

RUHR-UNIVERSITÄT BOCHUM

**Fakultät für Bau- und
Umweltingenieurwissenschaften**

Lehrstuhl für Siedlungswasserwirtschaft
und Umwelttechnik

Prof. Dr.-Ing. habil. Marc Wichern



Untersuchungen zur bedarfsorientierten Kanalreinigung unter Nutzung betrieblicher Synergien

Phase I

Bochum, August 2012

Im Auftrag von



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

Fördernde Stelle



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

Fachliche Begleitung



Landesamt für Natur, Umwelt
und Verbraucherschutz NRW

Bearbeitung



Ruhr-Universität Bochum
Lehrstuhl für Siedlungswasserwirtschaft
und Umwelttechnik

Universitätsstr. 150
44801 Bochum

Prof. Dr.-Ing. M. Wichern

Dipl.-Ing. R.-L. Lange

Projektbeteiligter



IKT - Institut für Unterirdische Infrastruktur

Exterbruch 1
45886 Gelsenkirchen

PD Dr.-Ing. B. Bosseler

Dipl.-Ing. (FH) S. Ulutas

Auf der Basis des gemeinsam mit dem IKT erarbeiteten Forschungsantrags „Untersuchungen zur bedarfsorientierten Kanalreinigung unter Nutzung betrieblicher Synergien“ in der Version vom 31. März 2009 und des Auftrags des NRW-Umweltministeriums vom 17. Juni 2010 haben die Ruhr-Universität Bochum und das IKT, Gelsenkirchen in dem Kooperationsvertrag vom 16. Juli 2010 die Forschungsarbeiten gemäß des Forschungsantrages vereinbart. Der nachfolgende Bericht fasst die Ergebnisse der Forschungsleistungen der Ruhr-Universität Bochum und des IKT gemäß dem Forschungsauftrag zusammen.

Inhalt

1	Einleitung.....	1
2	Veranlassung und Zielsetzung.....	3
2.1	Ausgangssituation	3
2.2	Rechtliche Grundlagen für die Unterhaltung und Reinigung von Kanälen	3
2.3	Situation in den Nordrhein-Westfälischen Kommunen	9
2.4	Problemstellung.....	13
3	Wissenschaftlicher Stand des Wissens	15
3.1	Herkunft und Art von Feststoffen in der Kanalisation	15
3.2	Stoffkonzentrationen und -frachten	16
3.3	Feststofftransport	18
3.4	Kanalablagerungen	25
3.5	Auswirkungen von Kanalablagerungen.....	31
3.6	Schwefelwasserstoffbildung in der Kanalisation	32
4	Betrieblicher Stand des Wissens	41
4.1	Grundlagen der Kanalreinigung	41
4.2	Werkzeuge für die Kanalreinigung	52
5	Praktische Versuche.....	68
5.1	Kanalteststrecke	68
5.2	Erosionsversuche	105
5.3	Schwefelwasserstoffrohr	117
5.4	Zusammenfassung der praktischen Untersuchungen	123
6	Betriebsorientierte Untersuchungen	125
6.1	Praxisbezug.....	125
6.2	Prozessanalyse und Optimierungspotenziale	125
6.3	Analyse typischer Schwachstellen im Kanalnetz (Störfall-Analyse)	145
6.4	Materialien für die Förderung des Strategiewechsels.....	149
7	Empfehlungen für die Reinigungspraxis.....	151
7.1	Prozessanalyse und Optimierungspotenziale	151
7.2	Analyse typischer Schwachstellen im Kanalnetz	155
7.3	Materialien für die Förderung des Strategiewechsels.....	155
8	Zusammenfassung	156
	Literaturverzeichnis.....	159

Verzeichnis der Bilder

Bild 2.1: Organisation der Reinigungsarbeiten in Abhängigkeit von der Kanalnetzlänge (Orth et al., 2008)	10
Bild 2.2: Durchschnittliche Reinigungskosten pro Kanalmeter gemäß einer Umfrage des Instituts für Unterirdische Infrastruktur (IKT) bei 15 Netzbetreibern.....	12
Bild 3.1: Konzentrationsprofile in Rohrleitungen in Abhängigkeit von der mittleren Strömungsgeschwindigkeit nach Führböter (in Sander, 1989).....	20
Bild 3.2: Vertikale Schubspannungsverteilung bei Freispiegelabfluss (nach Yalin, 1977).	23
Bild 3.3: Schematisch Schichtung im Abwasserkanal (nach Gebhard, 2009).....	26
Bild 3.4: Typischer Querschnitt eines mit Ablagerungen behafteten Mischwasserkanals (Crabtree, 1989).....	27
Bild 3.5: Struktur und Verhalten von Feststoffen (nach Artières, 1988)	30
Bild 3.6: Entwicklung der Ablagerungshöhen im Kanalabschnitt Spinnerstraße (Dette et al., 1996)	31
Bild 3.7: Einfluss des pH-Wertes auf das Dissoziationsgleichgewicht von Schwefelwasserstoff bei 20°C (Lohse, 1986)	37
Bild 3.8: Stoffumsatz in Abwasserkanälen (DWA, 2010)	38
Bild 4.1: Beispiel einer Reinigungsstrategie (nach DIN 14654-1, 2005)	42
Bild 4.2: Prozessmodell für bedarfsorientierte Kanalreinigungsstrategien, erstellt vom Institut für Unterirdische Infrastruktur (Orth et al., 2008)	43
Bild 4.3: Schematische Darstellung der Hochdruckspülung mit einem kombinierten Saug- und Spülfahrzeug (Schlüter, 2005)	47
Bild 4.4: Darstellung verschiedener Düsenköpfe (KEG Kanalreinigungstechnik GmbH, 2010).....	47
Bild 4.5: Schwallspüleinrichtungen (Dettmar et al., 2001)	50
Bild 4.6: Querschnitt Kanalspülung in Hauptsammler (Schaffner, 2010)	51
Bild 4.7: Darstellung der TV-Inspektion (Stein, 1999).....	53
Bild 4.8: TV-Inspektionskamerawagen (IBAK GmbH, 2011).....	53
Bild 4.9: Schachtkamera Hersteller Ritec (Ritec GmbH, 2011).....	54
Bild 4.10: Schachtkamera Hersteller Envirosight (Envirosight, 2011)	54
Bild 4.11: Schematische Darstellung der Kanalspiegelung (AöR Lünen, 2007).....	55
Bild 4.12: Inaugenscheinnahme des Schachtgerinnes (IKT, 2007)	56
Bild 4.13: Sehende Düse (KEG, 2011).....	57
Bild 4.14: Transponder.....	59
Bild 4.15: Barcode	59
Bild 4.16: Schild	59
Bild 4.17: Markierungsstopfen.....	59
Bild 4.18: Transponder (TECTUS, 2011)	60

Bild 4.19: USB-Lesegerät	61
Bild 4.20: Lesegerät mit externer Antenne.....	61
Bild 4.21: Lesegerät mit interner Antenne.....	61
Bild 4.22: Einlesen vom Transponder mit einem integrierten Lesegerät (TECTUS, 2011)	61
Bild 4.23: Barcodelesegerät	63
Bild 4.24: Einscannen des Barcodes im Schacht.....	63
Bild 4.25: PU Schild am ersten Steigeisen.....	64
Bild 4.26: Schild an der Schachtwandung (Bodemann GmbH, 2011)	64
Bild 4.27: Pfropfen im Kanaldeckel.....	65
Bild 4.28: Pfropfen als Verschluss für Schachtabdeckungen (MH-Vertrieb, 2011)	65
Bild 4.29: Geoinformationssystem (Bosseler und Puhl, 2006)	66
Bild 4.30: MDE-Gerät (Bosseler und Puhl, 2006).....	67
Bild 5.1: Ablagerungs- und Niederschlagshöhen (Messstelle Bochum-2, Messungen im Rahmen des MUNLV-Projektes „Zustands-, Prozess und Wirkungsanalyse zur Entwicklung einer bedarfsorientierten Reinigungsstrategie für Kanalnetze)	69
Bild 5.2: Plexiglasrohr während der Montage	72
Bild 5.3: Verteilung der Rohrmaterialien im Gesamtnetz Deutschlands (Berger und Falk, 2011)	73
Bild 5.4: Plexiglasrohr mit Ausschnitten im Scheitel.....	75
Bild 5.5: Unterkonstruktion für die Versuchsrohre (links: Vertikale Stützen mit höhenverstellbaren Querstreben; rechts: Horizontale Träger als Auflage für die Versuchsrohre)	76
Bild 5.6: Funktionsskizze des verwendeten Verteilerrohrs	77
Bild 5.7: Verteilerrohr mit Schiebern (im Vordergrund) und Vorlagebehälter (braune Rohre im Hintergrund)	78
Bild 5.8: Steuerung der Kanalteststrecke über InTouch, Hauptfenster.....	79
Bild 5.9 Steuerung der Kanalteststrecke über InTouch, Übersicht Verteilerrohr.....	79
Bild 5.10: Steuerung der Kanalteststrecke über InTouch, Übersicht Testrohr1	80
Bild 5.11: Beispielhafte Annäherung von Ist- und Soll-Abfluss für unterschiedliche Annäherungsgeschwindigkeiten (ohne Messwerte)	81
Bild 5.12: Abfluss bei konstantem Soll-Abflüsse, leichte Abflussschwankungen bedingt durch Druckänderungen im Verteilerrohr (Schieber DN50), (Versuchsreihe 10, $Q=2$ L/s, $I_S=1$ ‰, $k=0,4$ mm, $\tau=0,3$ N/m ²)	82
Bild 5.13: Schieberöffnung und Ist-Abfluss für einen sukzessive anwachsenden Soll-Abfluss (Schieber DN100) (Versuchsreihe 10, $I_S=1$ ‰, $k=0,4$ mm)	82
Bild 5.14: Auszug aus dem Messprotokoll für die Ablagerungshöhen, die schwarzen Strich markieren die Messpunkte (Draufsicht)	85
Bild 5.15: Messschieber	85
Bild 5.16: Ablagerungsbildung in einem glatten Plexiglasrohr nach einem Tag ($Q=2$ L/s $I=1$ ‰, $k_S \approx 0,0015$ mm), von unten aufgenommen	88

Bild 5.17: Ablagerungen auf Sandpapier nach zwei Tagen ($Q=2$ L/s, $I_S=1$ ‰, $k_S=0,4$ mm, $\tau=0,3$ N/m²).....89

Bild 5.18: Ablagerungsbildung mit (links) und ohne (rechts) Sandpapier bei ansonsten gleichen Randbedingungen ($Q=2$ L/s, $I_S=1$ ‰), Fließrichtung von unten nach oben89

Bild 5.19: Ablagerungshöhen über die Rohrlänge, Auskleidung mit Sandpapier im Bereich von Meter 4 bis 6 ($Q=2$ L/s, $I_S=1$ ‰, $k_S=0,4$ mm)90

Bild 5.20: Idealisierte Querschnittsfläche der Ablagerungen91

Bild 5.21: Entwicklung der Menge aller Ablagerungen im Testrohr (Versuchsreihen 11, 13, 14, 16, 17 und 20, $Q=2$ L/s, $I_S=1,0$ ‰, $k_S=0,4$ mm)93

Bild 5.22: Entwicklung der Menge aller Ablagerungen im Testrohr (Versuchsreihe 20, $Q=2$ L/s, $I_S=1$ ‰, $k_S=0,4$ mm)93

Bild 5.23: tägliche Änderung der Menge aller Ablagerungen im Testrohr in Abhängigkeit der Versuchsdauer (Versuchsreihen 11, 13, 14, 16, 17 und 20, $Q=2$ L/s, $I_S=1$ ‰, $k_S=0,4$ mm).....94

Bild 5.24: Entwicklung der Menge aller Ablagerungen im Testrohr bei unterschiedlichen Rohrgefällen (Versuchsreihen 11, 13-18, 20 und 21, $Q=2$ L/s, $k_S=0,4$ mm)96

Bild 5.25: Entwicklung der Menge aller Ablagerungen im Testrohr bei unterschiedlichen äquivalenten Sandrauheiten (Versuchsreihen 11, 13, 14, 16, 17, 20 und 26-27, $Q=2$ L/s, $I_S=1$ ‰)96

Bild 5.26: Entwicklung der Menge aller Ablagerungen im Testrohr bei unterschiedlichen Abflussmengen (Versuchsreihen 11, 13, 14, 16, 17, 19, 20, 22, 23, 25 und 31, $I_S=1$ ‰, $k=0,4$ mm)97

Bild 5.27: Entwicklung der Menge aller Ablagerungen im Testrohr und Tageswerte der Zuflüsse zur Kläranlage Ölbachtal (Versuchsreihe 20, $Q=2$ L/s, $I_S=1$ ‰, $k=0,4$ mm)99

Bild 5.28: tägliche Änderung aller Ablagerungen im Testrohr in Abhängigkeit von der Dauer der Trockenperiode (Versuchsreihen 11, 13, 14, 16, 17 und 20, $Q=2$ L/s, $I_S=1$ ‰, $k=0,4$ mm) 100

Bild 5.29: Versuchrohr mit „Sichtfenster“ im Schleifpapier 101

Bild 5.30: AFS- und CSB-Konzentrationen während eines Spülversuchs (Versuchsreihe 15, $Q=2$ L/s, $I_S=2,5$ ‰, $k=0,4$ mm) 102

Bild 5.31: Verlauf der Trübungsmessung während eines Spülversuchs (Versuchsreihe 15, $Q=2$ L/s, $I_S=2,5$ ‰, $k=0,4$ mm) 103

Bild 5.32: Erosionsschubspannung für verschiedene Kriterien (Versuchsreihen 11, 13, 14, 16, 17 und 20, $Q=2$ L/s, $I_S=1$ ‰, $k=0,4$ mm) 103

Bild 5.33: Erosionsmessgerät (EROSIMESS) (Liem et al., 1997)..... 107

Bild 5.34: Plexiglasbehälter zur Messung des Erosionswiderstandes von Sedimenten .. 108

Bild 5.35: Kritische Schleppspannung Θ_c nach Gleichung (5.5) und dimensionslose Korngröße nach Gleichung (5.6) (Schröder und Zanke, 2003) 110

Bild 5.36: Ergebnisse der Erosionsversuche mit Sand verschiedener Korngrößen 112

Bild 5.37: Ergebnisse der Kalibrierung 113

Bild 5.38: Drehzahl und TS-Konzentration bei einem Erosionsversuch mit überwiegend organischem Sediment	114
Bild 5.39: Sohlschubspannung und TS-Konzentration bei einem Erosionsversuch mit überwiegend organischem Sediment	114
Bild 5.40: Drehzahl und TS-Konzentration bei einem Erosionsversuch mit überwiegend mineralischen Sediment.....	115
Bild 5.41: Sohlschubspannung und TS-Konzentration bei einem Erosionsversuch mit überwiegend mineralischem Sediment.....	115
Bild 5.42: Sohlschubspannungen von überwiegend mineralischen Sedimenten in Abhängigkeit von der Sedimentationsdauer (als Grenzwert für die Erosion wurde eine TS-Konzentration von 0,1 g _{TS} /L angenommen)	117
Bild 5.43: Prinzipskizze des Versuchsrohrs zur Schwefelwasserstoffbildung.....	119
Bild 5.44: Dauer bis Grenzwerte für von 5,9 mg _{H₂S} /l (im Wasser) bzw. 1,5 ppm _{H₂S} (in der Kanalluft) überschritten werden in Abhängigkeit von der Temperatur.....	121
Bild 5.45: Verlauf von Schwefelwasserstoff, AFS und Temperatur über die Versuchsdauer	122
Bild 5.46: Verlauf der H ₂ S- und CSB-Konzentrationen.....	123
Bild 6.1: Prozessmodell für die Umsetzung der bedarfsorientierten Kanalreinigung (Orth et al., 2008).....	126
Bild 6.2: Workshop-Eindrücke „Inspektion und Kontrolle“: Kanalspiegel im Einsatz (oben, links); Schachtkamera im Einsatz (oben, rechts); Handling der Schachtkamera (unten, links); Kamerabedienung zur Beurteilung der Ablagerungssituation (unten, rechts).....	129
Bild 6.3: Schema für die Dokumentation der Ablagerungserkennung, Auszug (Späth, 2011)	130
Bild 6.4: Workshop-Eindrücke „Bewertung der Ablagerungssituation“: Präsentation Netzbetreiber (oben, links); Auditorium (oben, rechts); Moderierte Diskussion (unten, links); Sammlung von Einflussfaktoren (unten, rechts).....	134
Bild 6.5: Workshop-Eindrücke „Einsatzplanung“: Netzbetreiber stellen Vorgehensweise vor (links); Intensive Diskussion (rechts)	136
Bild 6.6: Workshop „Betriebsführungssysteme und Kanaldatenbanken“: Netzbetreiber stellen ihr Konzept zur Diskussion (oben, links); Gesprächsrunde (oben, rechts); Screenshots EDV-System (unten) (Müller et al., 2011).	137
Bild 6.7: Plandarstellung im EDV-System (Lampe und Barner, 2011).....	138
Bild 6.8: Datenliste im EDV-System (Lampe und Barner, 2011)	138
Bild 6.9: Überprüfung der HD-Pumpe im Freistrahlbetrieb.....	141
Bild 6.10: Druck- und Durchflussmessung im Düsenbetrieb	141
Bild 6.11: Druck am Fahrzeug und an der Düse für verschiedene Durchflüsse	141
Bild 6.12: Düsenkennlinie für Fahrzeug (HD-Pumpe/ Schlauch), abgeleitet aus Bild 6.11	142
Bild 6.13: Druck- und Durchflussmessungen in Abhängigkeit der Messzeit.....	142
Bild 6.14: Saugen des Räumgutes	143

Bild 6.15: Erfassung der Saugleistung	143
Bild 6.16: Eisenstange (Ostmann, 2011).....	146
Bild 6.17: KG-Rohre (Ostmann, 2011)	146
Bild 6.18: Absperrblase (Ostmann, 2011)	146
Bild 6.19: Holzbalken (Ostmann, 2011).....	146
Bild 6.20: Steine aus dem Kanal	146
Bild 6.21: Loses Bruchstück.....	146
Bild 6.22: Übersicht über Störfälle im Kanalbetrieb	147
Bild 6.23: Blick auf die Homepage „Kanalreinigung“	149
Bild 6.24: Muster-Protokoll	149

Verzeichnis der Tabellen

Tabelle 2.1: Beispiele gesetzlicher und technischer Regelungen für den Abwasserbereich (nach Dettmar, 2005).....	5
Tabelle 2.2: Umfang, Art und Häufigkeit der Überwachung von Entwässerungseinrichtungen (Auszug aus der Selbstüberwachungsverordnung Kanal - SüwV Kan, 1995)	6
Tabelle 2.3 Durchzuführende Betriebs- und Unterhaltungsmaßnahmen (Auszug nach Ministerium für Umwelt, Raumordnung und Landwirtschaft NRW, 1995).....	7
Tabelle 2.4: Inspektions- und Reinigungshäufigkeiten nach Arbeitsblatt DWA-A 147 (DWA, 2005).....	8
Tabelle 2.5: Tagesleistungen und Leistungskosten der Hochdruckreinigung in Abhängigkeit vom Kanaldurchmesser (nach Geib et al., 2007).....	11
Tabelle 3.1: Herkunft und Art typischer Feststoffe in der Mischkanalisation (verändert nach Gebhard, 2009).....	16
Tabelle 3.2: Median- und Mittelwerte gemessener Konzentrationen der abfiltrierbaren Stoffe (AFS) und des Chemischen Sauerstoffbedarfs (CSB) für Zentraleuropa (nach Brombach, Fuchs 2003)	17
Tabelle 3.3: kritische Sedimentationsschubspannungen τ_{cS} für ablagerungsfreien Transport und kritische Erosionsschubspannungen τ_{cR} (vgl. Frehmann, 2003).....	24
Tabelle 3.4: Klassifizierung von Ablagerungen (nach Crabtree, 1989)	26
Tabelle 3.5: Eigenschaften der verschiedenen Ablagerungskategorien (nach Crabtree, 1989).....	28
Tabelle 3.6: Auswirkungen von Kanalablagerungen (nach Schönherr, 2003)	32
Tabelle 3.7: Anhaltswerte für die Wahrnehmung und Wirkung von H ₂ S in Abhängigkeit von der Konzentration (verändert nach Harting, 2006)	34
Tabelle 3.4: Prozesse des Schwefelkreislaufes im anaeroben Abwasser (verändert nach Weismann und Lohse, 2007).....	35
Tabelle 4.1: Verfahren der Kanalreinigung und Ihre Einsatzbereiche (Dettmar, 2005)	45
Tabelle 4.2: Schwallspüleinrichtungen, nach Einsatzmöglichkeiten klassifiziert (nach Dettmar et al., 2001).....	49
Tabelle 6.1: Vergleich der Abwasserkonzentrationen im Kanalnetz und im Kläranlagenzulauf.....	71
Tabelle 6.2: äquivalente Sandrauheit k_s für Rohre (Auswahl aus Schröder und Zanke, 2003; Schneider, 2001)	74
Tabelle 6.3: Zusammenstellung der erfassten Messgrößen	84
Tabelle 6.4: Bisher abgeschlossene Versuchsreihen (Stand 01.12.2011).....	87
Tabelle 6.5: Zusammenstellung der erfassten Parameter	120

Verzeichnis der Abkürzungen und der Symbole

Abkürzung	Beschreibung	Einheit
AbwV	Abwasserverordnung	-
AFS	abfiltrierbare Stoffe	mg/L
A_i	Querschnittsfläche der Ablagerungen am Messpunkt i	m^2
AP	Arbeitspaket	-
ATV	Abwassertechnische Vereinigung	-
BFS	Betriebsführungssystem	-
BSB_{4h}	biologischer Sauerstoffbedarf in 4 Stunden	mg/L
BSB_5	biologischer Sauerstoffbedarf in 5 Tagen	mg/L
CH_4	Methan	Vol.-%
$c_i(t)$	Konzentration des Stoffes i zum Zeitpunkt t	g/m^3
CO_2	Kohlenstoffdioxid	Vol.-%
c_s	Raumkonzentration	-
CSB	chemischer Sauerstoffbedarf	mg/L
CSB_{filt}	chemischer Sauerstoffbedarf der filtrierten Probe	mg/L
c_T	Transportkonzentration	-
d	Durchmesser	mm
DIN	Deutsches Institut für Normung e. V.	-
DN	Rohrdurchmesser	mm
d_m	maßgebende Körngröße	m
DWA	Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall e. V.	-
DVWK	Deutscher Verband für Wasserwirtschaft und Kulturbau	-
d*	dimensionslose Korngröße	-
EDV	elektronische Datenverarbeitung	-
EN	Europäische Norm	-
f	Faktor zur Steuerung der Abflussregelung im Testkanal	-
g	Erdbeschleunigung	m/s^2
GIS	geografisches Informationssystem	-
h	Wasserstand im Gerinne	h
H_2S	Schwefelwasserstoff	ppm
HD	Hochdruck	-
h_i	Ablagerungshöhe am Messpunkt i	m
HS^-	Hydrosulfid	mg/L

I_E	Energieliniengefälle	-
I_S	Sohlgefälle	-
IT	Informationstechnologie	-
K	Koeffizient zur Beschreibung der Kohäsionswirkung	-
KA	Kläranlage	-
k_b	betriebliche Rauheit	mm
KIS	Kanalinformationssystem	-
k_S	äquivalente Sandrauheit	mm
l	durchschnittliche Größe der makroturbulenten Wirbel	m
l_i	Länge des zum Messpunkt i gehörigen Rohrabschnitts	m
LWG	Landeswassergesetz	-
MAK	maximale Arbeitsplatz-Konzentration	mL/m ³
MDE	mobile Datenerfassung	-
MID	magnetisch induktiver Durchflussmesser	-
$m_i(t)$	Frachtintensität des Stoffes i zum Zeitpunkt t	g/s
M_i	Frachtsumme des Stoffes i	g
MKULNV	Ministerium für Klimaschutz, Umwelt, Landwirtschaft, Natur- und Verbraucherschutz	-
MUNLV	Ministerium für Umwelt und Naturschutz, Landwirtschaft und Verbraucherschutz (jetzt MKULNV)	-
NH ₄ -N	Ammoniumstickstoff	mg/L
N_{org}	organischer Stickstoff	mg/L
NRW	Nordrhein-Westfalen	-
PDA	Personal Digital Assistant	-
PE	Polyethylen	-
Q	Abfluss	L/s
$q(t)$	Abfluss zum Zeitpunkt t	m ³ /s
Q_F	Volumenstrom der Feststoffe	m ³ /s
Q_{Ges}	Gesamtvolumenstrom	m ³ /s
Q_{Ist}	Ist-Abfluss	L/s
Q_{max}	Abfluss bei maximaler Schieberöffnung	L/s
Q_{Soll}	Soll-Abfluss	L/s
r	Radius	m
RFID	Radio Frequency Identification	-
r_{hy}	hydraulischer Radius	m
RW	Regenwetter	-

Verzeichnis der Abkürzungen und der Symbole

S_2^-	Sulfid	mg/L
S_{Ist}	Ist-Öffnungsweite des Schiebers	mm
S_{max}	maximale Öffnungsweite des Schiebers	mm
SPS	speicherprogrammierbare Steuerung	-
S_{Soll}	Soll-Öffnungsweite des Schiebers	mm
SüwV Kan	Selbstüberwachungsverordnung Kanal	-
TW	Trockenwetter	-
TS	Feststoffgehalt	mg/L
$u'(t)$	Geschwindigkeitsschwankungen am Boden	m/s
$u'_{rms,b}$	Standardabweichung von $u'(t)$	m/s
v_b	Geschwindigkeit am Boden in Höhe der Körner	m/s
v_c	kritische Fließgeschwindigkeit	m/s
VDRK	Verband der Rohr- und Kanal-Technik-Unternehmen e. V.	-
V_F	Volumen der Feststoffe	m ³
V_{ges}	Volumen der Ablagerungen im gesamten Versuchsrohr	m ³
V_{Ges}	Gesamtvolumen des Fluides und der Feststoffe	m ³
v_m	mittlere Fließgeschwindigkeit	m/s
v^*	gesamte Schubspannungsgeschwindigkeit	m/s
Vol.	Volumen	m ³
WHG	Wasserhaushaltsgesetz	-
WRRL	Wasserrahmenrichtlinie	-
δ	Höhe der Grenzschicht	m
η	Proportionalitätsfaktor	-
ν	Viskosität	m ² /s
ρ	Dichte der Flüssigkeit	g/cm ³
ρ_s	Dichte des Feststoffmaterials	g/cm ³
τ	Schubspannung	N/m ²
τ_0	Grenzflächen- oder Randschubspannung	N/m ²
τ_c	kritische Randschubspannung	N/m ²
τ_{cS}	kritische Sedimentationsschubspannung	N/m ²
τ_{cR}	kritische Erosionsschubspannung	N/m ²
τ_{lam}	der laminare Teil der Schubspannung	N/m ²
τ_{turb}	der turbulente Teil der Schubspannung	N/m ²
$\Theta_{c,Shields}$	kritische Schleppspannung nach Shields	N/m ²

1 Einleitung

Die Kanalreinigung ist ein wichtiger Beitrag zur Funktionserhaltung der Kanalisation und beansprucht einen beträchtlichen Anteil der Budgets der Kommunen in Nordrhein-Westfalen. Jedoch ist es oftmals so, dass Ressourcen der Netzbetreiber nicht effizient eingesetzt werden oder dass mangels Wissen über den Zustand der Kanalnetze Haltungen gereinigt werden, ohne dass eine Reinigung erforderlich wäre.

