmäßigkeiten erkennen**. So kann ein Druckanstieg auf Verstopfungen der Düseneinsätze und somit Gefahren durch übermäßig aggressive HD-Strahlen hinweisen. Geringe Pumpendrucke lassen wiederum auf abgenutzte Düseneinsätze mit mangelhafter Lösewirkung schließen.
- Der **Pumpendruck** sollte nach Möglichkeit langsam zurückgefahren werden, um ein Fallen des Düsenkörpers auf die Rohrwand auszuschließen.
- In jedem Fall empfiehlt sich die **Beobachtung des Spülwassers**, um evtl. Einbrüche bei bereits bestehenden Kanalschäden frühzeitig zu erkennen.

Sämtliche Empfehlungen wurden abschließend in einem praxisorientierten „**IKT-Handbuch Kanalreinigung**“ [2] zusammengefasst, dass in enger Abstimmung mit zahlreichen Netzbetreibern aus NRW sowie weiteren interessierten Fachleuten formuliert wurde.

8 Literaturverzeichnis

- [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] IKT-Institut für Unterirdische Infrastruktur: Handbuch Kanalreinigung (Entwurf Dezember 2004).
- [3] Bosseler, B.; Birkner, T.: Erfahrung mit der Umsetzung der Selbstüberwachungsverordnung Kanal (SüwV Kan) in NRW, Entwicklung in der Kanalisationstechnik; Tagung am 4. und 5. September 2001 Maternushaus, Köln.
- [4] Gesetz- und Verordnungsblatt für das Land Nordrhein-Westfalen – Nr. 10 vom 10. Februar 1995, „Verordnung zur Selbstüberwachung von Kanalisationen und Einleitungen von Abwasser aus Kanalisationen im Mischsystem und im Trennsystem (Selbstüberwachungsverordnung Kanal – SüwVKan)“, vom 16. Januar 1995, S. 64-67.
- [5] Ministerialblatt für das Land Nordrhein-Westfalen – Nr. 14 vom 10. Februar 1995, „Anforderungen an den Betrieb und die Unterhaltung von Kanalisationsnetzen“, RdErl. d. Ministeriums für Umwelt, Raumordnung und Landwirtschaft v. 3.1.1995 – IV B 6 – 031 002 0201, S. 250-253.
- [6] Falk, C.; Schlüter, M.; Meyer, P.; Schlemminger, F.: Empfehlungen zur Kanalreinigung; Endbericht des IKT-Institut für Unterirdische Infrastruktur im Auftrag des Ministeriums für Umwelt, Raumordnung und Landwirtschaft des Landes NRW; Gelsenkirchen (Mai 2000).
- [7] ATV-DVWK Arbeitsblatt A 147 Teil 1: Betriebsaufwand für die Kanalisation, Teil 1: Betriebsaufgaben und Intervalle (Mai 1993).
- [8] ATV-Arbeitsblatt A 140 Regeln für den Kanalbetrieb (März 1990).
- [9] ATV-DVWK Arbeitsblatt A 147 Teil 1: Betriebsaufwand für die Kanalisation, Teil 1: Betriebsaufgaben und Häufigkeiten (April 2003).
- [10] ATV-DVWK-Arbeitsblatt A 147 Teil 2 (Entwurf): Betriebsaufwand für die Kanalisation, Teil 2 - Personal-, Fahrzeug- und Gerätebedarf (März 1995).
- [11] DIN 30702 Teil 5: Kommunalfahrzeuge; Begriffe für Saugfahrzeuge und Hochdruckspülfahrzeuge (Oktober 1987).

- [12] DIN 30 705 Teil 1: Saugfahrzeuge und Hochdruck-Spülfahrzeuge; Kanal und Senkkasten Reinigungsfahrzeuge, Gruben-Reinigungsfahrzeuge (09.87); Teil 4 - Saugfahrzeuge und Hochdruckspülfahrzeuge; Hochdruck-Spülfahrzeuge (Juni 1991).
- [13] Water Research Centre: Sewer Jetting Code of Practice (1st edn), WRc plc, Swindon UK, (Juni 1997).
- [14] Schweizer Norm SN 592 012: Rohre, Formstücke, Verbindungen und andere Rohrleitungsteile (Bau-, Funktions- und Prüfnorm) (1994).
- [15] DIN EN 752-7: Entwässerungssysteme außerhalb von Gebäuden, Teil 7 - Betrieb und Unterhalt (Juni 1998).
- [16] ATV-DVWK-M 197 (Entwurf): Ausschreibung von Kanalreinigungsleitungen mit dem Hochdruckspülverfahren (Mai 2003).
- [17] DIN EN 14654 (Entwurf): Planung, Durchführung und Überwachung von Reinigungsmaßnahmen in Abwasserkanälen und –leitungen (Mai 2003).
- [18] Blumberg, D., Bauer, W.: Beseitigung von Ablagerungen in Abwasserkanälen großer Durchmesser, Korrespondenz Abwasser, Heft 12, S. 1063 - 1066 (1984).
- [19] Brombach, H.; Kuhn, B.: Häufigkeit und Verteilung der Kanalisationsverfahren in Deutschland, Korrespondenz Abwasser, Heft 8, S. 1106 - 1112 (1992).
- [20] Artières, O.: Bildung und Remobilisierung von Ablagerungen in Mischkanalisationen, Korrespondenz Abwasser, Heft 10, S. 1026 - 1032 (1988).
- [21] Müller, W.: Reinigung von Kanalisationen - Methoden und Praxiserfahrungen, Vortrag im Rahmen des Weiterbildenden Studiums 1995 an der Ruhr-Universität Bochum (1995).
- [22] Brombach, H.; Michelbach, S.; Wöhrle, C.: Feststoffe in der Mischwasserkanalisation, Korrespondenz Abwasser, Heft 12, S. 1910 - 1926 (1993).
- [23] Novak, B.: Ablagerungen in Abwasserkanälen, 59. Siedlungswasserwirtschaft Kolloquium Stuttgart - Kanalisation und Regenwasserbehandlung (1984).
- [24] Macke, E.: Ablagerungs- und Ausspülverhalten in Kanalisationen. ATV-Fortbildungskurs F/1 Abwasserableitung, Fulda, S. 11.1-11.25 (1987).

- [25] Ristenpart, E.: Feststoffe in der Mischwasserkanalisation, Vorkommen, Bewegung und Verschmutzungspotential, Schriftenreihe Stadtentwässerung und Gewässerschutz, Hannover, Heft 11, Dissertation (1995).
- [26] Berger, C.; Lohaus, J.: Zustand der Kanalisation – Ergebnisse der ATV-DVWK-Umfrage 2001, <http://www.atv-dvwk.de/download/kanalumfrage.pdf>, (09/2004).
- [27] Lenz, J.; Wielenberg, M.; Geib, M.: Reinigung von Abwasserkanälen durch Hochdruckspülung, Schriftenreihe iro-Institut für Rohrleitungsbau Oldenburg, Band 11, 2. Auflage Vulkan-Verlag Essen, (2002).
- [28] Stein, D.; Kaufmann, O.: Schadensanalyse an Abwasserkanälen aus Beton- und Steinzeugrohren der Bundesrepublik Deutschland-West. Korrespondenz Abwasser (KA) 40, H.2, S. 168-179 (Februar 1993).
- [29] Bosseler, B.; Redmann, A.: Infektionsgefahr durch Austrag von Krankheitserregern aus Einsteigschächten von Kanalisationen durch Aerosole, Forschungsendbericht des IKT – Institut für Unterirdische Infrastruktur im Auftrag des Ministerium für Umwelt und Naturschutz, Landwirtschaft und Verbraucherschutz des Landes NRW (Dezember 2000).
- [30] Wünscher, H.-J.; Schinke, U.; Jähnel, H.: Probleme bei der Reinigung der Kanalisation im VEB Leuna Werk, Walter Ulbricht. Wasserwirtschaft Wassertechnik (WWT) 32, H.2, S.55-59 (1982).
- [31] Güteschutz Kanalbau: Auftragsvergabe, Qualifikationsanforderungen und Qualifikationsnachweise (Juni 1999).
- [32] Arbeitsbericht der ATV-Arbeitsgruppe 1.7.3 „Regeln für den Kanalbetrieb“ (TC 165/ WG 22) im ATV-Fachausschuss 1.7 „Betrieb und Unterhalt“: Kanalreinigung mit dem Hochdruckspülverfahren, Korrespondenz Abwasser (KA) 44, H. 4, S. 727-730 (April 1997).
- [33] Stein, D.: Instandhaltung von Kanalisationen, 3. Auflage, Ernst & Sohn 1998.
- [34] Güteschutz Kanalbau: Leitfaden für die Eigenüberwachung, Prüfzeichen (R) Reinigung (Mai 2003).
- [35] DIN 30705 Teil 4: Saugfahrzeuge und Hochdruck-Spülfahrzeuge; Hochdruck-Spülfahrzeuge (Juni 1991).
- [36] Dipl.-Ing. Begemann, H.: Vortragsmanuskript aus dem ATV-Tagungsband vom ATV-Infotag in Weimar „Kanalreinigung mit dem Hochdruckspül-Verfahren“ (September 1999).