Die Einführung einer bedarfsorientierten Reinigungsstrategie wird vor dem Hintergrund eines steigenden Kostendrucks häufig als naheliegende Lösung genannt. Allerdings ist die Umstellung der Reinigungsstrategie für die Netzbetreiber nicht immer einfach, da es kein allgemeingültiges Konzept zur Umsetzung gibt und die Auswirkungen der Umstellung auf Kanalisation und Umwelt im Voraus oft nicht abzuschätzen sind.

Die Grundlagen bedarfsorientierter Reinigungsstrategien mit ihren betrieblichen Abläufen und Potentialen zur Effizienzsteigerung sind in Kapitel 4 zusammengefasst. Um den Netzbetreibern den Umstieg zu erleichtern, wurden im Rahmen dieses Projektes eine Vielzahl von Workshops und Arbeitssitzungen mit Kanalnetzbetreibern aus ganz Deutschland durchgeführt, um die Probleme, Wünsche und Anforderungen der Kanalnetzbetreiber sowie deren Erfahrungen mit der Umsetzung verschiedener Reinigungsstrategien zusammenstellen und diskutieren zu können. Diese Erkenntnisse wurden aufbereitet und in Kapitel 6 zusammengestellt, um anderen Netzbetreibern bei der Optimierung der eigenen Reinigungsstrategie Hilfestellung zu leisten.

Umfassende Erkenntnisse zur Leistungsfähigkeit von HD-Düsen und dem Verhalten von Ablagerungen unter HD-Strahleinfluss wurden bereits im Forschungsprojekt "Kanalreinigung - Düsen, Drücke, Hochdruckstrahlen" (Bosseler und Schlüter, 2004) erarbeitet. Hier wurde auch auf die Beanspruchung von verschiedenen Rohrmaterialien durch die HD-Spülung eingegangen. Im vorliegenden Vorhaben soll nun mit Blick auf eine bedarfsorientierte Planung der Spüleinsätze (Zeitpunkte, Intervalle) auch die technische Seite der Ablagerungsbildung und -entfernung betrachtet werden. Anhand wissenschaftlicher Versuche an einer Kanalteststrecke wurde untersucht, wie schnell sich Ablagerungen unter weitgehend definierten Randbedingungen aufbauen, wie sie sich verändern und welche Kraft aufgebracht werden muss, um sie zu erodieren (Kapitel 5.1). Ergänzende Untersuchungen im Labormaßstab befassten sich mit der Schwefelwasserstoffbildung (Kapitel 5.3)

und dem Erosionswiderstand von Ablagerungen (Kapitel 5.2). Aus den Ergebnissen wurden Rückschlüsse auf die Wahl sinnvoller Reinigungsintervalle gezogen. Ziel ist eine Reduzierung des Reinigungsaufwandes, ohne Verstopfungen oder sonstige Beeinträchtigungen der Funktion der Kanalnetze zu riskieren.

2 Veranlassung und Zielsetzung

2.1 Ausgangssituation

Die Reinigung verschmutzter Abwasserkanäle gehört zweifellos zu den wichtigsten Aufgaben kommunaler Kanalnetzbetreiber, da verstopfte bzw. in ihrer Leistungsfähigkeit eingeschränkte Kanäle schnell negative Auswirkungen für Anwohner und Umwelt haben. Obwohl alle Kommunen eine weitestgehend störungsfreie Abwasserableitung zum Ziel haben, unterscheidet sich die Umsetzung der Reinigungsaufgabe in den einzelnen Kommunen sehr stark. Dies liegt u. a. an den jeweiligen topografischen Randbedingungen, den verschiedenen Organisationsstrukturen sowie an der unterschiedlichen Interpretation der rechtlichen Vorgaben. Gerade die Angst, gegen geltendes Recht zu verstoßen und ggf. Sanktionen fürchten zu müssen, veranlasst viele Netzbetreiber dazu, ihr Kanalnetz häufiger zu reinigen als tatsächlich erforderlich.

Zum besseren Verständnis der derzeitigen Situation in den Kommunen Nordrhein-Westfalens im Bezug auf die Kanalreinigung (Kapitel 2.3) werden im Folgenden die rechtlichen (Kapitel 2.2) und technischen bzw. organisatorischen (Kapitel 4.1) Grundlagen für die Reinigung von Kanälen zusammengefasst.

2.2 Rechtliche Grundlagen für die Unterhaltung und Reinigung von Kanälen

2.2.1 Allgemeines

Da es trotz gewissenhafter Bemessung der Entwässerungssysteme aus unterschiedlichen Gründen stets Ablagerungen im Kanalnetz geben wird, ist eine regelmäßige Kontrolle und/oder Reinigung der Netze notwendig, um einen sicheren Betrieb zu gewährleisten. Der rechtliche Rahmen für die Unterhaltung und Reinigung von Kanälen wird durch eine Vielzahl an Gesetzen, Vorschriften und Regelwerken gebildet.

Oberste Grundlage des europäischen Wasserrechts ist die europäische Wasserrahmenrichtlinie (WRRL), deren Bestimmungen von den EU-Mitgliedsstaaten in nationales Recht umgesetzt werden müssen. In Deutschland erfolgt diese Umsetzung auf Bundesebene durch das Wasserhaushaltsgesetz (WHG) und die Abwasserordnung (AbwV) und wird auf Länderebene durch Landeswassergesetze, Landesbauordnungen und Eigenkontroll- und Selbstüberwachungsverordnungen weiter konkretisiert. Ergänzt werden diese Gesetze und Verordnungen durch

kommunale Satzungen. Konkrete Vorgaben für den Betrieb und die Reinigung abwassertechnischer Anlagen sind in der Regel nicht Bestandteil der Gesetze oder Verordnungen, sondern von, falls vom Gesetzgeber vorgeschrieben, verbindlich anzuwendenden technischen Regelwerken, die die „allgemein anerkannten Regeln der Technik“ wiedergeben. Hierzu zählen die Arbeits- und Merkblätter der Deutschen Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall e. V. (DWA) und die gültigen Normen des Deutschen Institutes für Normung e. V. (DIN).

Eine Auswahl der für Kanalbetreiber in Deutschland im Allgemeinen und Nordrhein-Westfalen im Speziellen relevantesten Gesetze, Verordnungen oder Regelwerke sind in Tabelle 2.1 hierarchisch dargestellt.

Das Gesetz zur Ordnung des Wasserhaushalts (WHG) hat das Ziel, durch eine nachhaltige Gewässerbewirtschaftung die Gewässer als Bestandteil des Naturhaushalts, als Lebensgrundlage des Menschen, als Lebensraum für Tiere und Pflanzen sowie als nutzbares Gut zu schützen. Dazu regelt es die Nutzung, Bewirtschaftung und Überwachung von Gewässern sowie die Beseitigung und das Einleiten von Abwässern. Der oberste Grundsatz der Abwasserbeseitigung, die die Sammlung, Ableitung und Behandlung umfasst, ist es, Abwasser so zu beseitigen, dass das Wohl der Allgemeinheit nicht beeinträchtigt wird (WHG vom 31.07.2009). Im Wasserhaushaltsgesetz werden keine konkreten Vorgaben zum Betrieb von Kanalnetzen gemacht, stattdessen wird auf die Berücksichtigung der anerkannten Regeln der Technik verwiesen.

Die Verordnung über Anforderungen an das Einleiten von Abwasser in Gewässer (Abwasserverordnung - AbwV) definiert die Anforderungen, die bei der Erteilung einer Erlaubnis für das Einleiten von Abwasser in Gewässer aus den in den Anhängen bestimmten Herkunftsbereichen mindestens festzusetzen sind (Abwasserverordnung - AbwV).

Das Wassergesetz für das Land Nordrhein-Westfalen – Landeswassergesetz-NRW gilt für folgende Gewässer (LWG vom 31.03.2010):

- das ständig oder zeitweilig in Betten fließende oder stehende oder aus Quellen wild abfließende Wasser (oberirdische Gewässer),
- das Meer zwischen der Küstenlinie bei mittlerem Hochwasser oder der seewärtigen Begrenzung der oberirdischen Gewässer und der seewärtigen Begrenzung des Küstenmeeres (Küstengewässer),
- das unterirdische Wasser in der Sättigungszone, das in unmittelbarer Berührung mit dem Boden oder dem Untergrund steht (Grundwasser).

Tabelle 2.1: Beispiele gesetzlicher und technischer Regelungen für den Abwasserbereich (nach Dettmar, 2005)

Gesetzgeber/Herausgeber	Beispiele gesetzlicher und technischer Regelungen
Europäische Union	Wasserrahmenrichtlinie (WRRL)
Bundesrepublik Deutschland	Wasserhaushaltsgesetz (WHG) Abwasserverordnung (AbwV)
Land Nordrhein-Westfalen	Landeswassergesetz NRW (LWG) Selbstüberwachungsverordnung Kanal (SüwV Kan) Runderlass „Anforderungen an den Betrieb und die Unterhaltung von Kanalisationsnetzen“
Kommunen	Entwässerungssatzungen
Technische Vereinigungen und Institute (bspw. DWA oder DIN)	Arbeitsblatt ATV-A 140 – Regeln für den Kanalbetrieb Arbeitsblatt DWA-A 147 – Betriebsaufwand für die Kanalisation - Betriebsaufgaben und Häufigkeiten Merkblatt DWA-M 174 – Betriebsaufwand für die Kanalisation – Hinweise zum Personal-, Fahrzeug- und Gerätebedarf DIN EN 752 – Betrieb und Unterhaltung von Entwässerungssystemen außerhalb von Gebäuden, welche hauptsächlich als Freispiegelsysteme betrieben werden DIN EN 14654-1 – Management und Überwachung von Reinigungsmaßnahmen in Abwasserkanälen und -leitungen – Teil 1: Reinigung von Kanälen

Weiter gilt das LWG für Handlungen und Anlagen, die sich auf die Gewässer und ihre Nutzungen auswirken oder auswirken können. Dies betrifft auch die Anlagen zur Abwasserbeseitigung. Die im Hinblick auf die Kanalreinigung maßgebenden Paragraphen §§60-61 LWG, die die Selbstüberwachung von Abwassereinleitungen und Abwasseranlagen thematisieren, bilden die Grundlage für die Verordnung zur Selbstüberwachung von Kanalisationen und Einleitungen von Abwasser aus Kanalisationen im Mischsystem und im Trennsystem (Selbstüberwachungsverordnung Kanal – SüwV Kan).

Tabelle 2.2: Umfang, Art und Häufigkeit der Überwachung von Entwässerungseinrichtungen (Auszug aus der Selbstüberwachungsverordnung Kanal - SüwV Kan, 1995)

Einrichtungen	Prüfung	Art der Prüfung	Häufigkeit
Kanäle (einschl. der Einbindungen der Anschlusskanäle)	Feststellung von Ablagerungen	optische Kontrolle bzw. Inaugenscheinnahme, Begleitung	nach Einsatz- bzw. Spülplan; sonst alle 2 Jahre
	erstmalige Erfassung des Zustandes	Kanalfernsehuntersuchung oder Begleitung	jährlich 10 % der Kanäle, d. h. das gesamte Kanalnetz innerhalb von 10 Jahren (Untersuchungen seit 1989 werden angerechnet)
	Prüfung des Zustandes nach Abschluss der Ersterfassung		jährlich 5 % der Kanäle, das gesamte Netz aber alle 15 Jahre
Schachtbauwerke	Feststellung des Allgemeinzustandes, sichtbare Schäden an Kanaldeckeln, Schmutzfängern und Steig-eisen soweit am Schachtkörper, Undichtigkeiten, Fremdwasserzufluss, Ablagerungen	Inaugenschein-nahme	im Zusammenhang mit der Selbstüberwachung der Kanäle
Regenüberläufe	Inspektion der Drossel- und der Messeinrichtung, beweglichen Wehre, Heber	Überprüfung der Systemeinstellung nach Angaben des Herstellers	Herstellerangaben, sonst jährlich
	Gängigkeit von Schiebern, Funktionsfähigkeit der Mess- und Regeltechnik	Probelauf nach Angaben des Herstellers	Herstellerangaben, sonst halbjährlich
	Feststellung von Ablagerungen und Verstopfungen	z. B. durch Inaugenscheinnahme	nach starken Niederschlägen, die eine Entlastung erwarten lassen

Die SÜwV Kan wurde am 16. Januar 1995 auf Grundlage des Landeswassergesetzes (LWG) erlassen und regelt die Selbstüberwachung

- des baulichen Zustandes und der Funktionsfähigkeit von Kanalisationsnetzen für die öffentliche Abwasserbeseitigung oder die private Abwasserbeseitigung von befestigten gewerblichen Flächen, die größer als drei Hektar sind,
- der Einleitung von Abwasser aus Entlastungsbauwerken dieser Kanalisationsnetze.

Der Betreiber eines Kanalisationsnetzes hat dieses gemäß § 1 Abs. 1 Nr. 1 SÜwV Kan auf Zustand und Funktionsfähigkeit zu überwachen und hierfür eine Anweisung für die Selbstüberwachung gemäß § 4 aufzustellen. Die Anlage der SÜwV Kan listet die zu beobachtenden Einrichtungen auf und macht Vorgaben zum Prüfungsumfang und zur Häufigkeit der Prüfung.

Im Rahmen dieser Arbeit sind die Vorgaben für Kanäle, Schachtbauwerke und Regenüberläufe von besonderem Interesse. Diese Vorgaben sind in Tabelle 2.2 zusammengestellt.

Tabelle 2.3 Durchzuführende Betriebs- und Unterhaltungsmaßnahmen (Auszug nach Ministerium für Umwelt, Raumordnung und Landwirtschaft NRW, 1995)

Einrichtungen	Ergebnis der Prüfung	Maßnahmen	Durchführung
Kanäle (einschl. der Einbindungen der Anschlusskanäle)	Ablagerungen mit einer Höhe von mehr als 15 % der Profilhöhe (geschätzt)		nach Reinigungsplan sonst innerhalb von
	bis DN 1000	Reinigung	3 Monaten
	größer DN 1000	Reinigung	6 Monaten
Regenüberläufe	Verstopfung der Drossel	Reinigung	unverzüglich

Ergänzend zur SÜwV Kan ist der Runderlass des Ministeriums für Umwelt, Raumordnung und Landwirtschaft des Landes Nordrhein-Westfalen vom 03.01.1995. Diese „Anforderungen an den Betrieb und die Unterhaltung von Kanalisationsnetzen“ enthalten Vorgaben für die Durchführung und Dokumentation des Betriebs von Kanalnetzen. Zudem werden die Maßnahmen genannt, die als Reaktion auf die Ergebnisse der Prüfung nach SÜwV Kan erforderlich sind (Tabelle 2.3).

Die Selbstüberwachungsverordnung Kanal stellt in Verbindung mit dem Runderlass „Anforderungen an den Betrieb und die Unterhaltung von Kanalisationsnetzen“ die konkreteste Richtlinie für die Kanalbetriebe bei der Planung der Reinigungsintervalle dar. Weitere Hilfestellungen geben bspw. die technischen Regelwerke der DWA.

Tabelle 2.4: Inspektions- und Reinigungshäufigkeiten nach Arbeitsblatt DWA-A 147 (DWA, 2005)

Bauwerk	Inspektion	Reinigung
Kanäle	Normalfall: 0,05-0,2/Jahr Sonderfall: 0,5/Jahr	0,1-2/Jahr Annahme für die Ermittlung von Betriebskosten: 0,33/Jahr
Schächte	Schachtinspektion mit Begehung: Normalfall: 0,05-0,2/Jahr Sonderfall: 0,5/Jahr Schachtinspektion ohne Begehung: 0,5-1,0/Jahr	0,1-2/Jahr Annahme für die Ermittlung von Betriebskosten: 0,33/Jahr
Absperrorgane, Schieber etc.	1/Jahr	- ¹⁾
Anschlusskanäle	nach Bedarf oder aufgrund von Rechtsvorschriften	- ¹⁾
Drosseleinrichtungen	betrieblich 12/Jahr baulich 1/Jahr	- ¹⁾
Auslaufbauwerke	betrieblich 4/Jahr baulich 1/Jahr	1/Jahr, bei Bedarf häufiger
Regenbecken, Regenüberläufe	betrieblich 12/Jahr baulich 1/Jahr	1/Jahr, bei Bedarf häufiger
Düker	betrieblich 12/Jahr baulich 0,1-0,2/Jahr	bis 52/Jahr, abhängig von örtlichen Gegebenheiten
Pumpwerke/Pumpensümpfe	1/Jahr	1/Jahr

¹⁾ im Arbeitsblatt DWA-A 147 ist für diese Bauwerke keine Reinigungshäufigkeit aufgeführt

Im Arbeitsblatt ATV-A 140 „Regeln für den Kanalbetrieb - Teil 1: Kanal“ (ATV, 1990) werden Hinweise bspw. zur Durchführung verschiedener Unterhaltungsmaßnahmen, zu Einsatz und Wartung zur Anwendung kommender Geräte oder zur wirtschaftlichen Einsatzplanung gegeben.

Das Arbeitsblatt DWA-A 147 „Betriebsaufwand für die Kanalisation - Betriebsaufgaben und Häufigkeiten“ (DWA, 2005) enthält eine Zusammenstellung und Beschreibung der Tätigkeiten des Kanalbetriebes. Zu den einzelnen Aufgaben werden übliche Intervalle für deren Ausführung genannt (Tabelle 2.4).

Das Merkblatt DWA-M 174 „Betriebsaufwand für die Kanalisation - Hinweise zum Personal-, Fahrzeug- und Gerätebedarf“ (DWA, 2005) gibt Orientierungswerte für den Bedarf an Personal, Fahrzeugen oder Geräten, die für die unterschiedlichen Inspektions- und Reinigungsaufgaben erforderlich sind, sowie für realistische Tagesleistungen an. Die aufgeführten Häufigkeiten entsprechen denen des Arbeitsblattes DWA-A 147 (DWA, 2005).

Die DIN EN 14654-1 (DIN, 2005) stellt die allgemeinen Verfahren zu Management und Überwachung von Reinigungsmaßnahmen in Entwässerungssystemen zusammen und legt Anforderungen an die Umsetzung des Reinigungsprogramms und die Arbeitsverfahren fest.

2.2.2 Schlussfolgerungen für den Kanalbetrieb

Auch wenn durch die in Tabelle 2.1 aufgeführten gesetzlichen und technischen Regelungen die Ziele der Unterhaltung von Kanalnetzen und auch die zur Erreichung dieser Ziele erforderlichen Maßnahmen dargestellt werden, wird doch deutlich, dass bloß ein rechtlicher Rahmen vorgegeben wird, aus dem sich keine konkreten Konzepte für einen effizienten und nachhaltigen Kanalbetrieb ableiten lassen. Vor dem Hintergrund des steigenden Kostendrucks bei den Kommunen ist es erforderlich, weitergehende Erkenntnisse hinsichtlich der Randbedingungen und Auswirkungen unterschiedlicher Unterhaltungs- und Reinigungsstrategien zu gewinnen. So kann ein kostengünstiger und effizienter Kanalbetrieb ermöglicht werden, der gleichzeitig Betriebssicherheit und Gewässerschutz gewährleistet.

2.3 Situation in den Nordrhein-Westfälischen Kommunen

2.3.1 Umsetzung der Reinigungsaufgabe

Die 396 Städte und Gemeinden in Nordrhein-Westfalen betreiben Abwasserkanäle (Freispiegelleitungen) mit einer Länge von etwa 86.592 km (Bosseler et al., 2003). Hinzu kommen noch etwa 860 km Kanal, die von den elf Wasserverbänden in NRW betrieben werden. Nur etwa ein Drittel der kommunalen Netzbetreiber reinigt seine Kanäle mit eigenem Personal und eigenen Fahrzeugen, die übrigen greifen auf private Reinigungsfirmen zurück. Auffällig ist, dass gerade kleinere Kommunen mit weniger als 250 km Kanalnetz auf eine Fremdvergabe der Reinigungsleistung

gen setzen, während alle großen Städte die Kanalreinigung selbst durchführen (Bild 2.1). Folglich scheint hier die Grenze für die Rentabilität bei der Anschaffung eines eigenen Reinigungsfahrzeuges zu liegen. Bosseler et al. (2003) führen als Nachweis für diese Grenze an, dass nach dem Merkblatt DWA-M 174 (DWA, 2005b) die jährliche Reinigungsleistung eines Fahrzeugs bei etwa 120 km liegt, so dass mit einem zweijährigen Turnus, der von vielen Netzbetreiber praktiziert wird, mit einem Fahrzeug etwa 240 km gereinigt werden können. Für Einzugsgebiete, die kleiner als diese 240 km sind, ist die Anschaffung eines Reinigungsfahrzeugs wirtschaftlich nur vertretbar, wenn die regionalen Gegebenheiten bspw. aufgrund starker Ablagerungsbildung kürzere Reinigungsintervalle als die vielerorts üblichen zwei Jahre erfordern.