- [37] Störner, S.: Die Vergabe von Reinigungsleistungen von Regen- und Abwasserkanälen, Seminarunterlagen (Mai 1996).
- [38] Ney, J.: Kanalreinigung mit dem Hochdruckspül-Verfahren, Vortragsmanuskript aus dem ATV-Tagungsband vom ATV-Infotag in Weimar (September 1999).
- [39] Bosseler, B.; Bennerscheidt, C.: Einsatz der Ejektortechnik bei der Dükerreinigung und -inspektion; Endbericht des IKT – Institut für Unterirdische Infrastruktur im Auftrag des Ministeriums für Umwelt und Naturschutz, Landwirtschaft und Verbraucherschutz des Landes NRW (Juni 2004).
- [40] Hoppe, F.: Parameter des Hochdruckspülversuches nach dem Hamburger Modell der Stadtentwässerung Hamburg, schriftliche Mitteilung (August 2002).
- [41] DIN 4264 (Entwurf): Anforderungen und Prüfungen für Abwasserkanäle und -leitungen bei Hochdruckreinigung (Stand 29.10.1999).
- [42] DIN V 19517 (Entwurf): Prüfverfahren zur Ermittlung der Hochdruckspülfestigkeit von Rohren für Abwasserleitungen und -kanäle (Januar 2002).
- [43] Cant J., Trew J.: High-Pressure Water Jetting: Avoiding Damage to Sewers. Technical Note WRc plc. Swindon UK, Journal CIWEM (August 1998).
- [44] Zimmermann, F.: Vergleichende Prüfungen zur Hochdruckspülfestigkeit verschiedener genormter Werkstoffe für Abwasserleitungen und -kanäle (Prüfbericht) (Dezember 2000).
- [45] Technical Report prCEN TR 14920 (Final Draft): Jetting resistance of drain and sewer pipes – Moving jet test method (April 2004).
- [46] Geiger, W.F.; Frehmann, T.: Analyse von Kanalablagerungen; Abschlussbericht im Auftrag des IKT-Institut für Unterirdische Infrastruktur, unveröffentlicht (April 2003).
- [47] DIN 18123: Baugrund, Untersuchung von Bodenproben - Bestimmung der Korngrößenverteilung (November 1996).
- [48] Crabtree, R.W.; Forster, C. F.: Preparation Protocols for the analysis of combined sewer sediment samples, Water Research Center (WRc) Engineering, ER 354E (1989).

- [49] Schnitzlein, M.; Blumberg, D.; Bauer, W.: Voruntersuchungen zur Entschlammung des innerstädtischen Mischsietnetzes Hamburgs, Korrespondenz Abwasser, Heft 12, S. 1058-1062 (1984).
- [50] Ashley, R.M., Crabtree R.W.: Sediment origins, deposition and build-up in combined sewer systems, Water Science and Technology, Heft 8, S. 1 – 12 (1992).
- [51] Macke, E.: Bemessung ablagerungsfreier Strömungszustände in Kanalisationsleitungen, Korrespondenz Abwasser, Heft 07, S 462 – 473 (1983).
- [52] Schütz, M.: Vermeidung von Ablagerungen in Kanalisationsleitungen, gwf-wasser/abwasser (124), Heft 8, S. 393 – 398 (1983).
- [53] Broschüre: Im Untergrund von München - Die Kanäle einer Großstadt erzählen, Stadtentwässerungswerke München (Februar 2001).
- [54] Marktübersicht HD-Düsen: www.ikt.de, Startseite des Internetauftritts des IKT – Institut für Unterirdische Infrastruktur, Gelsenkirchen (Stand 12/2004).
- [55] Lorenzen, A.: Umweltschutz durch Vermeidung unsachgemäßer Hochdruckreinigung von Abwasserkanälen, Berlin (April 2004).
- [56] Thiel, J.: Auswertung der Betriebsdaten von HD-Reinigungsfahrzeugen der Entwässerungsbetriebe Witten, unveröffentlicht (Mai 2004).
- [57] Hösel, W.: Gutachten zu HD-Einzelstrahlen von Kanalreinigungsdüsen, unveröffentlicht (Dezember 2004).
- [58] Aigner, D.; Mathias, A.; Pollock, M.: Hydraulische Untersuchungen im Zusammenhang mit dem Hochdruckspülverfahren, Forschungsbericht Technische Universität Dresden (April 2002).
- [59] Momber, A.: Handbuch Druckwasserstrahltechnik, Beton Verlag GmbH Düsseldorf (1993).
- [60] Wegener, Th.; Geib, M.: Materialprüfung durch Hochdruckspülung nach der DIN V 19517 im Auftrag des IKT-Institut für Unterirdische Infrastruktur, unveröffentlicht (September 2002).
- [61] DIN EN 1916: Rohre und Formstücke aus Beton, Stahlfaserbeton und Stahlbeton (April 2003).
- [62] DIN EN 1610: Verlegung und Prüfung von Abwasserleitungen und –kanälen (Oktober 1997).