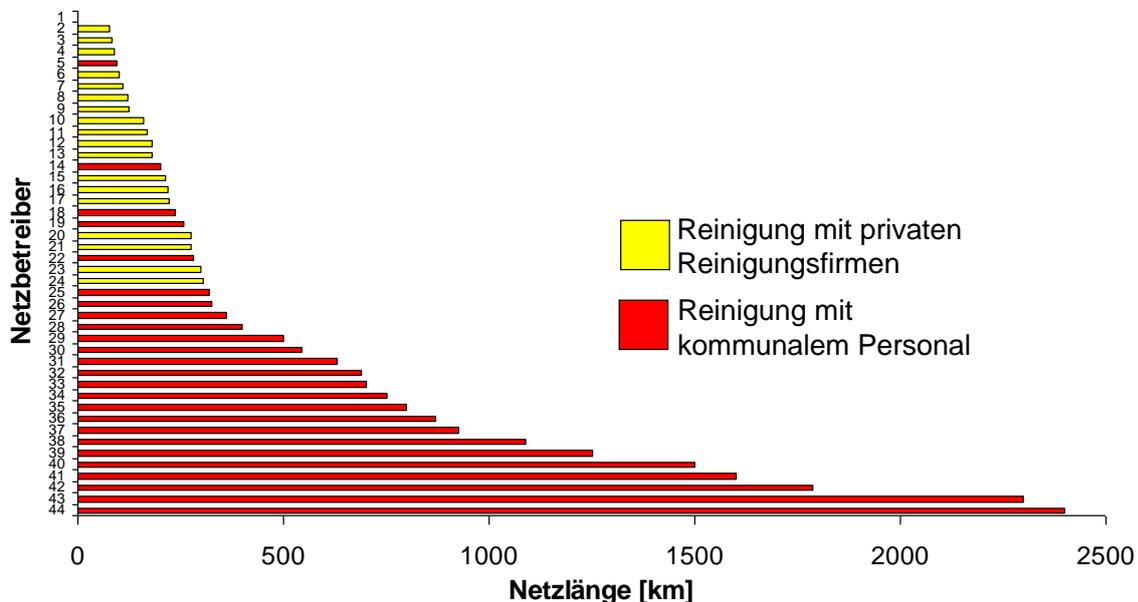


Bild 2.1: Organisation der Reinigungsarbeiten in Abhängigkeit von der Kanalnetzlänge (Orth et al., 2008)

Die Tatsache, dass viele Kommunen ihre Kanalnetze alle zwei Jahre oder häufiger reinigen, gründet unter anderem auf den Vorgaben der SÜwV Kan, die eine Feststellung von Ablagerungen nach Einsatz- oder Spülplan bzw. mindestens alle zwei Jahre fordert. Viele Kommunen verzichten allerdings auf eine besondere Erfassung der Ablagerungssituation und reinigen direkt ihr komplettes Kanalnetz in Abständen von zwei Jahren und setzen damit eine Ablagerungsfreiheit voraus. Der Nachteil dieser Form der Präventivstrategie ist jedoch, dass oftmals Kanalhaltungen gereinigt werden, die keine oder unbedeutende Ablagerungen enthalten. In

solchen Fällen ist, wie bereits von einigen Kommunen in NRW praktiziert, eine bedarfsorientierte Reinigung zu bevorzugen, um Kosten für unnötige Reinigungseinsätze einzusparen. Eine bedarfsorientierte Reinigungsstrategie setzt allerdings Wissen über die Ablagerungssituation in den eigenen Kanalnetzen seitens der Netzbetreiber voraus.

Um dieses Wissen zu erlangen, bedarf es neben motivierten Mitarbeitern die nötige technische Ausstattung zur Erhebung und Verarbeitung/Auswertung der Daten. Hier bieten sich Hilfsmittel wie spezielle handliche Datenerfassungsgeräte an, mit denen sich durch die Verknüpfung elektronischer Schachterkennung mit den durch das Betriebspersonal vor Ort eingegebenen Zustandsdaten effizient Informationen über das Kanalnetz sammeln und in das Betriebsführungssystem übertragen lassen. Derartige Systeme werden zwar bereits von einem Großteil der Kommunen genutzt, eine konsequente Umstellung auf bedarfsorientierte Reinigungsstrategien erfolgte meist jedoch noch nicht.

Tabelle 2.5: Tagesleistungen und Leistungskosten der Hochdruckreinigung in Abhängigkeit vom Kanaldurchmesser (nach Geib et al., 2007)

Kanaldurchmesser	Tagesleistung [m/Tag]		Leistungskosten [€/m]	
	nach DWA	nach VDRK	nach DWA	nach VDRK
DN 200-300	1.000	2.000	1,25	0,62
DN 350-500	900	1.800	1,39	0,69
DN 600-800	700	1.400	1,79	0,89
DN 900-1.200	500	1.000	2,50	1,25

Sind noch keine umfangreichen Daten erhoben worden, sollten die Betriebserfahrungen langjähriger Mitarbeiter genutzt werden, was jedoch in der Regel nur bei Netzbetreibern mit eigenen Reinigungsfahrzeugen möglich ist. Kommunen, die die Reinigung der Kanäle an private Unternehmen vergeben, müssten mit diesen die Erfassung des Kanalzustandes als zusätzliche Leistung vereinbaren, da sich die Unternehmen in der Regel ausschließlich auf die Reinigungsaufgabe konzentrieren. Für sie stehen möglichst große Tagesleistungen im Vordergrund, die nicht selten deutlich über denen liegen, die laut Merkblatt DWA-M 174 (DWA, 2005b) bei angemessenen Düsenrückzugsgeschwindigkeiten zu erreichen sind.

Die großen Unterschiede zwischen den Tagesleistungen der privaten Reinigungsunternehmen spiegeln sich auch in den Leistungssätzen wider, die der Verband der Rohr- und Kanal-Technik-Unternehmen e. V. (VDRK) ermittelt hat (Tabelle 2.5). Diese sind doppelt so hoch wie die Angaben des Merkblattes DWA-M 174 DWA, 2005b). Eine Umfrage des Instituts für Unterirdische Infrastruktur (IKT) bei 15 Netzbetreibern bzgl. der durchschnittlichen Reinigungskosten pro Kanalmeter offenbarte noch größere Diskrepanzen (Bild 2.2). Die Kosten variierten zwischen 0,31 und 1,78 €/m, wobei deutlich zu erkennen ist, dass die Reinigung mit eigenem Personal teurer ist als die Vergabe der Reinigungsleistung an Fachfirmen.

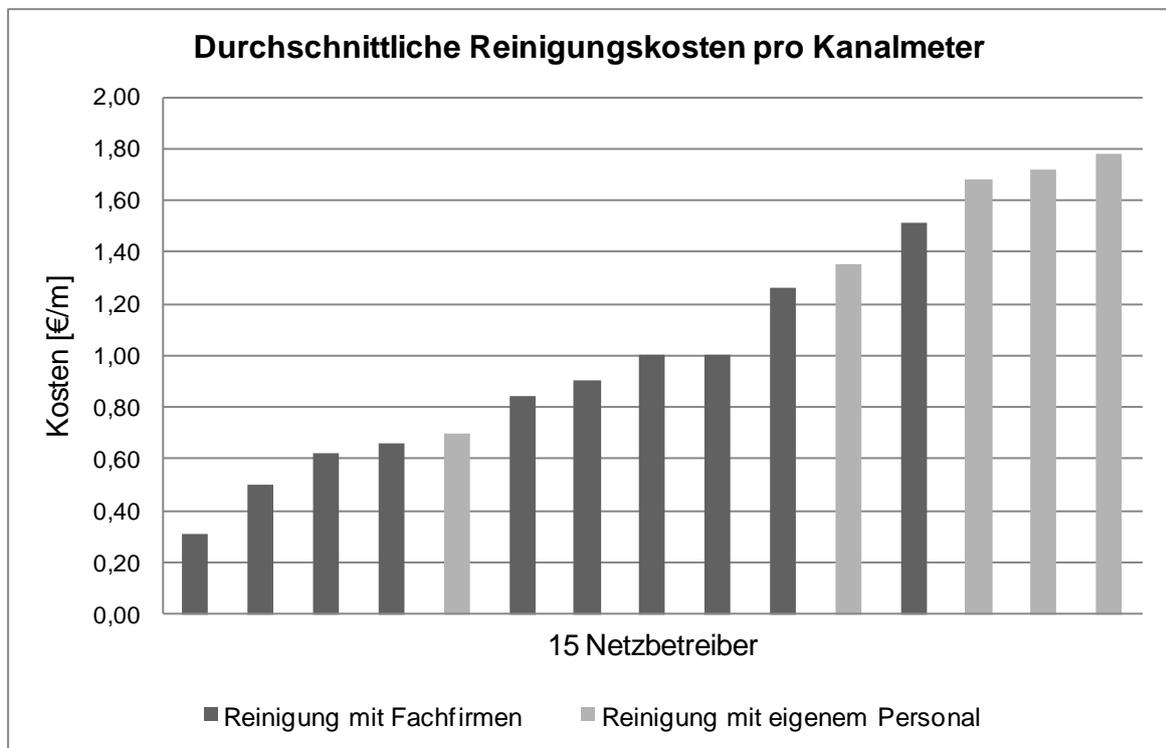


Bild 2.2: Durchschnittliche Reinigungskosten pro Kanalmeter gemäß einer Umfrage des Instituts für Unterirdische Infrastruktur (IKT) bei 15 Netzbetreibern

Die hohen Tagesleistungen der privaten Reinigungsunternehmen sollten jedoch nicht zwangsweise auf mangelnde Gründlichkeit aufgrund zu großer Rückzugsgeschwindigkeiten zurückgeführt werden, sondern auch auf die hohe Effizienz durch optimierte Betriebsabläufe und die deutlich längeren Einsatzzeiten von nicht selten zwölf Stunden pro Tag.

2.3.2 Zukünftige Herausforderungen

Die Kommunen in Nordrhein-Westfalen sehen sich einem immensen Kostendruck gegenübergestellt, der in den nächsten Jahren voraussichtlich weiter steigen wird. Deshalb wird versucht, in sämtlichen Aufgabenfeldern Kosten einzusparen. Im Bereich der Kanalreinigung, die sich die Netzbetreiber in NRW jedes Jahr rund 50 Millionen Euro kosten lassen, sind die Möglichkeiten zur Kosteneinsparung begrenzt. Grund hierfür ist die technische und personelle Ausstattung der kommunalen Reinigungsbetriebe.

Vor diesem Hintergrund sind Netzbetreiber, welche die Reinigungsaufträge extern vergeben, im Vorteil, da sich bei diesen eine Reduzierung der Reinigungsintervalle im Zuge der Einführung einer bedarfsorientierten Reinigungsstrategie direkt in geringeren Ausgaben niederschlagen würde. Aber auch Kommunen, die eigenständig reinigen, können durch angepasste Reinigungsstrategien profitieren. So können sie Personal, das nicht mehr zur Reinigung benötigt wird, im Rahmen eines optimierten Personalmanagements mit anderen Aufgaben (Schachtinspektionen, Reparaturarbeiten etc.) betrauen. So können Zustand des Kanalnetzes und das Betriebswissen über selbigen verbessert und gleichzeitig die Kosten für teure Reinigungsfahrzeuge eingespart werden.

Der weiterhin stetig sinkende spezifische Trinkwasserverbrauch und der Einwohnerrückgang werden zukünftig evtl. dazu beitragen, dass der Kostendruck auf die Kommunen weiter steigt. Dies liegt zum einen daran, dass die Abwassergebühren in direktem Zusammenhang zum Trinkwasserverbrauch stehen. Um die Gebühren bei zurückgehendem Verbrauch konstant zu halten, müssen die Ausgaben gesenkt werden. Zum anderen wird der geringere Abfluss in den Kanälen, dessen Effekt zusätzlich durch die Abkopplung und Versickerung von Regenwasser verstärkt wird, dazu führen, dass die Ablagerungsproblematik verschärft wird, so dass die Kanäle häufiger gereinigt werden müssen.

2.4 Problemstellung

Vor dem Hintergrund des wachsenden Kostendrucks ist es verständlich, dass Kommunen nach Möglichkeiten suchen, ihre Ausgaben zu reduzieren. Auch bei der Kanalreinigung soll gespart werden. Häufig sehen sich die Netzbetreiber dabei jedoch mit einem Interessenkonflikt konfrontiert, da sich Kosten in erster Linie durch Reduzierung der Reinigungshäufigkeiten realisieren lassen. Demgegenüber steht jedoch das Bestreben, die durch Ablagerungen verursachten Emissionen aus dem Kanalnetz zum Wohle der Allgemeinheit zu minimieren.

Handlungsspielraum ergibt sich evtl. für diejenigen Kommunen, die ihre Kanalnetze in regelmäßigen Intervallen von wenigen, oftmals nur ein bis zwei Jahren reinigen, ohne den Verschmutzungszustand bei der Erstellung des Reinigungsplans zu berücksichtigen. Erfahrungen zeigen, dass hier häufig Kanäle gereinigt werden, die weitestgehend frei von Ablagerungen sind und keiner Reinigung bedürfen. Diesen Kommunen eröffnen sich folglich durch die Umstellung auf eine bedarfsorientierte Kanalreinigung große Einsparpotentiale. Es mangelt allerdings an praktischen Nachweisen, dass die Umstellung der Reinigungsstrategie, die in den meisten Fällen eine Verlängerung der Reinigungsintervalle bedeutet, tatsächlich keine negativen Auswirkungen zur Folge hat. Mögliche negative Auswirkungen wären erhöhte Schmutzfrachtausträge an Regenüberläufen oder eine Beeinträchtigung des Entwässerungskomforts.

Inwiefern Reinigungsintervalle verlängert werden können und welche Einsparmöglichkeiten die Steigerung der Effizienz, bspw. durch Nutzung innerbetrieblicher Synergien oder den Einsatz moderner Technik (bspw. Schachterkennungssysteme, elektronische Datenerfassung etc.), bietet, ist Gegenstand dieses Berichts.

3 Wissenschaftlicher Stand des Wissens

3.1 Herkunft und Art von Feststoffen in der Kanalisation

Es gibt eine Vielzahl von Untersuchungen zur Herkunft der Feststoffe in Kanalisationen, bspw. von Verbanck et al. (1994), Bares et al. (2009) oder Artières (1988). Vereinfachend lassen sich diese in der Aussage zusammenfassen, dass jede, der zum Abfluss kommenden Wasserarten (Schmutz-, Fremd- oder Niederschlagswasser), charakteristische Feststoffe mit sich führt. Hinzu kommen in der Regel gelöste Inhaltsstoffe oder auch hydrophobe Substanzen wie Fette, die bei der Ablagerungsbildung eine bedeutende Rolle spielen können.

In Schmutzwassereinleitungen überwiegen gelöste und partikulär ungelöste organische Stoffe. Diese organischen Stoffe stammen hauptsächlich aus den bekannten Quellen Urin, Fäkalien, Küchenabfall und Hygienepapier. Zusätzlich werden über das Schmutzwasser mineralische sowie aufgrund ihrer Beständigkeit problematische Stoffe wie Hygieneartikel, Textilien, Kunststofftüten und ähnliches eingetragen.

Bei Niederschlägen transportiert das Regenwasser Stoffe, die es in der Atmosphäre oder auf Oberflächen aufgenommen hat, in den Kanal. Einleitungen von Dach- oder Verkehrsflächen haben, verglichen mit dem Schmutzwasser, nur geringe Anteile an gelösten Stoffen. Dafür können sie erhebliche Mengen an Feststoffen, hauptsächlich mineralischer Art (Staub, Sand, Streugut etc.) enthalten. Organische Einträge durch Blütenstaub, Laub etc. treten nur saisonal auf, können aber zu beträchtlichen Belastungen führen (vgl. Schönherr, 2003). Nach Iossifidis (1986) beträgt der Anteil des Oberflächeneintrags an der Fracht in Mischwasserkanalisationen während eines Regenereignisses 30-70 %. Am unteren Ende dieser Spanne liegen die Ergebnisse der Messungen von Artières (1988), der den Anteil der Straßeneinläufe am ganzjährigen Feststoffeintrag (einschließlich der Trockenwetterabflüsse) auf 31 % (46 % der mineralischen und 13 % der organischen Stoffe) bezifferte.

An schadhafte oder undichten Stellen kommt es zum Eintrag von Boden und Bettungsmaterial mit dem eindringenden Fremdwasser in die Kanäle. Zusätzlich können durch Windverfrachtung von Oberflächen Feststoffe in die Kanalisation gelangen.

Eine Aufzählung typischer Feststoffeinträge in die Mischkanalisation zeigt Tabelle 3.1.

Tabelle 3.1: Herkunft und Art typischer Feststoffe in der Mischkanalisation (verändert nach Gebhard, 2009)

Herkunft der Feststoffe		Art der Feststoffe	
Quelle	Eintragspfad	organisch	mineralisch
Haushalte, Gewerbe/Industrie etc.	Schmutzwassereinleitung	Urin, Fäkalien Küchenabfälle Hygienepapier, Hygieneartikel, Textilien, Kunststofftüten,	Sand, Bauschutt,
Oberflächen	Abspülungen von Dächern, Straßen, befestigten und Grünflächen	Pollen, Kot, Laub, Straßenabfall	Staub, Sand, Split, Bauschutt
	Windverfrachtung	Straßenabfall, Pollen, Laub	Sand
Fremdwasser	Undichtigkeiten, Fehlleitungen	Laub, Äste, Gras, Pollen	anstehender Boden

3.2 Stoffkonzentrationen und -frachten

Die im Abwasser transportierten Frachten lassen sich theoretisch einfach nach Gleichung (3.1) aus dem Integral der in Gleichung (3.2) berechneten Frachtintensität, die sich aus den Größen Stoffkonzentration und Abfluss ergibt, ermitteln (vgl. Geiger, 1984).

$$m_i(t) = q(t) \cdot c_i(t) \quad \text{in g/s} \quad (3.1)$$

$$M_i = \int m_i(t) dt \quad \text{in g} \quad (3.2)$$

$m_i(t)$: Frachtintensität des Stoffes i in g/s zum Zeitpunkt t

$q(t)$: Abfluss in m^3/s zum Zeitpunkt t

$c_i(t)$: Konzentration des Stoffes i in g/m^3 zum Zeitpunkt t

M_i : Frachtsumme des Stoffes i

Aufgrund der technischen und organisatorischen Schwierigkeiten bei der Durchflussmessung und Probenahme im Kanal mangelt es jedoch an einer breiten Datenbasis mit aussagekräftigen Messdaten aus Kanalisationen. Tabelle 3.2 zeigt eine Auswahl an Messergebnissen, die Brombach und Fuchs (2003) im Rahmen der Erstellung eines Datenpools von gemessenen Verschmutzungskonzentrationen zusammengetragen haben. Die zugrunde liegenden Daten schwanken jedoch in einem großen Bereich, so dass die aufgeführten Werte nur grobe Orientierungswerte darstellen.

Tabelle 3.2: Median- und Mittelwerte gemessener Konzentrationen der abfiltrierbaren Stoffe (AFS) und des Chemischen Sauerstoffbedarfs (CSB) für Zentraleuropa (nach Brombach, Fuchs 2003)

	AFS [mg/L]		CSB [mg/L]	
	Mittelwert	Median	Mittelwert	Median
Im Regenwasserkanal der Trennkanalisation	318,8	153,0	94,3	77,1
Im Trockenwetterabfluss der Mischkanalisation	249,0	154,5	477,2	454,4
Im Mischwasserabfluss der Mischkanalisation	315,9	264,0	305,9	274,0
Im Überlaufwasser der Mischkanalisation	228,7	175,0	172,4	112,0

Die Parameter, die am häufigsten erfasst wurden und hinsichtlich der Ablagerungsproblematik am relevantesten sind, sind die abfiltrierbaren Stoffe (AFS) und der chemische Sauerstoffbedarf (CSB). Während mit dem Parameter AFS annähernd die gesamte Feststofffracht erfasst wird, wird der CSB dazu genutzt, die Belastung des Abwassers mit organischen Stoffen abzuschätzen.

Dass der Mittelwert der in Tabelle 3.2 dargestellten Messwerte deutlich über dem Median liegt, ist auf den Einfluss von vereinzelt Messungen mit extrem hohen Konzentrationen zurückzuführen.

3.3 Feststofftransport

Die Prozesse des Feststofftransports sind sehr komplex und wurden u. a. von Ristenpart (1995) ausführlich dargestellt. An dieser Stelle werden lediglich die Thesen und Formeln vorgestellt, die zum grundlegenden Verständnis des Feststofftransports und der Bildung bzw. Erosion von Kanalablagerungen notwendig sind.

Maßgeblicher Faktor für den Feststofftransport in einer Flüssigkeit ist die Strömung derselben. Besitzt der Abwasserstrom als transportierendes Medium ausreichend Energie, so erzwingt er die Bewegung der Feststoffe (Ristenpart, 1995). Die Einflussgrößen, mit denen sich die auf die Feststoffe übertragbare Energie am besten darstellen lässt, sind die Bettschubspannungen. Ob Feststoffe transportiert, sedimentiert oder evtl. erodiert (Ablagerungen) werden, hängt davon ab, ob bestimmte Grenzschubspannungen über- oder unterschritten werden. Die Größe der Grenzschubspannungen wird unter anderem durch die Eigenschaften der Feststoffe (Form, Größe, Kohäsion etc.), der Flüssigkeit (Viskosität, Transportkapazität etc.) und des Gerinnes (Lage, Geometrie etc.) beeinflusst.

3.3.1 Transportarten

Die Fracht an Feststoffen in Flüssigkeiten setzt sich aus drei Komponenten zusammen, die jedoch fließend ineinander übergehen. Als Spülfracht („wash-load“) werden Schwebstoffe, meist Partikel mit sehr kleiner Korngröße, die erst nach unendlich langer Zeit sedimentieren, bezeichnet. Die Spülfracht bildet gemeinsam mit den Abwasserinhaltsstoffen, die aufgrund der turbulenten Strömung in Schwebelast gehalten werden, die Suspensions- oder Schwebstofffracht („suspended load“). Die restliche Feststofffracht umfasst die Geschiebe- oder Bodenfracht („bed load“), die sich an der Gerinnesohle rollend, gleitend oder springend (Saltation) mit der Strömung bewegt.

Führböter (1961) hat für die verschiedenen Kombinationsmöglichkeiten dieser Transportarten vier Transportzustände definiert, die sich in Abhängigkeit von der Schubspannung bzw. von der mittleren Fließgeschwindigkeit hinsichtlich der Feststoffkonzentrationen über die Querschnittshöhe unterscheiden (Bild 3.1):

- a) Transport als schwebende Bewegung
- b) Transport als schwebende und springende Bewegung
- c) Transport als schwebende und gleitende Bewegung
- d) Transport als schwebende und gleitende Bewegung über Ablagerungen

Der Transportzustand der schwebenden Bewegung ist charakterisiert durch eine über den durchflossenen Querschnitt annähernd konstante Feststoffkonzentration. Um diesen Zustand einer homogenen Suspension aufrecht zu erhalten, sind jedoch mittlere Fließgeschwindigkeiten erforderlich, die in einem Abwasserkanal kaum vorkommen.

Ist die mittlere Fließgeschwindigkeit zu gering für eine schwebende Bewegung, aber immer noch deutlich größer als die kritische Fließgeschwindigkeit, dann nimmt die Feststoffkonzentration zur Sohle hin zu. Ursache ist die geringere Turbulenz und damit geringere Kräfte, die dem Absinken entgegen wirken. Die Teilchen werden schwebend oder springend (mit gelegentlicher Sohlberührung) als heterogene Suspension transportiert.

Nimmt die mittlere Fließgeschwindigkeit noch weiter ab und nähert sich der kritischen Fließgeschwindigkeit an, bildet sich unterhalb der heterogenen Suspension Geschiebe. Zwar sind weiterhin alle Feststoffe in Bewegung und es gibt keine Ablagerungen, jedoch findet der sohlnahe Transport nur noch springend, rollend oder gleitend statt.

Sinkt die mittlere Fließgeschwindigkeit unter die kritische Fließgeschwindigkeit, können nicht mehr alle Teilchen transportiert werden und es bildet sich eine Ablagerungsschicht, auf der sich die in Bewegung befindlichen Feststoffe als Suspension oder Geschiebe fortbewegen.

Zum besseren Verständnis von Bild 3.1 ist auf die Unterscheidung zwischen der Raumkonzentration c_S und der Transportkonzentration c_T hinzuweisen (Ristenpart, 1995):

$$c_S = \frac{V_F}{V_{Ges}} \quad (3.3)$$

V_F : Volumen der Feststoffe

V_{Ges} : Gesamtvolumen des Fluides und der Feststoffe

$$c_T = \frac{Q_F}{Q_{Ges}} \quad (3.4)$$

Q_F : Volumenstrom der Feststoffe

Q_{Ges} : Gesamtvolumenstrom

Verteilung der Konzentration über den Querschnitt

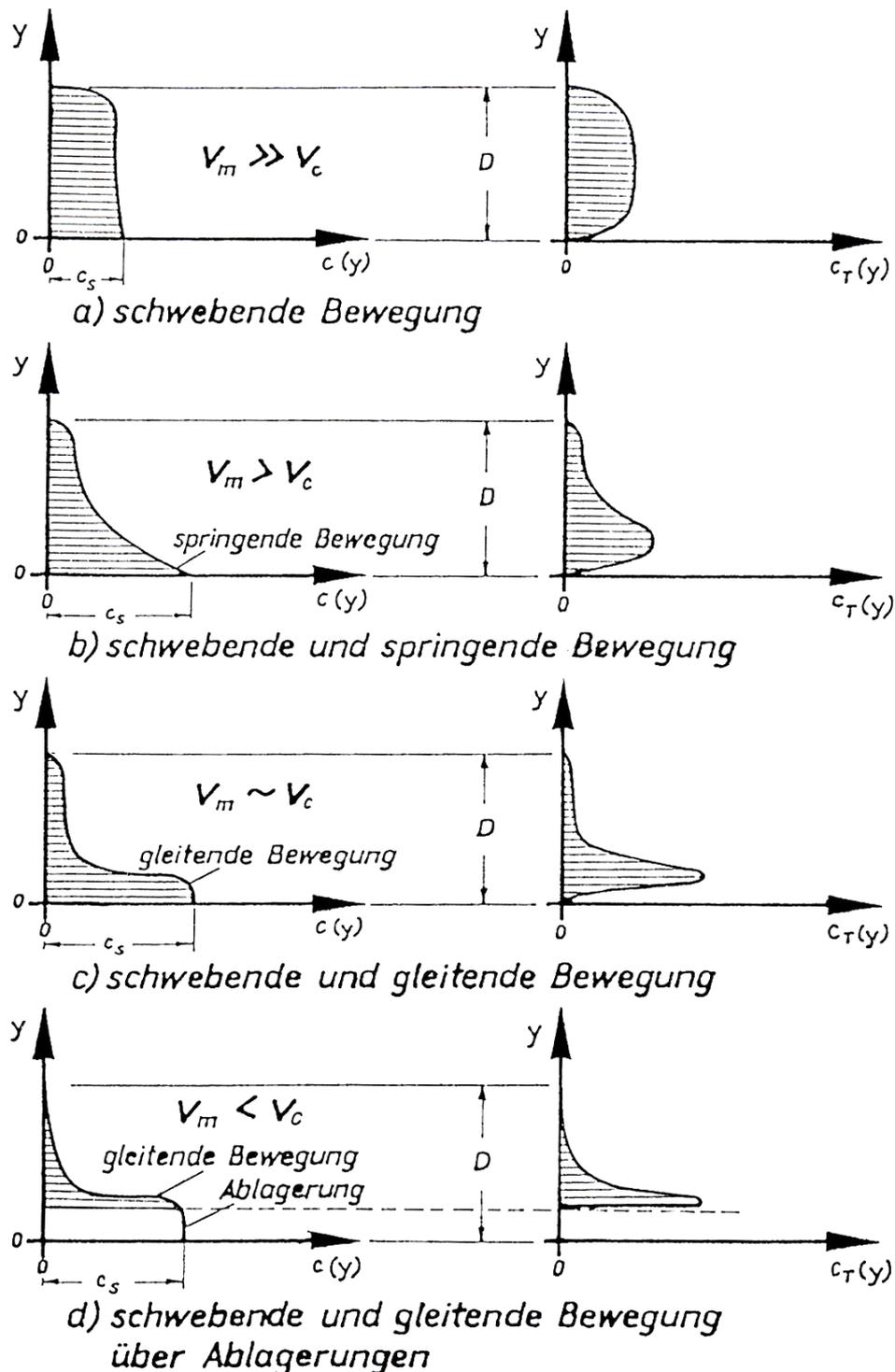


Bild 3.1: Konzentrationsprofile in Rohrleitungen in Abhängigkeit von der mittleren Strömungsgeschwindigkeit nach Führböter (in Sander, 1989)

Die Einteilung der Transportzustände nach Bild 3.1 gilt nur für sehr gleichförmige Korngrößenverteilungen. Dies ist im Abwasser selten gegeben, da hier ein großes

Spektrum verschiedener Korngrößen und Materialdichten vorkommt. So fällt die Klassifizierung des Transportzustandes im Abwasserkanal schwer, da neben feinen, in Suspension transportierten und vorwiegend organischen Partikeln in der Regel auch gröbere Feststoffe (organisch und mineralisch) vorhanden sind, welche nur als Geschiebe oder gar nicht bewegt werden. Dadurch bedingt lässt sich die Situation im Abwasserkanal meist als schwebende oder gleitende Bewegung beschreiben, die je nach Randbedingung ohne oder über Ablagerungen stattfindet. Ziel der Kanalbemessung ist ein solcher Zustand ohne dauerhafte Ablagerungen.

3.3.2 Schubspannung

Das bessere Verständnis des Transports von Feststoffen in Flüssigkeiten war bereits zu Beginn des 20. Jahrhunderts Ziel wissenschaftlicher Untersuchungen. Seitdem hat eine Vielzahl von Autoren sich mit der Problematik befasst, mathematische Modelle für den Feststofftransport zu entwickeln. Ausgehend von strömungsmechanischen Grundlagen und unter Berücksichtigung verschiedenster Materialeigenschaften und Randbedingungen wurden Formeln für Turbulenzen und Auftriebskräfte, Sinkgeschwindigkeiten und kritische Zustände für ablagerungsfreien Transport entwickelt. Die wichtigsten Zusammenhänge werden ausführlich bspw. von Macke (1982), Sander (1989) oder Ristenpart (1995) beschrieben.

Die große Mehrheit der Autoren, die sich mit dieser Thematik befasst haben, stimmt darüber überein, dass die Schubspannung der maßgebende Parameter ist, um Grenzzustände für ablagerungsfreien Transport zu definieren (Verbanck et al., 1994).

Schubspannungen werden hervorgerufen durch innere (infolge der Viskosität des Fluides) und äußere (an Grenzflächen wie Gerinnwand oder Sedimentbett) Reibung und werden unterteilt in laminare und turbulente Anteile. Der Maximalwert wird als Tangentialspannung zwischen Flüssigkeit und Sohle definiert und nimmt von der Wasseroberfläche zur Sohle hin zu. Da es neben dieser vertikalen auch eine horizontale Verteilung der Schubspannungen über den Querschnitt quer zur Fließrichtung gibt, ist bei quer-symmetrischem Geschwindigkeitsprofil der Maximalwert in der Mitte der Sohle anzunehmen (Gebhard, 2009).

Der Vorteil der Schubspannung zur Definition kritischer Fließzustände gegenüber der in der Literatur häufig auch zur Beschreibung des kritischen Fließzustands verwendeten Fließgeschwindigkeit liegt darin, dass sie die direkt auf das Sediment

einwirkenden Kräfte repräsentiert, während die Fließgeschwindigkeit nur eine mittelbare Größe darstellt (Gebhard, 2009).

Der laminare Teil der Schubspannung, der durch Formänderung oder Scherung der Fluidteilchen in einer laminaren Strömung erzeugt wird und proportional zu den Geschwindigkeitsunterschieden zwischen den Teilchen senkrecht zur Fließrichtung ist, stellt sich nach Newton wie folgt dar (Ristenpart, 1995):

$$\tau_{lam} = \eta \frac{dv}{dy} \quad (3.5)$$

η : Proportionalitätsfaktor

dv/dy : Gradient der Fließgeschwindigkeit nach der Höhe y des Wasserkörpers

Die turbulente Komponente der Schubspannung lässt sich durch unregelmäßig wirbelnde Mischbewegungen bei der Strömung von zähen Fluiden in langen, geraden Rohren erklären und durch die sogenannte Mischungsweggleichung von Prandtl beschreiben:

$$\tau_{turb} = \rho l^2 \left(\frac{dv}{dy} \right)^2 \quad (3.6)$$

ρ : Dichte der Flüssigkeit

l : durchschnittliche Größe der makroturbulenten Wirbel bzw. der Weg, den die Flüssigkeitsballen quer zur Hauptströmungsrichtung im Mittel zurücklegen

Die turbulenten Schubspannungen sind aufgrund der gegenüber den Molekularbewegungen höheren turbulenten Schwankungsbewegungen deutlich größer als die laminaren Schubspannungen. Bild 3.2 veranschaulicht, dass der laminare Anteil der Schubspannung oberhalb der Grenzschicht ($\delta < y < h$) vernachlässigbar klein ist und die Strömung hier unabhängig von der Viskosität der Flüssigkeit ist. Innerhalb der Grenzschicht hingegen setzt sich die Gesamtschubspannung hauptsächlich aus den laminaren Schubspannungen zusammen und die turbulente Komponente wird vernachlässigbar (Ristenpart, 1995).

Für Gerinne wird die Schubspannung allgemein nach Gleichung (3.7) berechnet. Bei sehr breiten Gerinnen ($b > 30 \cdot h$) kann der hydraulische Radius r_{hy} durch die Wassertiefe h ersetzt werden.

$$\tau_0 = \rho \cdot g \cdot r_{hy} \cdot I_E \quad \text{in N/m}^2 \quad (3.7)$$

τ : Grenzflächen- oder Randschubspannung

g : Erdbeschleunigung

r_{hy} : hydraulischer Radius

I_E : Energieliniengefälle

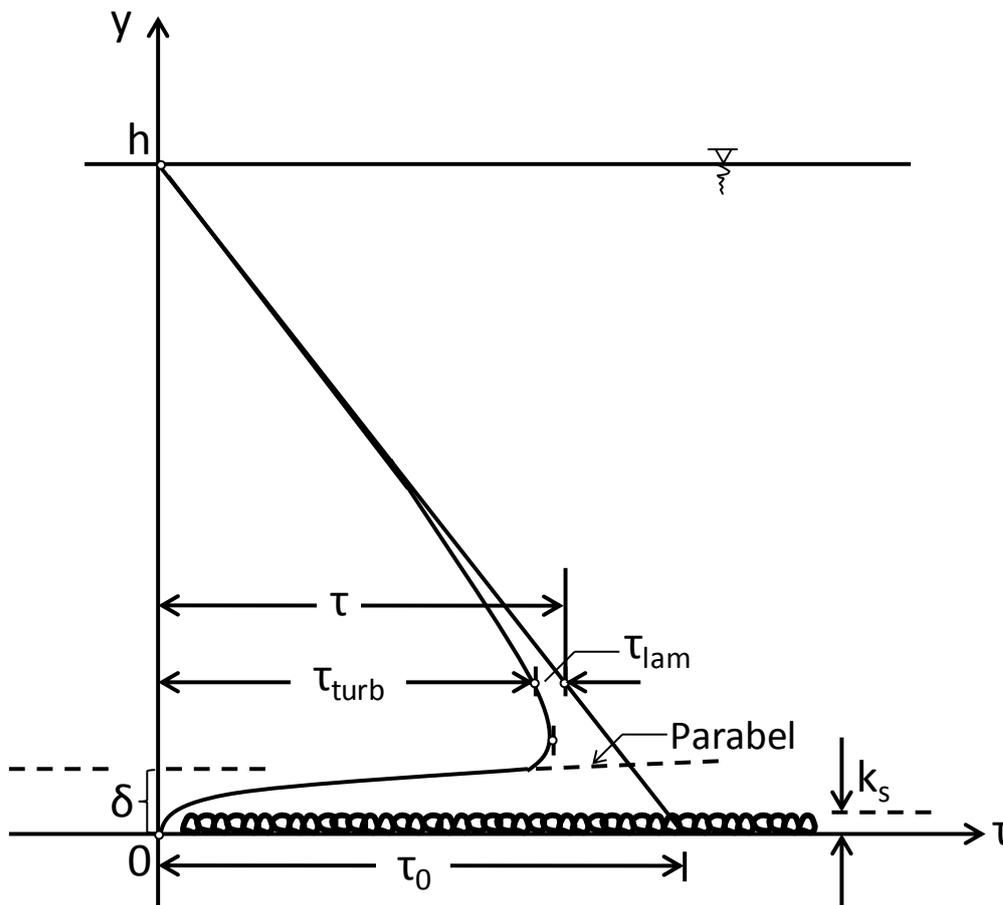


Bild 3.2: Vertikale Schubspannungsverteilung bei Freispiegelabfluss (nach Yalin, 1977)

Es ist jedoch zu beachten, dass die mittlere Randschubspannung bei Vorhandensein von Ablagerungen aufgrund der unterschiedlichen äquivalenten Sandrauheit des Ablagerungsbetts und der Rohrwandung nicht mit der mittleren Bettschubspannung gleichzusetzen ist. Einstein (1942) führte deshalb einen hydraulischen Radius ein, der sich aus der Wichtung der Anteile der Bereiche (an/über Rohrwandung oder Ablagerungsbett) ergibt. Diese Theorie zur Separationstechnik wurde von Kleijwegt (1992) überprüft und insofern weiterentwickelt, dass er die Grundannahme Einsteins, in allen Bereichen herrsche die gleiche Fließgeschwindigkeit, verwarf. Der Nachteil von Einsteins Annahme liegt darin, dass zu große Bettschubspannungen gegenüber den gemessenen, mittleren Bettschubspannungen berechnet werden. Die nach Einstein berechneten Werte entsprechen in etwa

den maximalen Bettschubspannungen und können somit für Erosionsberechnungen gelten. Je nach Anwendungsfall ist daher ggf. eine Anpassung des hydraulischen Radius unter Berücksichtigung des ablagerungsbehafteten Bereichs durchzuführen.

Tabelle 3.3: kritische Sedimentationsschubspannungen τ_{cS} für ablagerungsfreien Transport und kritische Erosionsschubspannungen τ_{cR} (vgl. Frehmann, 2003)

Quelle	τ_{cS} [N/m ²]	τ_{cR} [N/m ²]	Bemerkung
(Ristenpart und Uhl, 1993)	0,15-0,48	0,52-0,89	Trockenwetter (TW)
		1,7	Regenwetter (RW)
		3,3	RW nach längerer Trockenperiode
(Dette et al., 1996)	0,6		Sohle ablagerungsbehaftet, DN 900-2000
(Weyand und Dohmann, 1988)	1,1	1,1	DN 1800, $I_s = 5 \text{ ‰}$, Ausspülversuche mit künstlich eingebrachten Sanden ohne Trockenwetterabfluss
(Brombach et al., 1993)	1,0-1,6	1,0-1,6	Ermittelt aus Sinkgeschwindigkeit und Dichte und Ansatz von (Macke 1982), bei $\tau_c = 1,6 \text{ N/m}^2$ werden 90 % der Feststoffe transportiert
(Nalluri und Ghani, 1996)	1-4		Bemessungsgrenzwert für Selbstreinigung
(Ristenpart, 1995)		0,98-2,9	neue Ablagerungen
		2,2-5,6	ältere, verfestigte Ablagerungen

Auch wenn mit der Schubspannung ein Parameter zur Umschreibung des kritischen Transportzustandes existiert, können aufgrund der unterschiedlichen Zusammensetzung von Ablagerungen keine präzisen Zahlenwerte für Ablagerungs- oder Erosionsbeginn angegeben werden. Tabelle 3.3 zeigt eine Auswahl der in der Literatur für Mischwasserkanäle angegebenen Werte, die durch Feldversuche ermittelt wurden.

3.4 Kanalablagerungen

Wie in Kapitel 3.3 beschrieben, tritt Sedimentation und Bildung von Ablagerungen bei Strömungszuständen auf, bei denen die Schubspannungen zu gering sind, um sämtliche Feststoffe zu transportieren. Dies geschieht bspw. in flach verlegten Haltungen, insbesondere bei geringen Trockenwetterabflüssen. Bedingt durch bspw. Hindernisse, Schäden oder ungünstige Strömungsverhältnisse bei seitlichen Einleitungen können sich in steiler verlegten Haltungen ebenfalls Ablagerungen bilden.

3.4.1 Ablagerungsarten

Ablagerungen sind oftmals gekennzeichnet durch eine für die jeweilige Stelle im Kanalnetz charakteristische Zusammensetzung. Bei hohen Schubspannungen weisen Ablagerungen höhere Dichten auf, da feine Partikel oder Inhaltsstoffe mit großer spezifischer Oberfläche (Laub, Papier etc.) nicht sedimentieren oder leicht ausgewaschen werden. Bei niedrigeren Schubspannungen sedimentieren auch feinere Feststoffe. In sehr flachen Kanälen entsteht häufig eine Schichtung der Ablagerungen, bei der sich oberhalb einer mineralischen Schicht eine dickflüssige Schicht, die bspw. aus einem Gemisch von organischem Material und Papier besteht, bildet (Bild 3.3). Diese Schicht wurde in der Literatur mehrfach, wenn auch mit leichten Abweichungen in der Definition, beschrieben und mit Begriffen wie „near bed solids“ (Arthur et al., 1996), „fluid sediment“, „organic fluid“ oder anderen bezeichnet (Gebhard, 2009; Chebbo et al., 2003; Oms et al., 2003). Da diese Schicht leicht mobilisiert werden kann, gilt sie als eine der Hauptquellen für die organische Verschmutzung in Mischwasserabflüssen.

Es gibt eine Vielzahl von Ansätzen zur Klassifizierung von Kanalablagerungen. Einer der bekanntesten stammt von Crabtree (1989), der die Sedimente in fünf Kategorien einteilte (Tabelle 3.4).

Bild 3.4 zeigt einen typischen ablagerungsbehafteten Querschnitt durch einen Mischwasserkanal, an dem die Einteilung von Crabtree veranschaulicht wird. Maßgebliche Eigenschaften der unterschiedlichen Kategorien werden in Tabelle 3.5 aufgeführt. Kategorie B wird in dieser Zusammenstellung nicht aufgeführt, da der Fokus der Untersuchungen von Crabtree auf der Bedeutung von Ablagerungen als Schadstoffquelle lag und die verfestigten Ablagerungen der Kategorie B hierfür von untergeordneter Bedeutung sind.

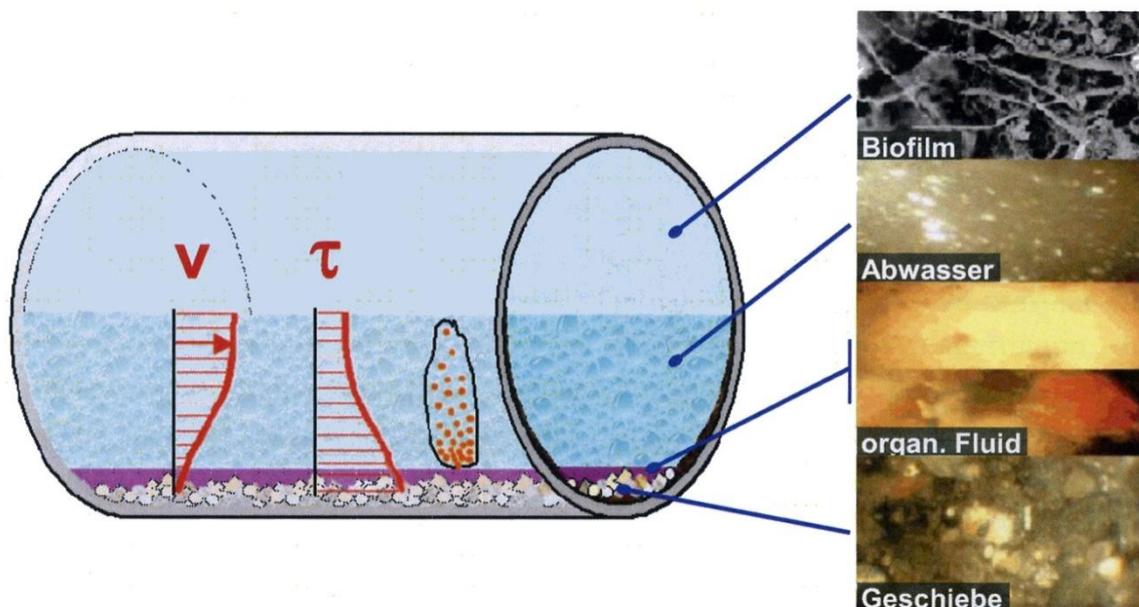


Bild 3.3: Schematisch Schichtung im Abwasserkanal (nach Gebhard, 2009)

Tabelle 3.4: Klassifizierung von Ablagerungen (nach Crabtree, 1989)

Typ	Beschreibung	Vorkommen
A	grobkörnig, locker, überwiegend mineralisch	Kanalsohle
B	wie Typ A, jedoch verfestigt durch Fett, Bitumen, Zement etc.	
C	mobil/leicht lösbar, feinkörnig	in rückstaubehafteten Bereichen bzw. in Zonen mit geringer Geschwindigkeit, entweder eigenständig oder über dem Typ-A Sediment
D	organischer Schleim, Biofilm	an der Rohrwandung im Bereich des mittleren Wasserstandes
E	feinkörnig, sowohl mineralisch als auch organisch	Regenüberlaufbecken und andere Bereiche mit sehr geringen Fließgeschwindigkeiten

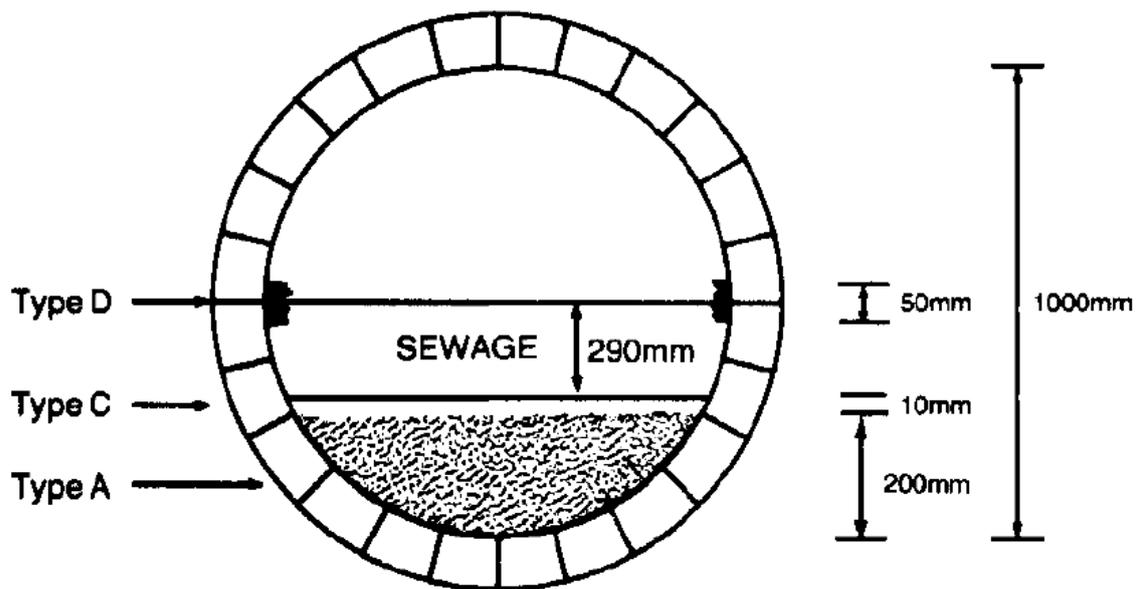


Bild 3.4: Typischer Querschnitt eines mit Ablagerungen behafteten Mischwasserkanals (Crabtree, 1989)

Vergleicht man die Konzentrationen der Verschmutzungsparameter der einzelnen Ablagerungskategorien, so kann man diesen verschiedene Verschmutzungspotentiale zuordnen. Eine große Gefährdung geht demnach von der Sielhaut (Typ D) aus, die zwar nur einen geringen Beitrag zur Feststofffracht leistet, jedoch stark mit organischen Stoffen belastet ist, Schwermetalle kumuliert und zur Schwefelwasserstoffbildung beiträgt. Die Ablagerungskategorien C und E bergen ein hohes Verschmutzungspotential und stellen die Hauptquelle für feine, meist organische Feststoffe im Mischwasserabfluss dar. Ablagerungen der Kategorie A sind nur bei Starkregen bedeutend, wenn anaerobe Produkte ausgespült werden, so dass diesen ein mittleres Verschmutzungspotential zugeordnet wird (Crabtree, 1989; Ristenpart, 1995; Schönherr, 2003).