- [63] DIN 4032: Betonrohre und Formstücke, Maße, Technische Lieferbedingungen (Januar 1981).
- [64] FBS-Qualitätsrichtlinie: Betonrohre, Stahlbetonrohre, Vortriebsrohre und Schachtbauteile in FBS-Qualität für erdverlegte Abwasserkanäle und –leitungen (August 2000).
- [65] DIN EN 295: Steinzeugrohre und Formstücke sowie Rohrverbindungen für Abwasserleitungen und -kanäle (Mai 1999).
- [66] Werknorm WN 295: Steinzeugrohre und Formstücke sowie Rohrverbindungen für Abwasserleitungen und -kanäle (Mai 1999).
- [67] DIN EN 598: Rohre, Formstücke, Zubehörteile aus duktilem Gußeisen und ihre Verbindungen für die Abwasser-Entsorgung (November 1994).
- [68] DIN 16869 Teil 1: Rohre aus glasfaserverstärktem Polyesterharz (UF-GF), geschleudert, gefüllt; Teil1 - Maße (Dezember 1995).
- [69] DIN 16869 Teil 2: Rohre aus glasfaserverstärktem Polyesterharz (UF-GF), geschleudert, gefüllt; Teil 2 - Allgemeine Güteanforderungen, Prüfung (Dezember 1995).
- [70] DIN 19565: Rohre und Formstücke aus glasfaserverstärktem Polyesterharz (UF-GF) für erdverlegte Abwasserkanäle und -leitungen; geschleudert, gefüllt. (März 1989).
- [71] DIN 16868 Teil 1: Rohre aus glasfaserverstärktem Polyesterharz (UP-GF) Teil 1 - Gewickelt, gefüllt; Maße (November 1994).
- [72] DIN 16868 Teil 2: Rohre aus glasfaserverstärktem Polyesterharz (UP-GF) Teil 2 - Gewickelt, gefüllt; Allgemeine Güteanforderungen, Prüfung (November 1994).
- [73] DIN 19537 Teil 1: Rohre und Formstücke aus Polyethylen hoher Dichte (PE-HD) für Abwasserkanäle und –leitungen; Teil 2 - Maße (Oktober 1983).
- [74] DIN 19537 Teil 2: Rohre und Formstücke aus Polyethylen hoher Dichte (PE-HD) für Abwasserkanäle und -leitungen; Teil 2 - Technische Lieferbedingungen (Januar 1988).
- [75] DIN 8074: Rohre aus Polyethylen (PE) - PE 63, PE 80, PE 100, PE-HD - Maße (August 1999).
- [76] DIN 8075: Rohre aus Polyethylen (PE) - PE 63, PE 80, PE 100, PE-HD - Allgemeine Güteanforderungen, Prüfung (August 1999).

- [77] DIN 16961: Rohre und Formstücke aus thermoplastischen Kunststoffen mit profilierter Wandung und glatter Rohrrinnenfläche (März 2000)
- [78] DIN 19568-100 (Entwurf): Kunststoff-Rohrleitungssysteme für erdverlegte drucklose Abwasserkanäle und -leitungen aus weichmacherfreiem Polyvinylchlorid (PVC-U), Polypropylen (PP) und Polyethylen (PE) mit profilierter Wandung und glatter Rohrrinnenoberfläche, Teil 1 - Anforderungen an Rohre, Formstücke und das Rohrleitungssystem (Mai 1998).
- [79] prEN 13476 Teil 1: Kunststoff-Rohrleitungssysteme für erdverlegte Abwasserkanäle und -leitungen - Rohrleitungssysteme mit profilierter Wandung aus weichmacherfreiem Polyvinylchlorid (PVC-U), Polypropylen (PP) und Polyethylen (PE), Teil 1 - Anforderungen an Rohre, Formstücke und das Rohrleitungssystem (September 2002).
- [80] DIN EN 1401 Teil 1: Kunststoff-Rohrleitungssysteme für erdverlegte drucklose Abwasserkanäle und -leitungen Weichmacherfreies Polyvinylchlorid (PVC-U), Teil 1 - Anforderungen an Rohre, Formstücke und das Rohrleitungssystem (Dezember 1998).
- [81] DIN EN 1916: Rohre und Formstücke aus Beton, Stahlfaserbeton und Stahlbeton (April 2004).
- [82] DIN V 1201: Rohre und Formstücke aus Beton, Stahlfaserbeton und Stahlbeton für Abwasserleitungen und -kanäle, Typ 1 und Typ 2 - Anforderungen, Prüfung und Bewertung der Konformität (August 2004).
- [83] DIN 28603: Rohre und Formstücke aus duktilem Gusseisen - Steckmuffen-Verbindungen - Zusammenstellung, Muffen und Dichtungen (Mai 2002).
- [84] Homann, D.: Prüfbericht Nr. PA0709 des IKT – Gelsenkirchen im Auftrag der Hobas Rohre GmbH (September 2004).
- [85] DIN 16963 Teil 5: Rohrverbindungen und Formstücke für Druckrohrleitungen aus Polyethylen (PE), PE 80 und PE 100, Teil 5 - Allgemeine Qualitätsanforderungen, Prüfung (Oktober 1999).