Tabelle 3.5: Eigenschaften der verschiedenen Ablagerungskategorien (nach Crabtree, 1989)

Ablagerungskategorie		A	C	D	E
Physikalische Eigenschaften					
Prozentuale Partikelgröße					
Kies (2,0-50,0 mm)	Mittelwert	33	0	6	9
	Maximum	90	0	20	80
	Minimum	3	0	1	4
Sand (0,063-2,0 mm)	Mittelwert	61	55	62	69
	Maximum	87	71	83	85
	Minimum	3	5	1	1
Schluff, Ton (< 0,063 mm)	Mittelwert	6	45	32	22
	Maximum	30	73	52	80
	Minimum	1	29	17	1
Dichte [kg/m³]		1720	1170	1210	1460
Feststoffgehalt [g/kg]		734	270	258	480
Verschmutzungsparameter					
CSB	[g pro kg TS]	23,0	76,0	193,0	48,0
	[g pro kg feuchtem Sediment)	16,9	20,5	49,8	23,0
BSB_{4h}	[g pro kg TS]	0,4	1,8	1,6	0,9
	[g pro kg feuchtem Sediment)	0,3	0,5	0,4	0,4
BSB₅	[g pro kg TS]	4,2	20,0	103,0	13,0
	[g pro kg feuchtem Sediment)	3,1	5,4	26,6	6,2
Organik	[g pro kg TS]	7,0	50,0	61,0	22,0
Fette und Öle	[g pro kg TS]	0,9	5,0	42,0	1,5
NH₄-N	[g pro kg feuchtem Sediment)	0,1	0,1	0,1	0,1
N_{org}	[g pro kg feuchtem Sediment)	0,6	1,0	0,7	0,7

3.4.2 Alterung von Kanalablagerungen

In Kapitel 3.4.1 wird dargestellt, dass der organische Bestandteil der Ablagerungen maßgeblich das Verschmutzungspotential beeinflusst. Da mineralische Feststoffe aufgrund ihrer größeren spezifischen Wichte schneller sedimentieren, sind Ablagerungen in der Regel größtenteils mineralisch. Auch wenn die organischen Stoffe meist weniger als 10 % der Ablagerungen ausmachen, haben sie nicht nur bedeutenden Einfluss auf das Verschmutzungspotential, sondern ebenfalls auf die mechanischen Eigenschaften der Ablagerungen. Angefaulte organische Materie kann als Bindeglied zwischen den nicht kohäsiven mineralischen Partikeln wirken und diese miteinander verkleben. Eine nicht gleichförmige Korngrößenverteilung und eine Mischung des Feinanteils ($d < 100 \mu\text{m}$) im Verhältnis von etwa 4:1 zwischen mineralischen und organischen Partikeln sind Attribute besonders stabiler Kanalablagerungen. Kolloidale Teilchen mit negativer Ladung aus diesen organischen Partikeln halten durch van der Waal's-Kräfte zusammen und verleihen dem Feinanteil kohäsive Eigenschaften, obwohl eigentliche Tone (Teilchengröße $< 2\mu\text{m}$) fehlen (Artières, 1988).

Bild 3.5 verdeutlicht die Wirkmechanismen bei der Verfestigung von Kanalablagerungen. Kohäsive Teilchen verkitten nicht kohäsive Teilchen und nicht gleichkörnige Korngrößen erhöhen die Scherfestigkeit durch Verschachtelung. Diese beiden Mechanismen, die als die Verfüllung der Hohlräume zwischen denen sich zunächst absetzenden gröberen mineralischen Partikeln zusammengefasst werden können, führen gemeinsam mit der Setzung/Konsolidation der Partikel zum Anstieg des Trockensubstanzgehaltes und damit der Festigkeit mit zunehmendem Alter der Ablagerungen. Artières (1988) stellte bei Kanalisationsschlamm innerhalb eines Monats eine Verdopplung des Trockensubstanzgehaltes fest, die eine um das 16-fache erhöhte Scherfestigkeit zur Folge hatte.

Die Konsolidation beschreibt den Prozess der mechanischen Verfestigung, bei dem die zunächst in einem lockeren Gefüge vorliegenden Ablagerungen durch das zunehmende Gewicht aufgrund weiter sedimentierender Feststoffe auf der Ablagerungsoberfläche verdichtet werden. Der durch diese Gewichtskraft und den Wasserdruck ausgeübte Konsolidierungsdruck presst die Ablagerungen der unteren Schichten zusammen und führt zu Änderungen in den Sedimentstrukturen. Die Verdrängung von Wasser aus den Zwischenräumen des Sediments resultiert, unterstützt von biochemischen Prozessen, in der Bildung verfestigter Ablagerungsschichten bis hin zu hartnäckigen Verkrustungen.

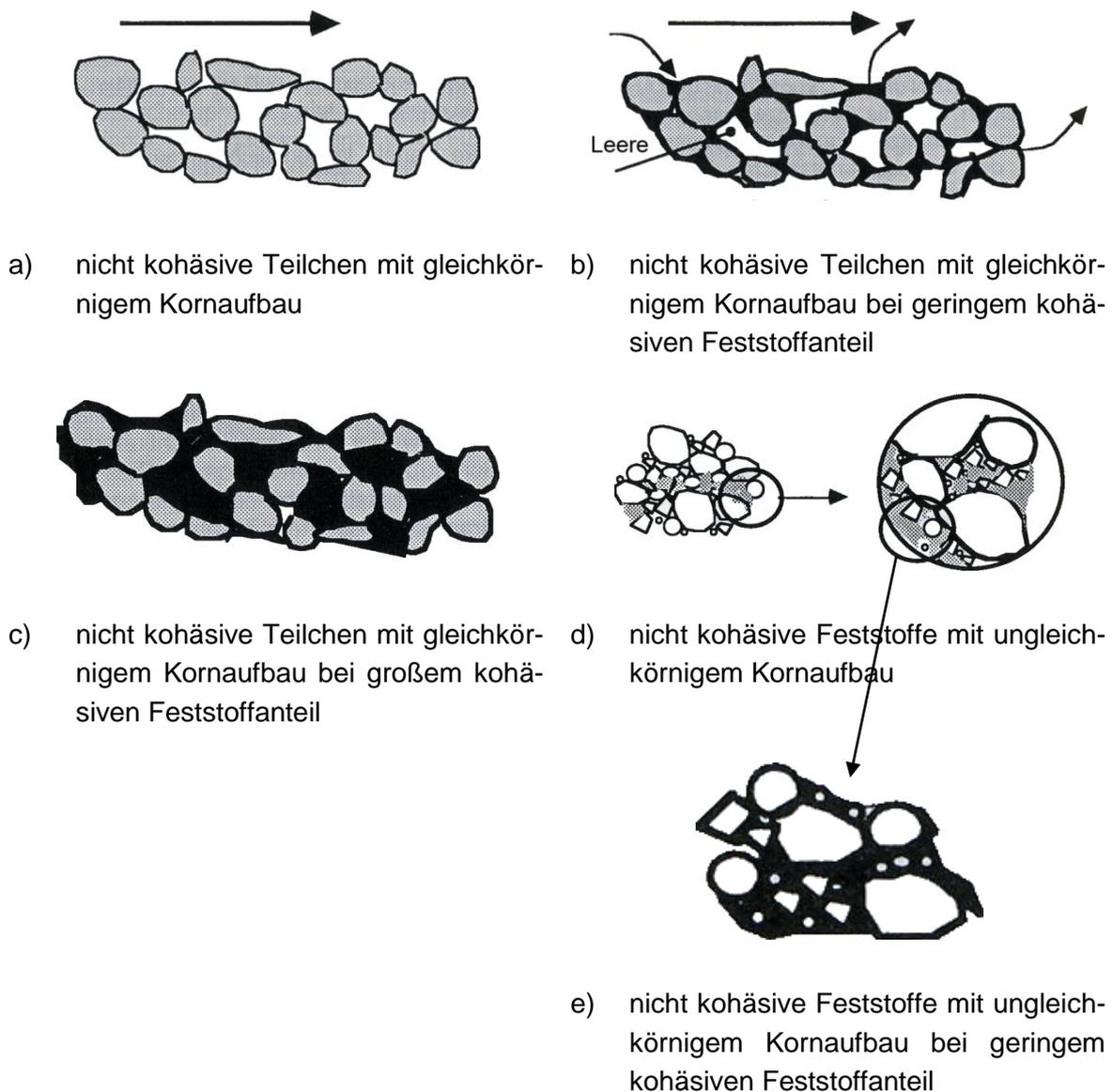


Bild 3.5: Struktur und Verhalten von Feststoffen (nach Artières, 1988)

Neben der Verfestigung unterliegen Kanalablagerungen weiteren zeitabhängigen Veränderungen. So können sich Schadstoffe aus dem Abwasser wie Schwermetalle (bspw. Zinn, Kupfer oder Blei) in den Sedimenten akkumulieren und eine erhöhte Umweltbelastung beim Austrag über Regenüberläufe bedeuten. Neben den problematischen Substanzen, die von vornherein im Abwasser enthalten sind, kann es durch biochemische Prozesse in den Ablagerungen auch zur Entstehung weiterer unerwünschter Stoffe kommen. Ein bekanntes Beispiel ist die Schwefelwasserstoffbildung unter anaeroben Bedingungen, die Geruchsbelästigung, Gesundheitsgefährdung und starke Korrosion zur Folge haben kann.

Auch wenn gemeinhin von einer Verfestigung der Ablagerungen mit der Zeit ausgegangen wird, hat das nicht zur Folge, dass die Ablagerungen im Kanal mit zunehmendem Alter ständig anwachsen. Verschiedene Messungen haben ergeben, dass die Ablagerungshöhen großen Schwankungen unterliegen (Bild 3.6).

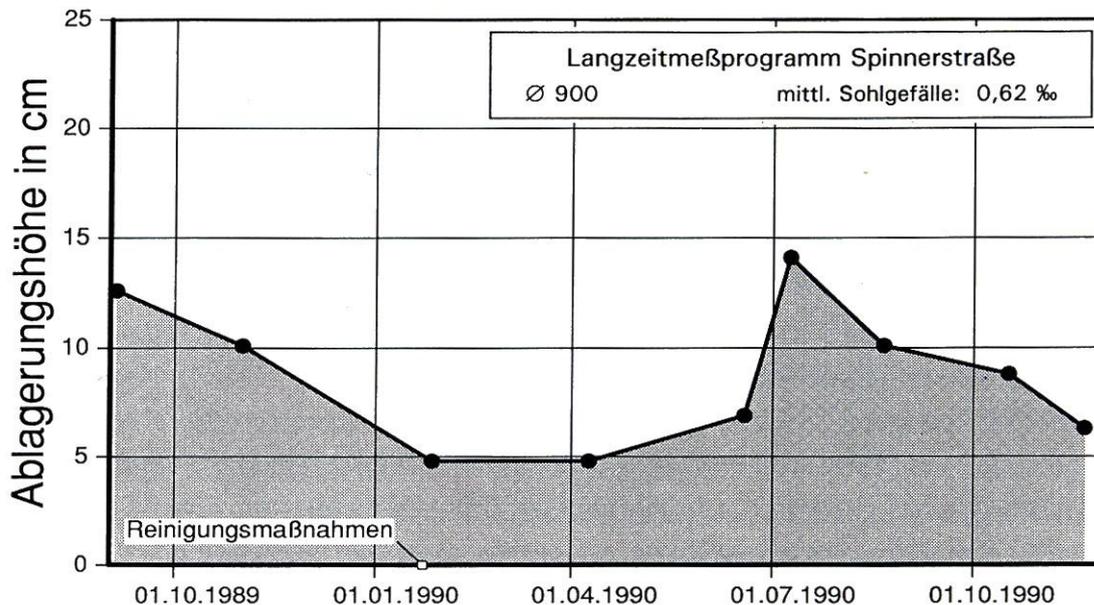


Bild 3.6: Entwicklung der Ablagerungshöhen im Kanalabschnitt Spinnerstraße (Dette et al., 1996)

Die Ergebnisse eigener praktischer Untersuchungen zur Entstehung und zeitlichen Veränderung von Ablagerungen werden in Kapitel 5 ausführlich dargestellt.

3.5 Auswirkungen von Kanalablagerungen

Ablagerungen in Kanalnetzen können eine Vielzahl von negativen Folgen für Kanalisation, Kläranlage oder Gewässer haben. So kann die hydraulische Leistungsfähigkeit von Kanalrohren in Extremfällen durch Ablagerungen derart herabgesetzt werden, dass es zu Verstopfungen und damit zu Rückstau, Überflutungen und häufigerem Anspringen von Überläufen mit all seinen Unannehmlichkeiten für Anwohner und Umwelt kommen kann. Zudem können Ablagerungen die Bildung von Gasen wie bspw. Schwefelwasserstoff, was neben starker Kanalkorrosion auch Geruchsbelästigung oder sogar Gesundheitsgefährdung zur Folge haben kann (Schönherr, 2003), fördern.

Um die negativen Auswirkungen von Kanalablagerungen möglichst zu minimieren, werden regelmäßig Kanalreinigungsarbeiten vorgenommen. Da manche Auswirkungen jedoch nur durch sehr häufiges Reinigen zu beherrschen sind, gilt es die

optimale Strategie zur Vermeidung und Verminderung der Beeinträchtigungen durch Kanalablagerungen unter gleichzeitiger Berücksichtigung ökonomischer Aspekte zu finden.

Tabelle 3.6: Auswirkungen von Kanalablagerungen (nach Schönherr, 2003)

Auswirkungen auf die Kanalisation	Auswirkungen auf Sonderbauwerke der Kanalisation	Auswirkungen auf kommunale Kläranlagen	Auswirkungen auf Fließgewässer
Verkleinerung des Kanalquerschnitts/ Verringerung der hydraulischen Leistungsfähigkeit	vermehrter Ausstoß von Trüb- und Schadstoffen durch Rücklösung von Ablagerungen	Gefahr der Beladung des Rechens Gefahr der Überlastung des Sandfangs	vermehrter Eintrag von Trüb- und Schadstoffen Ablagerungen von Feststoffen/ Ver- schlammung der Gewässersohle
Rückstau	häufigere Entlastungsereignisse	Erhöhter Primärschlammanfall in der Vorklärung	Sauerstoffmangel Eutrophierung
Geringere Speicherkapazität des Kanalvolumens		Erhöhte Zulauffrachten in der biologischen Stufe	Veränderung der Lebensgemeinschaften
Erhöhung der Rauheit		Zusammenbruch der biologischen Phosphorelimination	
Geruchsbelästigung und Gesundheitsgefährdung durch Gasbildung (H ₂ S, CH ₄ etc.)		Gefahr der Schlammaschwemmung aus der Nachklärung	
Biogene Schwefelsäurekorrosion			

3.6 Schwefelwasserstoffbildung in der Kanalisation

3.6.1 Eigenschaften von Schwefelwasserstoff

Schwefelwasserstoff (H₂S) ist ein farbloses, leicht entzündliches Gas, welches bei Fäulnis- und Zersetzungsprozessen durch den Abbau von Biomasse entsteht. Abiotisch, also ohne Beteiligung von Lebewesen, ist es ein variabler Bestandteil in Erdgas sowie Erdöl und kommt als vulkanisches Gas sowie in Quellwasser gelöst vor.

Das Molekulargewicht von Schwefelwasserstoff beträgt 34,08 g und es besitzt eine Dichte von 1,54 g/l. Dadurch ist es geringfügig schwerer als Luft und kann sich somit bei geringer Turbulenz in Bodennähe anreichern. (Matsché und Saracevic, 2007)

Die Löslichkeit von Schwefelwasserstoff in Wasser beträgt bei einer Temperatur von 20 °C 2,6 Liter H₂S pro Liter Wasser. Betrachtet man die chemische Struktur, besteht eine große Ähnlichkeit zwischen dem Wasser- und dem Schwefelwasserstoffmolekül. Die Polarität von Schwefelwasserstoff ist jedoch geringer, da das Schwefel- und das Sauerstoffatom unterschiedlich groß sind. Das ist der Grund dafür, dass zwischen den Schwefelwasserstoffmolekülen keine Wasserstoffbrücken zu Stande kommen. Obwohl die Molmasse verglichen mit Wasser deutlich höher ist, liegt der Schwefelwasserstoff dadurch unter Normalbedingungen als Gas vor. (Matsché und Saracevic, 2007)

In Wasser gelöst, ergibt sich eine schwache und nicht beständige Säure, da H₂S durch Sauerstoff zu Schwefel und Wasser oxidiert wird. Schwefelwasserstoff ist stark toxisch und wirkt bereits bei 1 mg/kg Körpergewicht für den menschlichen Organismus tödlich. Die Toxizität gleicht dabei der der Blausäure.

Durch die Zersetzung von Proteinen, welche aus schwefelhaltigen Aminosäuren bestehen, entsteht ein starker Geruch nach faulen Eiern. Dieser Geruch kann vom Menschen bereits bei sehr geringen Konzentrationen (ca. 0,001 Vol.-%) wahrgenommen werden (Tabelle 3.7). Bei höheren Konzentrationen wird zunächst ein widerlich süßlicher Geruch wahrgenommen bevor der Geruchssinn bereits bei kurzanhaltender Aussetzung mit dem Gas komplett gelähmt wird. Die Wirkungen der Vergiftung werden durch Aufnahmezeit und Konzentration bestimmt.

Die maximale Arbeitsplatzkonzentration (MAK-Wert) liegt bei 10 ppm, das entspricht 15 mg/m³.

Verbindungen des Schwefelwasserstoffs werden Sulfide genannt, obwohl der Begriff "Sulfid" genau genommen nur das S₂⁻ - Ion bezeichnet. Im Abwasser kommen folgende Verbindungen vor: gelöster Schwefelwasserstoff H₂S, Hydrogensulfidion HS⁻ und das eigentliche Sulfid S₂⁻.

Tabelle 3.7: Anhaltswerte für die Wahrnehmung und Wirkung von H₂S in Abhängigkeit von der Konzentration (verändert nach Harting, 2006)

Konzentration [mL/m ³]	Wahrnehmung	Wirkung
0,002 – 0,15	Geruchsschwelle	
0,1 – 1,0	deutlich wahrnehmbar	
1,0 – 10	unangenehm, lästig	mögliche Störungen des Atemsystems
10	MAK – Maximale Arbeitsplatz Konzentration	reduzierte Sauerstoffaufnahme bei körperlicher Bewegung
ab 20	unerträglich	Sehstörungen, Hornhautschädigung bei längerer Einwirkung
ab 100	abgeschwächtes Geruchsempfinden, das sich nach wenigen Minuten verliert	Reizungen der Schleimhäute
Um 200	unangenehmer Geschmack	Kopfschmerzen, Atembeschwerden
> 500	Verlust des Geruchsempfindens	Krämpfe, Schwindel, Bewusstlosigkeit
Um 1.000		Bewusstlosigkeit, tödlich innerhalb weniger Minuten
Um 5.000		Bewusstlosigkeit, tödlich innerhalb weniger Sekunden

3.6.2 Prozess der Schwefelwasserstoffbildung

Die anaeroben Prozesse, die zu einer Schwefelwasserstoffbildung im Abwasser führen sind die Desulfuration und die Desulfurikation. Diese Prozesse, welche nach DWA-M 168 (2010) in der Sielhaut und den Kanalablagerungen stattfinden, sind in der Tabelle 3.8 voneinander abgegrenzt.

Tabelle 3.8: Prozesse des Schwefelkreislaufes im anaeroben Abwasser (verändert nach Weismann und Lohse, 2007)

Benennung	Prozess	Endzustand
Desulfurikation	Bakterielle Zersetzung anorganischer Schwefel-Sauerstoff-Verbindungen, z. B. Sulfat	Sulfid/Schwefelwasserstoff
Desulfuration	Bakterielle Zersetzung von Thioaminosäuren (Abbau von schwefelhaltigem Eiweiß)	Sulfid/Schwefelwasserstoff Polysulfide

Bei der sogenannten Desulfurikation sind sulfatreduzierende Bakterien, welche Desulfurizierer genannt werden, beteiligt. Diese sind obligat anaerobe Bakterien, die bei aeroben Verhältnissen zwar gehemmt sind, jedoch nicht abgetötet werden. Desulfurizierer existieren bei Temperaturen von 5-75°C und benötigen einen pH-Wert von 5-9,5. Ihr bevorzugtes Redoxpotential liegt zwischen -150 und -200 mV (Weismann und Lohse, 2007).

Die Bakterien reduzieren im Abwasser vorhandenes Sulfat zur Energiegewinnung unter Oxidation von organischem Substrat. Hierbei entstehen Sulfide bzw. Schwefelwasserstoff, welcher an dieser Stelle maßgeblich ausgetrieben wird. Voraussetzung sind anaerobe Verhältnisse, die entstehen, wenn der gelöste Sauerstoff und vorhandenes Nitrat verbraucht wurden. Dadurch erfolgt eine Absenkung des Redoxpotentials und die Desulfurizierer werden aktiv. Da es sich um mikrobiologische Prozesse handelt spielen naturgemäß die Abwassertemperatur und vor allem der Gehalt an organischen Stoffen (ausgedrückt durch den BSB₅ und den CSB) eine große Rolle. (Bielecki und Schremmer, 1987)

Die biogene Aktivität der Mikroorganismen ist abhängig von der Abwassertemperatur. Wird die Temperatur erhöht, sind auch die mikrobiologischen Prozesse beschleunigt. Eine Temperaturerhöhung um 10 °C bewirkt eine Verdopplung der Bakterienaktivität (Matsché und Saracevic, 2007). Durch den schnelleren Verbrauch des vorhandenen Sauerstoffs kann dies besonders im Sommer oder bei Einleitung warmer Abwässer zu einer früheren Bildung von Schwefelwasserstoff führen. Höhere Abwassertemperaturen bedeuten außerdem eine geringere Löslichkeit von Sauerstoff und Wiederbelüftung des Abwassers. Durch einen hohen Gehalt an organischen Stoffen, ergibt sich auch ein hoher Sauerstoffbedarf der Mikroorganismen, der wiederum zu einem raschen Verbrauch des vorhandenen

Sauerstoffs führt. Sehr stark verschmutztes Abwasser enthält meist auch viele Stoffe, die an der Oberfläche des Wassers schwimmen, sogenannte oberflächenaktive Stoffe. Diese Stoffe können eine Oberflächenbelüftung stark einschränken (Thistlethwayte, 1972).

Zudem beeinflussen ungünstige Abflussverhältnisse und geringe Fließgeschwindigkeiten die Bildung von Schwefelwasserstoff. Durch lange Fließstrecken, geringes Gefälle oder Hindernisse im Kanal werden die Fäulnisprozesse, das Sielhautwachstum und die Bildung von Ablagerungen auf der Sohle begünstigt (Thistlethwayte, 1972). Bei geringen Fließgeschwindigkeiten findet nur eine unzureichende Sauerstoffaufnahme, die sonst durch Turbulenzen an der Oberfläche der fließenden Abwässer begünstigt wird, statt. Ist der Sauerstoffverbrauch größer als die Sauerstoffaufnahme, kommt es zu anaeroben Verhältnissen.

Ein weiterer Einflussfaktor ist der pH-Wert. Je niedriger der pH-Wert ist, umso größer ist der Anteil des molekularen Schwefelwasserstoffs (Bild 3.7). Bis zu einem pH-Wert von 5 liegt Schwefelwasserstoff überwiegend als gelöstes Gas vor. Bei pH-Werten von 5-9 geht Schwefelwasserstoffgas in Hydrogensulfid (HS^-) über, während es bei einem pH-Wert von 7 jeweils zur Hälfte als H_2S und HS^- -Ion vorhanden. Nur bei sehr hohen pH-Werten liegt Schwefelwasserstoff vorwiegend als Sulfid-Ion vor (Matsché und Saracevic, 2007).

Auch die Einleitung von Sulfiden aus der Industrie und hohe Sulfatgehalte beeinflussen höhere Konzentrationen von Schwefelwasserstoff im Abwasser. Je höher der Sulfatgehalt, umso höher ist auch die zu erwartende Sulfidkonzentration (Thistlethwayte, 1972). Hinzu kommt noch der Einfluss der Sielhaut und ggf. der Ablagerungen. Je besser die Sielhaut ausgebildet ist und je mehr aktive Stellen sich in ihr befinden, desto mehr Fläche ist vorhanden, um Sulfide zu bilden.

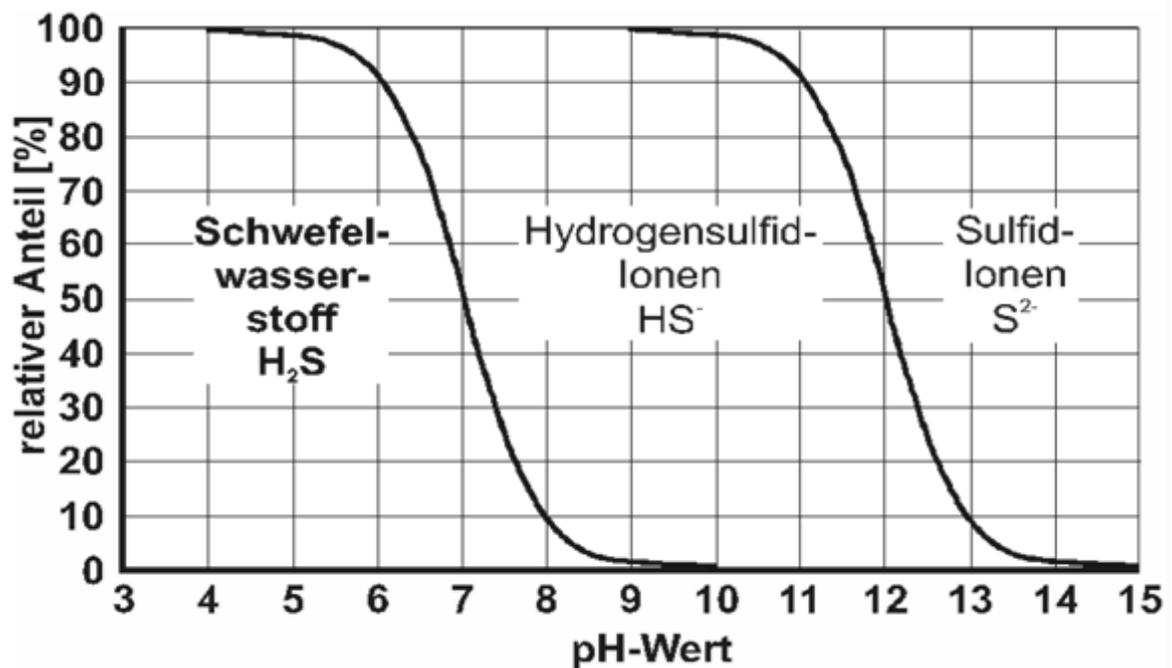


Bild 3.7: Einfluss des pH-Wertes auf das Dissoziationsgleichgewicht von Schwefelwasserstoff bei 20°C (Lohse, 1986)

3.6.3 Korrosionswirkung von Schwefelwasserstoff

Die meisten Sulfide werden in den Bereichen der Sielhaut und den Kanalablagerungen gebildet, da vor allem dort die für die Schwefelwasserstoffbildung verantwortlichen Bakterien vorkommen. Von dort diffundiert der Schwefelwasserstoff in das Abwasser.

Im Abwasser gelöst, bedeutet H₂S keine Gefahr für die Bausubstanz der Kanalisation. Kommt es jedoch zur Emission des Schwefelwasserstoffs aus dem Abwasser in die Kanalatmosphäre, lagert er sich an den feuchten Kanalwandungen an und es kann durch die Oxidation von Schwefelwasserstoff über Schwefel zu Schwefelsäure zu biogener Schwefelsäurekorrosion kommen (Bild 3.8).

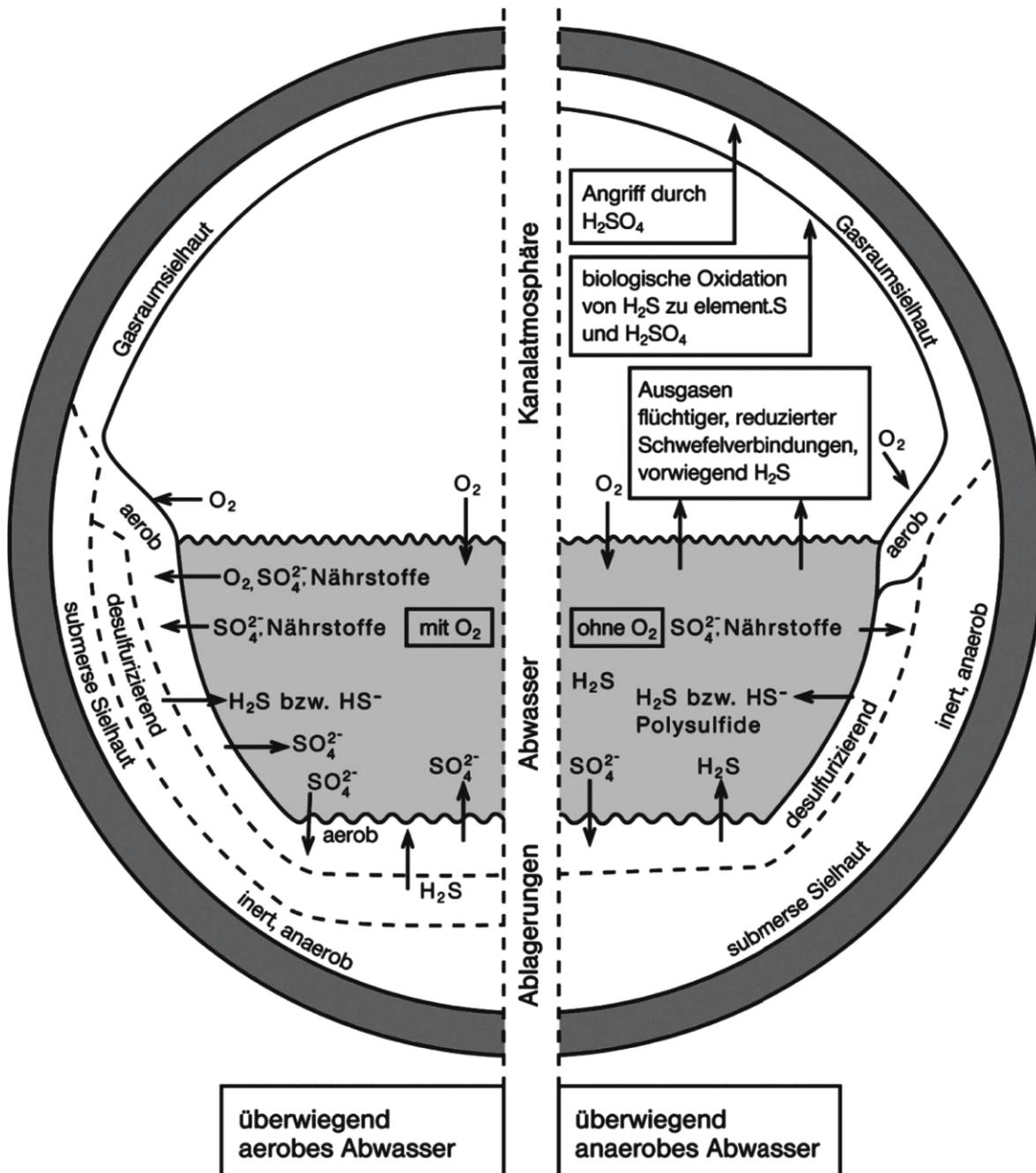


Bild 3.8: Stoffumsatz in Abwasserkanälen (DWA, 2010)

Der Austrag von Schwefelwasserstoff aus dem Abwasser wird verstärkt, wenn nach anaeroben Verhältnissen wieder hohe Fließgeschwindigkeiten oder plötzliche Turbulenzen durch Abstürze oder Ähnliches auftreten. Die Emissionsrate wird dabei durch den Gehalt molekularen Schwefelwasserstoffs im Abwasser bestimmt. Relativ zur Abwassergeschwindigkeit höhere Geschwindigkeiten des Luftstroms und Turbulenzen im Luftraum oberhalb des Abwasserspiegels begünstigen einen Austrag von Schwefelwasserstoff. Zudem ist der Austrag umso höher, je

sauberer die Oberfläche des Abwassers in Bezug auf Ölfilme oder oberflächenflächenaktive Stoffe ist (Thistlethwayte, 1972).

Der Übergang von Schwefelwasserstoff aus der Kanalatmosphäre an die Oberfläche der Bauteile oberhalb des Abwasserspiegels wird bestimmt durch die Schwefelwasserstoffkonzentration in der Luft. Je höher der pH-Wert der feuchten Kanalwand ist, desto mehr Gas wird lösbar und desto stärker wird der Übergang gefördert. Zusätzlich begünstigen höhere Belüftungsgeschwindigkeiten, zunehmende äquivalente Sandrauheit oder bauliche Besonderheiten die Übergangsrate (Thistlethwayte, 1972).

Die für die Oxidation benötigten Mikroorganismen nennt man Thiobacillen. Thiobacillen sind etwa 0,001 mm groß und können überall auftreten. Sie zeichnen sich durch eine ausgesprochene Säureresistenz aus. Für ihr Wachstum nutzen die Thiobacillen elementaren Schwefel oder reduzierte, anorganische Schwefelverbindungen als Energiequelle und CO_2 oder zusätzlich einfache organische Verbindungen wie Glutaminsäure als Kohlenstoffquelle (Bielecki und Schremmer, 1987).

Die Entwicklung der Organismen beginnt bei pH-Werten unterhalb von etwa 6,5. Es gibt jedoch auch Arten, die sich bereits bei einem pH-Wert von 5-8 entwickeln, deren Oxidation in der Regel langsamer abläuft (Bielecki und Schremmer, 1987).

Frischer Beton hat einen pH-Wert von 11-12. Damit die Sulfurikanten dort wachsen können, muss also erst eine Absenkung des pH-Wertes auf der Oberfläche des Betons stattfinden. Dies erfolgt durch Carbonatisierung und die Aktivitäten anderer Bakteriangattungen (ATV, 1996). Die Carbonatisierung beschreibt die Reaktion von CO_2 aus der Luft mit Bestandteilen des Zementsteins im Beton, die zur Folge hat, dass der pH-Wert absinkt.

Feuchtigkeit ist für die Thiobacillen lebensnotwendig, daher siedeln sie sich im Kondenswasser der Kanalwandungen an. Das Kondenswasser entsteht, weil die Temperatur an der Kanalwandung durch den Einfluss vom umgebenden Erdreich geringer ist als die Temperatur über dem Abwasser. Der Taupunkt wird überschritten und das zuvor gasförmige Wasser setzt sich als Niederschlag an der Wand ab. Die Abwassertemperatur beeinflusst hierbei die Temperatur der Kanalatmosphäre. Neben dem Kondenswasser können mögliche Gründe für die Feuchte der Wände noch Grundwasserinfiltration, zufällige Benetzung durch Abwasser sowie in den Wänden aufsteigende Kapillarfeuchtigkeit sein. Die Luftfeuchtigkeit im Kanal beträgt in der Regel 90 ± 10 %. Die an der Kanalwandung chemisch zu elementarem Schwefel aufoxidierten flüchtigen Schwefelverbindungen werden von den

Thiobacillen unter aeroben Bedingungen zu Schwefelsäure oxidiert. Die Schwefelsäure zersetzt schließlich den Zementstein des Betons. Sie reagiert dabei nicht nur mit dem darin enthaltenen Kalk, sondern auch mit Aluminium-, Eisen- und Magnesiumverbindungen unter Bildung wasserlöslicher Produkte (Sulfate). (Bielecki und Schremmer, 1987)

Schwefelwasserstoff ist bei dieser Form der Korrosion also nicht direkt korrosiv. Von der Korrosion betroffene Flächen befinden sich nur oberhalb des Wasserspiegels. Sie sind aufgrund von Schwefelablagerungen charakteristisch gelb-weiß gefärbt, porös und bei Mischwasserkanälen durch Regenereignisse oftmals ausgewaschen. Der pH-Wert kann auf unter 5 (bis 1) absinken. (Matsché und Saracevic, 2007)

Bei der Beurteilung der biogenen Schwefelsäurekorrosion unterscheidet man drei Entstehungsformen:

- Die autogene Form steht für einen Kanalabschnitt, der selbst die Voraussetzungen für die Schwefelwasserstoffbildung erfüllt und somit allein Ursache der biologischen Prozesse ist.
- Die allogene Form beschreibt einen Kanalabschnitt, der selbst nicht die Bedingungen zum Entstehen von H_2S auf anaerobem Wege vorweist. In diesem Fall wird Abwasser eingeleitet, welches Schwefelwasserstoff enthält, der an anderer Stelle des gleichen Kanalsystems entstanden ist, und im betreffenden Kanalabschnitt zur Korrosion führt.
- Wird Abwasser eingeleitet, das H_2S enthält, welches außerhalb des Kanalsystems entstanden ist, spricht man von der exogenen Form.

Besonders durch die biogene Schwefelsäurekorrosion gefährdet sind Kanalstrecken, die einen Übergang von anaeroben zu aeroben Verhältnissen beinhalten. Dies gilt zum Beispiel für die Ausmündung von Druckleitungen.

4 Betrieblicher Stand des Wissens

Die nachfolgenden Ausführungen orientieren sich an den Darstellungen in Orth et al. (2008), Bosseler und Schlüter (2004), Schlüter (2004), Ulutas (2007) und Beck (2007) und wurden teilweise diesen entnommen.

4.1 Grundlagen der Kanalreinigung

Nach Stein (1999) ist die Reinigung von Kanalisationen ein wesentlicher Bestandteil der Wartung. Sie wird durchgeführt:

- zur Beseitigung von Ablagerungen im Rahmen der regelmäßigen Wartung, um den freien Durchgang im gesamten Abflussquerschnitt zu erhalten, Geruchs- und Gasbildung durch Faulprozesse und die Entstehung biogener Schwefelsäurekorrosion zu verhindern,
- zur Beseitigung von Verstopfungen,
- als vorbereitende Maßnahme für eine Kanalinspektion.

Die Planung der Durchführung der Kanalreinigungsmaßnahmen obliegt den einzelnen Kommunen. Deren Ziel sollte es stets sein, durch die Wahrnehmung der Reinigungsaufgaben eine ständige Betriebsfähigkeit der Kanalisation und eine möglichst gute Substanzerhaltung zwecks hoher Nutzungsdauer zu gewährleisten. Dies ist erforderlich, um die Anforderungen an einen hinsichtlich Zeit- und Kostenaufwand effizienten Kanalbetrieb unter Berücksichtigung der geltenden rechtlichen und technischen Regelwerke zur Erreichung der Umweltschutzziele zu erfüllen.

4.1.1 Strategien der Kanalreinigung

Die Strategien, die in den Kommunen zum Einsatz kommen, lassen sich grob in drei Kategorien unterteilen, die sich hinsichtlich der Kosten bzw. der Sicherstellung der Betriebsfähigkeit unterscheiden.

Auf den ersten Blick ist die sog. Feuerwehrstrategie, bei der nur in Störfällen eingeschritten wird, die günstigste Variante. Hier wird auf regelmäßige Inspektion und Wartung verzichtet, der Bedarf einer Reinigung ist definiert über das Auftreten von Verstopfungen oder anderen Störungen bei der Abwasserableitung. Da derartige Störfälle nicht selten Belastungen für Gewässer (Trockenwetterentlastung) oder Unannehmlichkeiten für Bürger (Überstau) zur Folge haben, ist von dieser Strategie, auch unter Berücksichtigung der Vorgaben der SÜwV Kan, abzuraten.

Einen deutlich höheren Entwässerungskomfort bietet die Präventivstrategie, bei der das Kanalnetz in festen Intervallen komplett gereinigt wird. Sind diese Intervalle

le hinreichend klein gewählt, sind Einschränkungen der Funktionsfähigkeit aufgrund von Ablagerungen nahezu ausgeschlossen. Der große mit dieser Strategie verbundene Aufwand resultiert jedoch in sehr hohen Kosten für den Netzbetreiber.

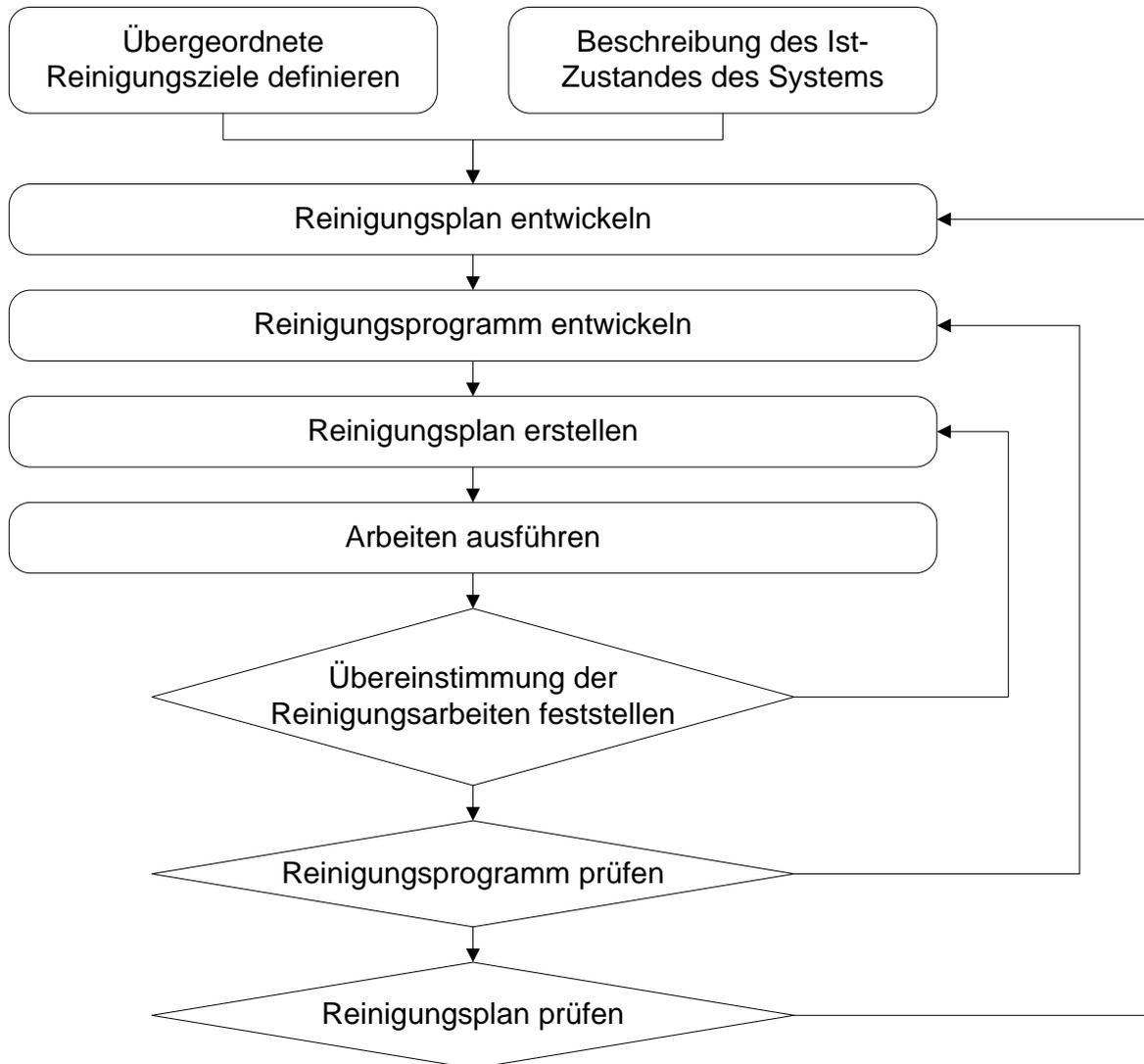


Bild 4.1: Beispiel einer Reinigungsstrategie (nach DIN 14654-1, 2005)

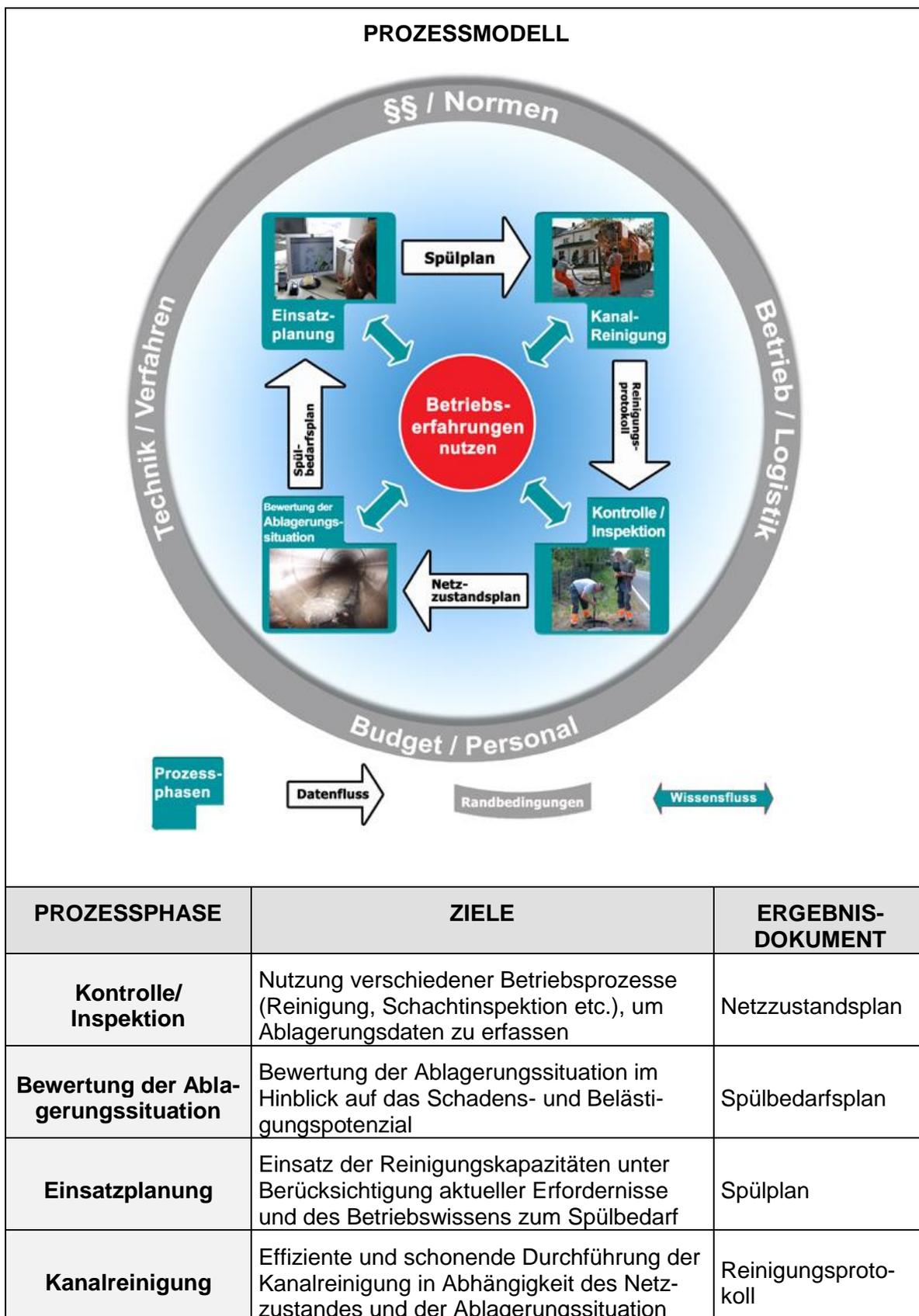


Bild 4.2: Prozessmodell für bedarfsorientierte Kanalreinigungsstrategien, erstellt vom Institut für Unterirdische Infrastruktur (Orth et al., 2008)

Die Vorteile der Feuerwehrstrategie (geringer Aufwand) und der Präventivstrategie (hoher Entwässerungskomfort) sind unter optimalen Bedingungen vereinigt in der Inspektionsstrategie, auch als bedarfsorientierte Reinigungsstrategie bezeichnet. Im Gegensatz zur Feuerwehrstrategie wird der Bedarf bei der Inspektionsstrategie nicht über einen Störfall, sondern über einen kritischen Ablagerungszustand, der eine Kanalreinigung notwendig macht, definiert. Die Reinigungsintervalle für die Haltungen werden differenziert nach ihrer jeweiligen Ablagerungscharakteristik festgelegt. Schneller verschmutzende Haltungen werden häufiger als langsamer verschmutzende gereinigt. Voraussetzung für die Einteilung der Intervalle ist die Kenntnis über das Ablagerungsverhalten, welches anfänglich aus Erfahrungen des Reinigungspersonals ermittelt und dann kontinuierlich durch regelmäßige Inspektionen überprüft werden kann. Die Inspektionen sollten in Anlehnung an die SÜwV Kan mindestens alle 2 Jahre erfolgen. Aufgrund der in der Regel gegenüber der Präventivstrategie deutlich kürzeren Einsatzzeiten der Reinigungsfahrzeuge, ist diese Strategie wesentlich kostengünstiger, auch wenn das Erstellen eines bedarfsorientierten Reinigungsplans mit großem Aufwand verbunden ist und mit den regelmäßigen Inspektionen zusätzliche Arbeit auf die Netzbetreiber zukommt.

Um eine Reinigungsstrategie nach eigenen Vorstellungen zu entwickeln, muss man zunächst die Zielgrößen definieren und auf Grundlage des Ist-Zustandes des Netzes Reinigungsplan und -programm erstellen. Die ständige Überprüfung des Reinigungserfolgs und -bedarfs sowie der Vergleich mit den Zielvorgaben führen zu einer fortlaufenden Anpassung und Optimierung des Reinigungsplans (Bild 4.1). Ein Prozessmodell für bedarfsorientierte Reinigungsstrategien, in dem sich diese Bausteine in etwas abgewandelter Form wiederfinden lassen, zeigt Bild 4.2.

4.1.2 Reinigungsverfahren

Seit der Verbreitung moderner Entwässerungssysteme Mitte des 19. Jahrhunderts wurden zahlreiche Verfahren entwickelt, um Kanäle von Ablagerungen zu befreien. Dettmar (2005) hat die in der heutigen Praxis wichtigsten Verfahren der Kanalreinigung übersichtlich zusammengestellt (Tabelle 4.1).

Tabelle 4.1: Verfahren der Kanalreinigung und Ihre Einsatzbereiche (Dettmar, 2005)

	Verfahren	Einsatzbereich		
		Durchmesser/Art des Kanals	Art der Ablagerung, Verschmutzung, Reinigungsaufgabe	PR
Spülverfahren	Hochdruckspülverfahren, HD-Reinigung	≤ DN 2000	überwiegend nicht verfestigte Ablagerungen	•••
	Schwallspülung	alle DN	nicht verfestigte Ablagerungen	••
	Stauspülung	≥ DN 800	nicht verfestigte Ablagerungen	••
mechanische Reinigungsverfahren/Reinigungsgeräte	Manuelle Reinigung mit Hilfsmitteln	≥ DN 1200	ergänzend zur HD-Reinigung, Sondereinsätze	••
	Windenreinigung	≤ DN 2000	verfestigte und nicht verfestigte Ablagerungen	••
	Sielwolf, Kanaljumbo	> DN 2000	verfestigte Ablagerungen	••
	Bohr-, Fräs-, Schneid-, und Schlaggeräte	≤ DN 800	verfestigte Ablagerungen, Hindernis, Wurzel- einwuchs	••
	Molch	Dückerleitung, Pumpdruckleitung	nicht verfestigte Ablagerungen	••
sonstige Reinigungs- verfahren	Strömungserzeuger	≥ DN 1200	nicht verfestigte Ablagerungen	•
	physikalische Reinigung	Dückerleitung, Pumpdruckleitung	nicht verfestigte Ablagerungen	•
	biologische Reinigung	alle DN	Sondereinsätze	•
	chemische Reinigung	≤ DN 1000	Sondereinsätze (z. B Wurzeleinwuchs, Inkrustation)	•
*) Praxisrelevanz (PR): ••• hoch, •• mittelmäßig - gering, • gering - keine				

4.1.2.1 Hochdruckspülverfahren

Das Hochdruckspülverfahren hat seinen Ursprung im sogenannten Duisburger Verfahren, bei dem im Jahr 1959 erstmals nicht wie bisher nur durch Entnahme aus einem Hydranten Wasser in den Kanal gespritzt wurde, sondern zusätzlich über eine motorbetriebene Hochdruckpumpe (vgl. Dettmar, 2005). Seitdem wurde das Verfahren kontinuierlich weiterentwickelt. Heute wird ein Schlauch aus Gummi oder Kunststoff, an dessen Ende ein Düsenkopf installiert ist, in die zu reinigende

Kanalhaltung „eingespült“. Dies funktioniert dadurch, dass das mit großem Druck (Maximalleistung der Hochdruckaggregate bis zu 180 bar) geförderte Wasser im Düsenkopf in Gegenrichtung umgelenkt wird und somit einen Vortrieb der Düse bewirkt. Ist die Düse weit genug in den Kanal (in der Regel beträgt die Spüllänge eine Haltung) eingefahren, beginnt der Rückzug des HD-Schlauchs und damit der eigentliche Reinigungsvorgang. Die aus den Bohröffnungen im Düsenkopf austretenden Wasserstrahlen treffen gebündelt axial und/oder radial auf die Rohrwandung auf und lösen dabei vorhandene Ablagerungen. Die infolge der austretenden Wasserstrahlen erhöhte Fließgeschwindigkeit des Abwassers ermöglicht den Transport der gelösten Feststoffe.

Beim Hochdruckspülverfahren bedient man sich heutzutage unterschiedlicher Spezialfahrzeuge. Reine Hochdruckspülfahrzeuge sind ausgerüstet mit einer leistungsstarken Pumpe und werden eingesetzt, wenn nicht verfestigte Ablagerungen gelöst und abgeschwemmt werden müssen. Da zum Teil erhebliche Räumgut-mengen anfallen und es nicht immer möglich ist, diese durch die Spülung bis zur Kläranlage zu transportieren, werden häufig in Kombination mit den Hochdruckspülfahrzeugen Saugfahrzeuge eingesetzt. Diese dienen dazu, das durch die Hochdruckreinigung aus den Haltungen in die Schächte transportierte Räumgut zu entnehmen. Den Stand der Technik in der Kanalreinigung stellen sogenannte kombinierte Saug- und Spülfahrzeuge dar, die die Fähigkeiten der Hochdruckspülfahrzeuge und der Saugfahrzeuge miteinander verbinden (Bild 4.3). Besonders vorteilhaft ist die Ausführung der kombinierten Saug- und Spülfahrzeuge mit Wasserrückgewinnung. Diese Fahrzeuge können aus dem angesaugten Material Wasser für Spülzwecke zurückgewinnen und haben deutlich höhere Tagesleistungen, da das Auffüllen des Wassertanks im Idealfall entfällt.

Fortschritte bei der Hochdruckspülung wurden nicht nur bei der Pumpen- und Fahrzeugtechnik, sondern auch in der Entwicklung der Reinigungsdüsen erzielt. Es gibt an die unterschiedlichen Reinigungsaufgaben angepasste Düsen, teilweise sogar mit TV-Kameras mit Funkübertragung, um den Reinigungserfolg unmittelbar überprüfen zu können (Bild 4.4).

Die große Flexibilität, auch hinsichtlich der Einsetzbarkeit in Querschnitten bis zu 2000 mm Durchmesser, führte dazu, dass das Hochdruckspülverfahren mittlerweile bei mehr als 90 % aller Kanalreinigungsmaßnahmen sowohl zur Beseitigung von Ablagerungen im Rahmen der regelmäßigen Wartung als auch für die Reinigung als vorbereitende Maßnahme einer Kanalinspektion oder -sanierung eingesetzt wird (Bosseler und Schlüter, 2004).

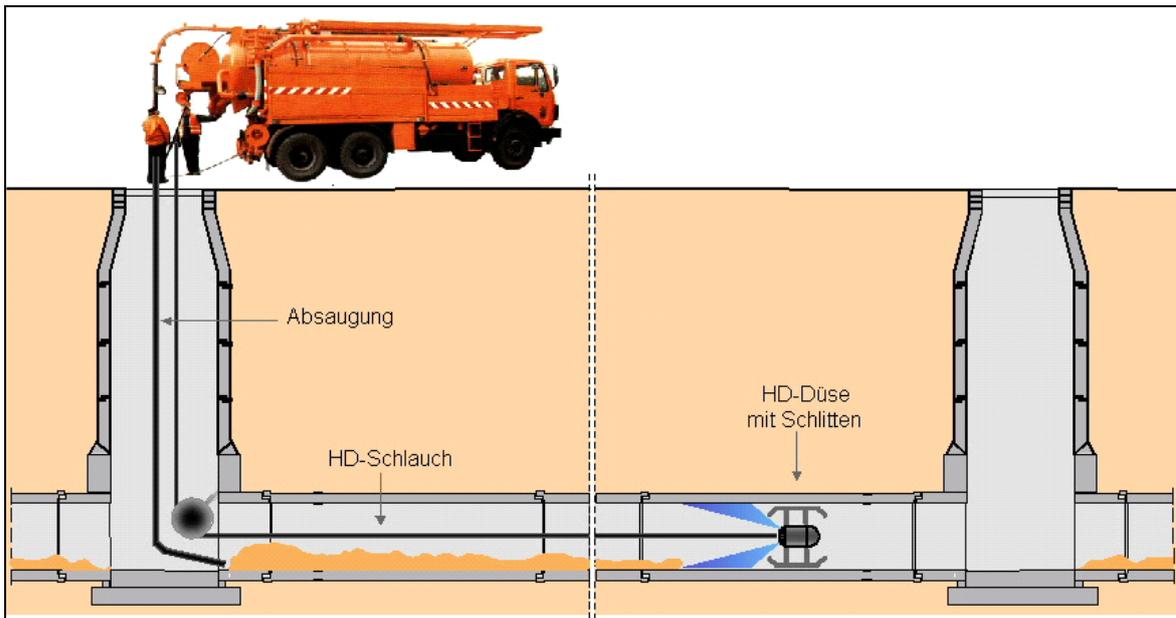


Bild 4.3: Schematische Darstellung der Hochdruckspülung mit einem kombinierten Saug- und Spülfahrzeug (Schlüter, 2005)

a) Rundumstrahlende Düse



b) Rotationsdüse



c) Sohlenreiniger



d) Sehende Düse



Bild 4.4: Darstellung verschiedener Düsenköpfe (KEG Kanalreinigungstechnik GmbH, 2010)

Die Reinigungsleistung des Hochdruckverfahrens hängt von mehreren Parametern ab. So sollte man Düsentyp, Spülwassermenge, Spüldruck und Rückzugsgeschwindigkeit in Abhängigkeit von Reinigungsaufgabe und Verschmutzungszustand auswählen. Gilt es bspw. Ablagerungen oder Sielhaut zu lösen, bieten sich Düsen mit größerem Strahlwinkel (z. B. 30°) sowie hohe Drücke (etwa 150 bar) an, um einen möglichst großen Effekt des Wassers an der Rohrwandung zu erzielen. Der Strahlwinkel wird gemessen zwischen Wasserstrahl und Rohrachse und beeinflusst Reinigungs- und Vortriebsleistung der Düse. Große Strahlwinkel erzeugen einen geringeren Vortrieb, haben aber eine größere Reinigungsleistung, da die Wasserstrahlen einen größeren Impuls auf die Kanalwandung bzw. die Ablagerungen übertragen. Dabei ist jedoch stets der Zustand der Rohrleitung zu beachten, um Schäden durch zu hohe Drücke zu vermeiden. Steht der Abtransport lockerer Sedimente im Vordergrund, bieten sich flache Strahlwinkel (< 20°) und/oder große Spülwassermengen an. Durchschnittliche Spülwassermengen liegen für Rohrdurchmesser DN 300 bis DN 800 etwa bei 320 L/min, bei Rohrdurchmessern bis DN 250 sind es maximal 240 L/min (Oberfinanzdirektion Niedersachsen - Bau und Liegenschaften, 2009).

Für einen guten Reinigungserfolg sollte die Rückzugsgeschwindigkeit an den Verschmutzungsgrad angepasst werden. Untersuchungen zeigen, dass gerade bei großen Ablagerungshöhen die Zahl der erforderlichen Reinigungszyklen mit der Erhöhung der Rückzugsgeschwindigkeit stark ansteigt (Schlüter, 2005). Dies lässt sich unter anderem darauf zurückführen, dass die Transportkapazität nicht mehr ausreicht, um die Feststoffe bis zum nächsten Schacht zu transportieren, und somit die Feststoffe zu Dünen aufgeschoben und schließlich von der Düse überfahren werden.

Die maximal erreichbare Tagesleistung ist beim Hochdruckspülverfahren stark von ortsspezifischen Randbedingungen abhängig. Als grober Richtwert kann für eine mittlere Reinigungsleistung bei Fahrzeugen mit Wasseraufbereitung und geringem Personaleinsatz (2 Personen) im Rahmen der periodischen Unterhaltungsreinigung bis DN 300 und einem Verschmutzungsgrad bis max. 15 % von etwa 1000 m pro Tag ausgegangen werden (Oberfinanzdirektion Niedersachsen - Bau und Liegenschaften, 2009).

4.1.2.2 Schwallspülverfahren

Das Prinzip der Schwallspülung ist wahrscheinlich das älteste Verfahren zur Kanalreinigung und geht auf Marcus Vipsanius Agrippa (63-12 v. Chr.) zurück, der veranlasste, die römische Cloaca Maxima durch Einleitungen aus den Aquädukten

zu spülen. Um regelmäßige Spülwellen zu erzeugen, wurden sogar eigens zu diesem Zweck Speicherbauwerke errichtet (Bertrand-Krajewski, 2003). Das Schwallspülverfahren basiert darauf, durch das Freisetzen einer großen Menge Wasser innerhalb einer kurzen Zeitspanne einen Spüleffekt zu erzielen. Der kurzzeitige hohe Abfluss bewirkt durch die erhöhte Fließgeschwindigkeit das Ablösen von Sedimenten (vgl. Bertrand-Krajewski et al., 2003). Somit verlagert sich der Schwerpunkt der Ablagerungen in linearer Abhängigkeit zur Anzahl der Schwallspülungen kanalabwärts (Bertrand-Krajewski et al., 2006).

Obwohl die Erzeugung von Spülwellen zur Ablagerungsbeseitigung ein sehr altes Prinzip ist, wurde in den vergangenen Jahren intensiv an seiner Optimierung geforscht (bspw. durch Campisano et al., 2004; Campisano et al., 2006; Campisano et al., 2009; Dettmar und Staufer, 2005; Ristenpart, 1998; Williams et al., 2009; Goormans et al., 2009; Staufer et al., 2007). Während die Einrichtungen zur Schwallspülung in der Anfangszeit der Kanalisation wenig effizient und mit großem Arbeitsaufwand verbunden waren, hat sich die Situation in den vergangenen Jahren grundlegend geändert. Heute gibt es eine Reihe von neuen und weiterentwickelten Verfahren, die eine wirtschaftliche Kanalreinigung ermöglichen. Gerade in Gebieten, in denen die zur theoretischen Selbstreinigung erforderlichen Sohlgefälle nicht eingehalten werden können, können Schwallspüleinrichtungen eine sinnvolle Lösung darstellen (Shirazi et al., 2008). Die Spüleinrichtungen lassen sich hinsichtlich ihrer Einsetzbarkeit für die Kanalreinigung und Kanalnetzbewirtschaftung in drei Gruppen einteilen (Tabelle 4.2).

Tabelle 4.2: Schwallspüleinrichtungen, nach Einsatzmöglichkeiten klassifiziert (nach Dettmar et al., 2001)

	Gruppe 1	Gruppe 2	Gruppe 3
Spüleinrichtung	Drehbogen, versenkbares Wehr, Schlauchwehr	Spülklappe, Spülkippe, Spülkammer, Spülsack	Schieber, Spülheber, Spülschacht, Spülkippe
Haupteinsatzbereich	Kanalnetzbewirtschaftung	Kanalreinigung	Kanalreinigung
Nebeneinsatzbereich	Kanalreinigung	Kanalnetzbewirtschaftung	-

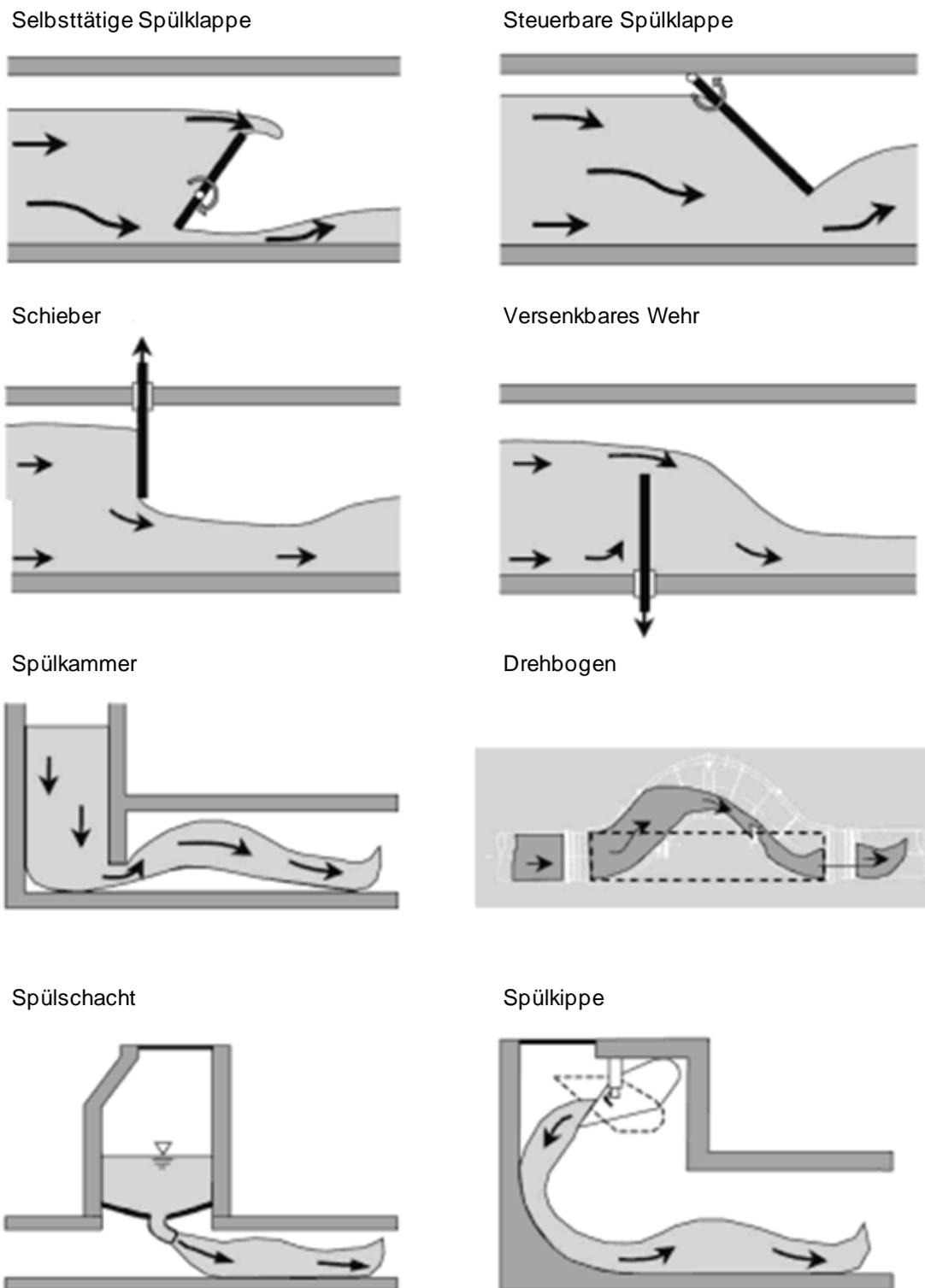


Bild 4.5: Schwallspüleinrichtungen (Dettmar et al., 2001)

Nach Dettmar et al. (2001) gehören Drehbogen, versenkbares Wehr und Schlauchwehr zu den bautechnisch großen Schwallspüleinrichtungen, die jedoch

vorwiegend zur Kanalnetzbewirtschaftung eingesetzt werden. Schieber und Spülklappen, die sowohl selbsttätig als auch hydraulisch oder pneumatisch betrieben ausgeführt werden können, werden gleichermaßen zur Abflusssteuerung als auch für die Kanalreinigung verwendet. Spülschächte, Spülheber und Spülkippen (in Schächten) kommen als vergleichsweise kleine Schwallspüleinrichtungen hauptsächlich bei der Reinigung von Anfangshaltungen oder zur Verschmutzung neigender Kanalabschnitte zum Einsatz. Die Funktionsweisen der verschiedenen Methoden sind in Bild 4.5 skizziert.

Die Reinigungsleistung von Schwallspüleinrichtungen hängt stets von der vorliegenden Situation und der Zielstellung ab. In Abhängigkeit vom Spülvolumen, der Höhe des angestauten Wassers, des Gefälles und des Durchmessers des Kanals ist es möglich, Kanalabschnitte von mehreren hundert Metern zu reinigen (Stauer et al., 2007). Ob und wie eine Schwallspülung umgesetzt wird, ist von dem Kanalvolumen abhängig, welches zum Anstau des Abwassers zur Verfügung steht. Zudem muss der Trockenwetterabfluss groß genug für vertretbare Spülintervalle sein. Wenn der Trockenwetterabfluss zu gering ist, müssen die Spüleinrichtungen mit Regenwasser betrieben werden. Um eine Ablagerungsbildung oberhalb der Spüleinrichtung zu vermeiden, sollte die Stauwurzel in einen Bereich gelegt werden, an dem das Gefälle hoch genug ist. Ein Aspekt, der bei der Planung von Schwallspülungen unbedingt Berücksichtigung finden sollte, ist, dass der Kanalabschnitt unterhalb der Spüleinrichtung nur langsam leer läuft. Die entstehende Schwallwelle läuft in das Wasserpolster des ablaufenden Trockenwetterabflusses und kann daher nicht ihre volle Reinigungswirkung entfalten (Bild 4.6).

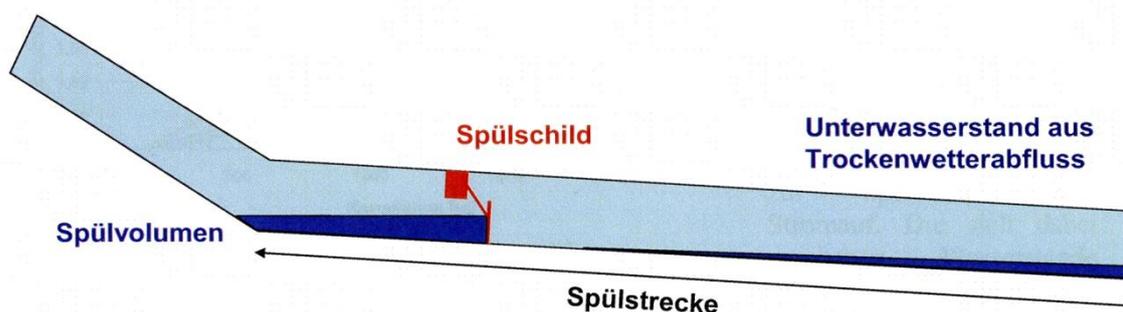


Bild 4.6: Querschnitt Kanalspülung in Hauptsammler (Schaffner, 2010)

4.1.2.3 Sonstige Reinigungsverfahren

Bei den zusätzlich zur Hochdruckreinigung und Schwallspülung in der Tabelle 4.1 dargestellten Reinigungsverfahren handelt es sich hauptsächlich um Verfahren,

die nur in Ausnahmesituationen zum Einsatz kommen. So dienen mechanische Verfahren, wie bspw. Bohr-, Fräs-, Schneid- und Schlaggeräte, in der Regel der Beseitigung von Hindernissen, Wurzelwerk oder Verfestigungen, die sich durch die Hochdruckreinigung nicht lösen lassen. Allen übrigen Verfahren, wie der Stauspülung oder Strömungserzeugern, kommt in der Praxis, ebenso wie biologischen oder chemischen Reinigungsverfahren, bei der Reinigung der hier im Mittelpunkt der Betrachtung stehenden Mischwasserkanäle nur eine geringe Bedeutung zu.

Wenn in diesem Bericht der Begriff der Kanalreinigung verwendet wird, so bezieht er sich in der Regel auf die Hochdruckreinigung.

4.2 Werkzeuge für die Kanalreinigung

4.2.1 Inspektionsmethoden

Die Wahl der eingesetzten Methode ist abhängig von der Zielstellung der Inspektion. In der Regel sind Schäden zu dokumentieren, um einen Sanierungsplan erstellen zu können. Bei der Erkennung von Ablagerungen bieten sich folgende Inspektionstechniken an:

- TV-Inspektion mittels Fahrwagenkamera,
- Schachtkamera,
- Kanalspiegel,
- Inaugenscheinnahme des Schachtgerinnes,
- Begehung,
- Sehende Düse.

Die oben genannten Inspektionstechniken werden nachfolgend detaillierter beschrieben.

4.2.1.1 TV-Inspektion mittels Fahrwagenkamera

Der Einsatz eines TV-Inspektionsskammerawagens wird im Regelfall nach einer Kanalreinigung eingesetzt. In der SÜwV Kan NRW wird gefordert, dass innerhalb von 15 Jahren das komplette Kanalnetz nach der Reinigung mit einer TV-Fahrwagenkamera befahren wird und der Zustand der Rohre auf etwaige Schäden überprüft wird. In seltenen Fällen wird eine TV-Fahrwagenkamera auch vor der Kanalreinigung eingesetzt, um Haltungen und Schächte auf mögliche Ablagerungen zu kontrollieren. Bild 4.7 verdeutlicht die Funktionsweise eines TV-Inspektionsskammerawagens.

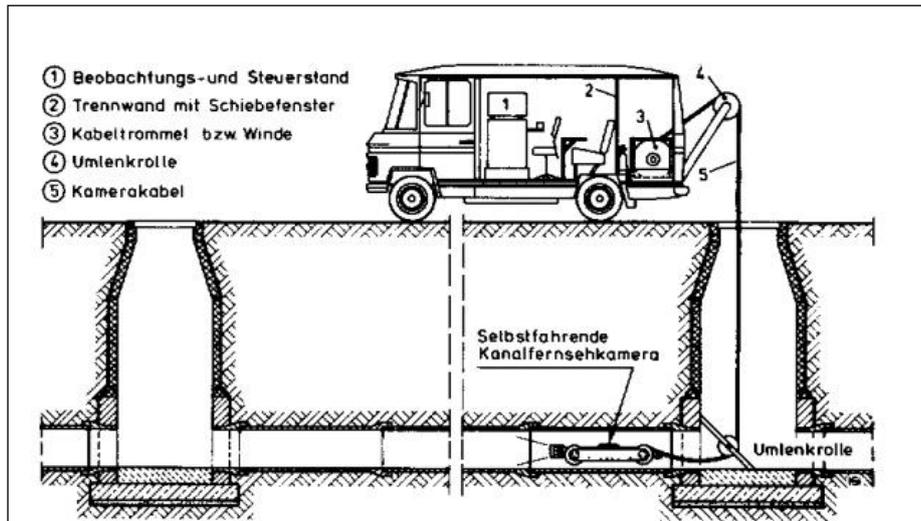


Bild 4.7: Darstellung der TV-Inspektion (Stein, 1999)

Die TV-Fahrwagenkamera ist mit einem Kabel an einen Messwagen angeschlossen. Der TV-Wagen wird über den Schacht in die Haltung eingelassen und fährt funkgesteuert durch die Haltung. Das ankommende Signal wird am Messwagen empfangen und aufgezeichnet (BMVBS, 2011).

Bild 4.8 zeigt eine mögliche Ausführungsvariante der TV-Fahrwagenkamera.



Bild 4.8: TV-Inspektionskamerawagen (IBAK GmbH, 2011)

Mit Einsatz der TV-Inspektion mittels Fahrwagenkamera können Tagesleistungen für die Zustandserfassung und Erhebung der Ablagerungsdaten von bis zu 1.000 m/d erreicht werden (Orth et al., 2008).

4.2.1.2 Schachtkamera

Die Schachtkamera ist eine Farb-TV-Anlage zur Zustandskontrolle von Schächten und Bauwerken. An einer Teleskopstange ist eine zoomfähige Digitalkamera angebracht. Diese Vorrichtung wird auf den Schachtboden gestellt und über den Abstandshalter so eingestellt, dass die Kamera sich auf halber Höhe des Durchmessers der Haltung befindet. Die Kamera zoomt in die Haltung, wobei die Haltung über Spots ausgeleuchtet wird, die an der Kamera befestigt sind. Ein Schachtein-

stieg ist nicht notwendig. Über einen angeschlossenen Monitor können Videoclips gedreht werden, die sofort vor Ort zu sehen sind, aber auch für spätere Auswertungen genutzt werden können. Erfahrungswerte zeigen, dass Sichtweiten von 20 m bis hin zu 80 m möglich sind. Der Anschaffungspreis beträgt ca. 10.000 € bis 15.000 €, je nach Ausstattungsvariante (Volprecht, 2006).

Derzeit sind zwei Modelle auf dem Markt erhältlich, die auch zur regelmäßigen Erfassung von Ablagerungen geeignet sind (Bild 4.9 und Bild 4.10).

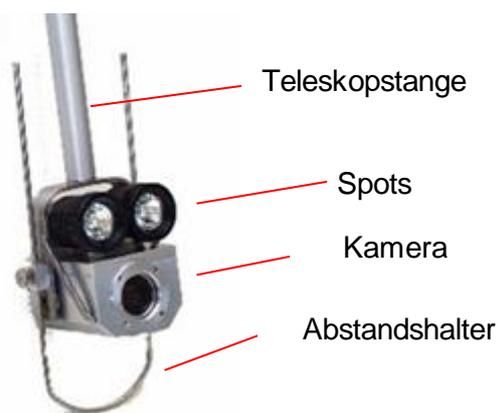


Bild 4.9: Schachtkamera Hersteller Ritec (Ritec GmbH, 2011)

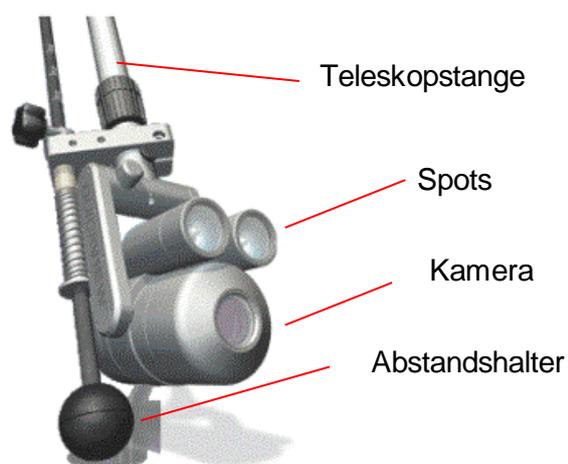


Bild 4.10: Schachtkamera Hersteller EnviroSight (EnviroSight, 2011)

Praxiserfahrungen zeigen, dass Tagesleistungen von 40-80 Kanalhaltungen/d, entsprechend etwa 1500-3000 m Kanalstrecke, erreicht werden können (einschließlich Reinigung der Schmutzfänger). Die Tagesleistungen sind insbesondere abhängig von der örtlichen Verkehrssituation und der Einarbeitung der Mitarbeiter in die Gerätetechnik sowie des Umfangs der Zustandserfassung (Orth et al., 2008).

4.2.1.3 Kanalspiegelung

Die älteste und einfachste Art, sich einen Überblick über den inneren Zustand einer nicht begehbaren Haltung zu verschaffen, ist die Kanalspiegelung. Anfangs wurden Haltungen wie folgt gespiegelt: In einem Schacht wird der Kanalspiegel mit einer Teleskopstange vor das Haltungsende gehalten. Von dem anderen Ende der Haltung wird ein Leuchtmittel auf der Schachtsohle so ausgerichtet, dass ein Lichtstrahl auf den Spiegel fällt (Stein, 1999). In Bild 4.11 ist der schematische Aufbau der Kanalspiegelung unter Zuhilfenahme einer Leuchtquelle im Endschacht dargestellt.

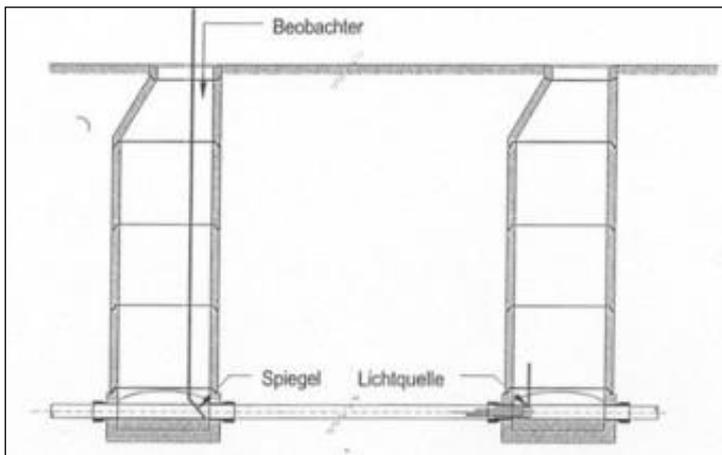


Bild 4.11: Schematische Darstellung der Kanalspiegelung (AöR Lünen, 2007)

Einige Kanalnetzbetreiber verzichten heutzutage auf die Lichtquelle und nutzen das Sonnenlicht. Der Nachteil dieser Methode liegt in der Abhängigkeit von den Witterungsverhältnissen. Nur bei guten Lichtverhältnissen (Sonnenschein) ist die Ablagerungssituation in der Haltung über eine weite Strecke erkennbar. Unter günstigen Randbedingungen sind Sichtweiten von über 50 m möglich. Bei Regen oder starker Bewölkung ist die Ablagerungssituation auf der Spiegeloberfläche kaum erkennbar. Die Inspektionsmethode der Kanalspiegelung hängt besonders stark von der Motivation und Qualifikation des Betriebspersonals ab, da die Ergebnisse sofort zu bewerten sind (Türk, 2007). Der Anschaffungspreis von Kanalspiegeln mit Teleskopstangen liegt bei ca. 500 € (Volprecht, 2006).

Vorteile beim Einsatz von Kanalspiegeln liegen besonders in der leichten Handhabung. Es können Tagesleistungen von 40-80 Haltungen (ca. 1500-3000 m), inklusive Schmutzfängerleerung, erreicht werden (Orth et al., 2008).

4.2.1.4 Begehung

Ab einer Mindesthöhe von 1200 mm (DN 1200) kann ein Kanal mittels Begehung inspiziert werden (DWA, 2005). Die Dokumentation etwaiger Schäden und Ablagerungen ist vergleichsweise einfach. Die Ablagerungshöhen können mit einem Zollstock gemessen und Schäden durch eine Fotodokumentation erfasst werden. Der Anteil an begehbaren Kanälen ist in vielen Kanalnetzen gering und beträgt weniger als 5 % des Gesamtaufkommens. Zudem ist die Kanalbegehung aufgrund der Gefahren in Abwasseranlagen auf das notwendigste Maß zu beschränken und nur unter Beachtung umfassender Sicherheitsvorschriften erlaubt (mind. 3 Personen erforderlich). Die Reinigung dieser Großprofile ist in der Regel zeitaufwendig und

mit besonderen Einsatzmaßnahmen verknüpft, die nach dem Merkblatt ATV-DVWK-M 197 (ATV-DVWK, 2004) als Sonderreinigung beschrieben und von der flächendeckenden Unterhaltungsreinigung abgegrenzt sind.

4.2.1.5 Inaugenscheinnahme des Schachtgerinnes

Durch eine Inaugenscheinnahme des Schachtgerinnes erhält man Informationen über den Zustand des Schachtes, wie den Verschmutzungsgrad und ob die Steig-eisen und der Schmutzfänger vorhanden sowie in Ordnung sind. Die Prüfung der Schachtbauwerke gehört zu den Aufgaben, die von der SÜWV Kan NRW im Zuge der Überwachung der Kanäle verlangt werden. Dazu wird zunächst der Kanaldeckel geöffnet und der Schmutzfänger, soweit vorhanden, entfernt. Dann wird die Ablagerungssituation in der Schachtsohle bewertet. Dabei wird durch die Inaugenscheinnahme festgelegt, ob Ablagerungen sich im Gerinne und auf der Berme (Schachtsohle ohne Gerinne) befinden. Falls sich Ablagerungen im Schacht befinden, wird die Höhe dieser Ablagerungen abgeschätzt oder über eine Zollstockmessung bestimmt (Volprecht, 2006). Ebenfalls ist es möglich, über das Fließverhalten des Abwassers im Gerinne, Rückschlüsse über die Ablagerungssituation in der Haltung zu ziehen. Hierbei können laminare Strömungen auf ablagerungsfreie Haltungen hinweisen sowie verlangsamte und stehende Strömungsverhältnisse ein Zeichen für ablagerungsbehaftete Haltungen sein (Schlüter, 2004).

Durch die Beurteilung der Schachtsohle lassen sich allerdings nur bedingt Rückschlüsse auf die Ablagerungssituation in den Haltungen ziehen. In Bild 4.12 ist die Sicht einer Inaugenscheinnahme eines Schachtgerinnes dargestellt.



Bild 4.12: Inaugenscheinnahme des Schachtgerinnes (IKT, 2007)

Mit der Inaugenscheinnahme des Schachtgerinnes können Tagesleistungen von 50-90 Schächte (1500-3000 m) inklusive Schmutzfängerleerung erzielt werden. Da jedoch im Schachtbereich nur ein Bruchteil der Netzlänge (ca. 1/40) sichtbar ist

und hier zum Teil auch andere hydraulische Bedingungen vorliegen, sind Fehleinschätzungen möglich. (Orth et al., 2008)

4.2.1.6 Sehende Düse

Die sehende Düse ist eine Kanalreinigungsdüse, auf deren Grundkörper eine TV-Kamera installiert ist (Bild 4.13).



Bild 4.13: Sehende Düse (KEG, 2011)

Die Bildübertragung erfolgt kabellos über Funk. Mit dieser Inspektionsmethode kann während der Hochdruckreinigung beim Einfahren der Düse kontrolliert werden, ob Bereiche mit hohem Ablagerungsaufkommen oder etwaige Schäden vorhanden sind. Beim Zurückziehen ermöglicht die sehende Düse eine Kontrolle, ob vollständig gereinigt worden ist. Bei einer Feststellung verbleibender Verschmutzungen kann hierauf direkt reagiert und der Reinigungsvorgang gegebenenfalls wiederholt werden. Nachteilig ist das hohe Eigengewicht der sehenden Düse (20-kg), aufgrund dessen eine hohe Pumpenleistung bzw. ein hoher Düsendruck zum Vortrieb des Grundkörpers erforderlich ist. Der Einsatz der sehenden Düse bietet sich ab einer Nennweite von DN 250 an (KEG, 2011).

4.2.2 Schachterkennungssysteme

Durch die Einführung der SÜWV Kan sind Netzbetreiber bei der Kanalreinigung verpflichtet, den Zustand und die Funktionsfähigkeit ihrer Kanäle und Schachtbauwerke in regelmäßigen Intervallen zu überprüfen.

Die Umsetzung der SÜWV Kan zur Überprüfung der Schachtbauwerke und Kanäle erweist sich in der Praxis als sehr zeitaufwendig. In der Regel werden die Schachtbauwerke mit Papierplänen aufgefunden und der Zustand auf Formularen

dokumentiert. Die korrekte Identifikation der Schächte kann die Mitarbeiter u. U. vor Probleme stellen, weil z. B. in Kreuzungsbereichen auf wenigen Quadratmetern fünf bis sechs Schächte vorgefunden werden können. Außerdem müssen die Zustandsdaten nach der erfolgreichen Identifikation und Dokumentation der Schächte auf Formularen manuell durch das Personal in das EDV-System eingegeben werden. Diese Vorgehensweise ist sehr zeitintensiv und fehleranfällig (Greve, 2005).

Um die Umsetzung der SÜwV Kan und die Zustandsaufnahme der Schachtbauwerke bei der Kanalreinigung zu erleichtern, wurden diverse Schachterkennungssysteme entwickelt.

Derzeit stehen folgende unterschiedliche Varianten für die Identifikation und zur Unterstützung der Protokollierung bzw. zur Leistungskontrolle bei der Kanalreinigung von Abwasserschächten (Schachtbauwerken) zur Verfügung:

- Transponder,
- Barcodes,
- Schilder und
- Markierungsstopfen.

Bei den marktüblichen Transpondersystemen wird ein Transponder (Bild 4.14) als batterielose Speichereinheit im Bereich des Schachtkopfes angebracht. Die gespeicherten Daten können mit Hilfe eines mobilen Datenerfassungsgerätes (MDE-Gerätes) drahtlos ausgelesen werden.

Barcodes (Bild 4.15) werden i. d. R. ebenfalls im Bereich des Schachtkopfes angebracht. Der Schachtcode wird über spezielle Scanner (Handhelds) ausgelesen. Derzeitig werden Barcodesysteme in Abwasserschächten vor allem zur Quittierung der Leistungen von Fachfirmen verwendet.

Schilder (Bild 4.16) aus Polystyrol oder Polyethylen werden i. d. R. an Steigeisen befestigt oder im Bereich des Schachtkopfes an die Schachtwandung angebracht. Bei einigen Systemen können die Informationen direkt vor Ort mit einem wasserfesten Stift eingetragen werden. Andere Anbieter fräsen die Schachtnummern zur eindeutigen Identifizierung des Schachtes bereits werksseitig in die Schilder ein.

Markierungsstopfen (Bild 4.17), auch Kunststoffpfropfen genannt, können in die Lüftungslöcher der Schachtdeckel eingeschlagen werden, um bereits oberirdisch Hinweise z. B. zur Richtung oder Anzahl der einbindenden Rohrleitungen und/oder für die Löschwasserentnahme bzw. zur Rattenbekämpfung zu geben.

**Bild 4.14: Transponder****Bild 4.15: Barcode****Bild 4.16: Schild****Bild 4.17: Markierungsstopfen**

Im Folgenden werden die einzelnen Schachterkennungssysteme detailliert erläutert.

4.2.2.1 Transponder

Die Bezeichnung Transponder ist dem Englischen entliehen und setzt sich aus den Begriffen Transmitter (Sender) und Responder (Antwortgeber) zusammen (Bald, 2004). Der Transponder, auch Tag oder RFID (engl. Radio Frequency Identification) genannt, ist ein System zur Autoidentifikationstechnik (Auto-ID), d. h. eine automatische berührungslose Identifikation von Objekten per Funk bzw. durch Radiowellen. Die Speicherung der Daten erfolgt auf einem elektronischen Datenträger - dem Transponder. Sowohl die Kommunikation als auch die Energieversorgung zwischen dem Leser und dem Datenträger erfolgt durch das Senden der Radiowellen. Dabei erzeugt der Transponder keine eigenen elektromagnetischen Wellen, sondern reflektiert lediglich die vom Lesegerät gesendeten Radio-

wellen. Der Austausch der Daten wird unter Verwendung magnetischer oder elektromagnetischer Felder gewährleistet, durch diese Technologie wird ermöglicht, dass die Daten ohne Sichtkontakt und berührungslos ausgelesen und gespeichert werden können (FTK, 2006).

Bei der Kanalreinigung werden Transponder (Bild 4.18) für die eindeutige Identifikation von Abwasserschächten eingesetzt. Außerdem bieten sie Hilfe bei der Protokollierung von Daten. Insbesondere kann auch eine Kontrolle über die getätigten Arbeiten erfolgen. Der Transponder wird i. d. R. im Bereich des Schachtkopfes montiert.

Die Sendefrequenz des Transponders liegt bei 125 kHz (Low Frequency), diese Frequenz eignet sich besonders bei metallischen Umgebungen. Bei dieser Frequenz beträgt die Lesedistanz zwischen Lesegerät und Transponder bis zu max. 5 cm. Somit ist die Auftragsquittierung nur möglich, wenn der Schachtdeckel und Schmutzfänger entfernt werden (TECTUS GmbH, 2006).



Bild 4.18: Transponder (TECTUS, 2011)

Bei den Lesegeräten existieren diverse Alternativen, die je nach Bedarf eingesetzt werden können. Bei Laptops bzw. Tablet-PCs sind Lesegeräte (Bild 4.19) mit einer USB-Schnittstelle im Einsatz. Eine weitere Alternative bieten Lesegeräte bei Handhelds oder Personal Digital Assistants (PDA), die in einen Compact-Flash-Kartensteckplatz eingesetzt werden können. Das Lesegerät (Bild 4.20) kann in einem Handheld integriert werden; eine anschließbare Antenne wird zum oberen Ende des Handhelds geführt, um die Lesedistanz von max. 5 cm weiterhin einhalten zu können. Außerdem besteht die Möglichkeit bei einem PDA, das Lesegerät (Bild 4.21) in einen optischen Kartenplatz einzustecken; in diesem Fall ist die An-

tenne in der Compact-Flash-Form des Lesegerätes enthalten. Die unterschiedlichen Lesegeräte kosten etwa 220 €.

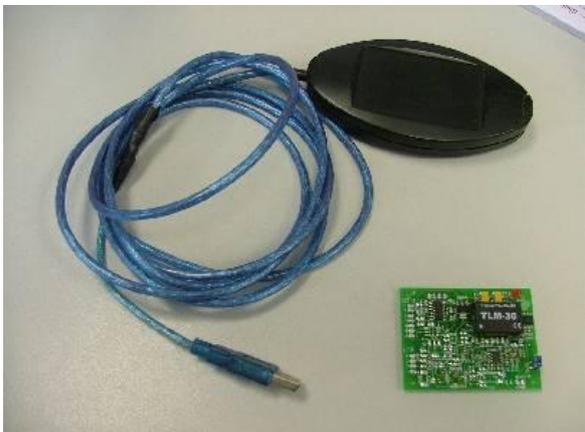


Bild 4.19: USB-Lesegerät



Bild 4.20: Lesegerät mit externer Antenne



Bild 4.21: Lesegerät mit interner Antenne



Bild 4.22: Einlesen vom Transponder mit einem integrierten Lesegerät (TECTUS, 2011)

Die Transponder können hinsichtlich Planung, Steuerung und Kontrolle die Kanalreinigungsarbeiten optimieren und den Gesamtaufwand reduzieren. Bei der Planung kann die Dokumentation der SöwV Kan-Berichte durch einfache Arbeitsschritte am PC automatisch eingeleitet werden. Weiterhin wird für das Verwaltungspersonal die Nachbearbeitung der Daten im Büro verkürzt und erleichtert.

Bei der Steuerung von Kanalreinigungsarbeiten sind hingegen nur geringe bzw. keine Zeitgewinne zu erwarten. Allerdings wird durch den Einsatz von Transpondersystemen die Aufnahme der Datenqualität erhöht bzw. verbessert. Gegenüber der konventionellen Variante (Schachtprotokolle), die i. d. R. fehleran-

fällig und zeitintensiv ist, bieten Transpondersysteme eine schnelle, automatische und nahezu fehlerfreie Dokumentation an.

Transponder können die Kanalreinigungsarbeiten bei der Kontrolle unterstützen, z. B. durch die Aufnahme der Tätigkeitsdauer sowie der Standorte der Mitarbeiter. Eine Kontrolle der eigentlichen Reinigungsleistung ist mit dem System nicht möglich, jedoch können Plausibilitätskontrollen mit den erfassten Daten durchgeführt werden.

Grundsätzlich können mit der Anschaffung eines Transpondersystems u. a. durch die digitale Aufnahme von Daten weitgehend Papier- und Druckkosten eingespart werden. Als nachteilige Aspekte konnten die hohen Anschaffungskosten und die Einarbeitungszeit für den Umgang mit dem System festgestellt werden.

4.2.2.2 Barcodes

Bei einem Barcode, auch Strichcode oder Identcode genannt, werden Informationen in Form von gefärbten Strichen und farblosen Lücken grafisch dargestellt (Jesse und Rosenbaum, 2000).

Barcode Identifikationssysteme bestehen im Wesentlichen aus zwei Komponenten:

- einem optischen Code, der an dem zu identifizierenden Objekt angebracht wird, und
- einem optischen Lesegerät, das als Lesemodul fungiert.

Barcodesysteme werden bei der Kanalreinigung zur schnellen und eindeutigen Identifikation von Abwasserschächten eingesetzt (Bild 4.23). Außerdem können sie zur Quittierung von Arbeitsleistungen von beauftragten Fachfirmen verwendet werden. Der Einsatz von Barcodesystemen vereinfacht die Kontrolle von Inspektions-, Reinigungs- und Reparaturmaßnahmen (Puhl, 2006). Der Einbau von Barcodes erfolgt i. d. R. im Konusbereich des Abwasserschachtes. Optional können Barcodes auch auf einem Schild angebracht werden, dabei ist die Schachtkenung zusätzlich in einer größeren Schrift hinterlegt. Die Decodierung des Codes erfolgt über spezielle Handscanner (Bild 4.24).

**Bild 4.23: Barcodelesegerät****Bild 4.24: Einscannen des Barcodes im Schacht**

Mit dem Einsatz von Barcodes können Kanalreinigungsarbeiten hinsichtlich Planung, Steuerung und Kontrolle verbessert werden. Bei der Planung werden Zeit- und Geldeinsparungen erzielt. Insbesondere findet eine Arbeitserleichterung für das Verwaltungspersonal statt. Weiterhin können die Forderungen der SÜWV Kan mit einfachen Schritten eingeleitet und die Berichte zusammengestellt werden.

Zeitersparnisse konnten bei der Steuerung von Kanalreinigungsarbeiten durch die digitale Datenaufnahme mit dem Barcodesystem nicht festgestellt werden. Jedoch wurden die Daten nahezu fehlerlos und einheitlich aufgenommen.

Die Barcodes können Kanalreinigungsarbeiten hinsichtlich Kontrolle unterstützen, indem die Tätigkeitsdauer sowie der Standort der Mitarbeiter mit dem System dokumentiert werden. Eine Kontrolle der eigentlichen Reinigungsleistung ist mit Barcodes nicht durchführbar, allerdings können Plausibilitätskontrollen mit den aufgenommenen Daten durchgeführt werden.

Ein weiterer Vorteil ist die nahezu papierlose Vorgehensweise, wodurch Druck- und Papierkosten eingespart werden können.

Die Nachteile des Systems sind die Anschaffungskosten sowie die Einarbeitungszeit, damit das System effektiv eingesetzt werden kann. Ein weiterer Aspekt ist die mögliche Verschmutzung der Barcodes und daraus resultierende Unlesbarkeit.

4.2.2.3 Schilder

Um Verwechslungen bei der Identifizierung eines Schachtes zu vermeiden, können Schilder mit einem Kabelbinder an einem Steigeisen befestigt (Ostmann, 2005) (Bild 4.25) oder an die Schachtwandung montiert werden (Bild 4.26). Schilder aus Polyethylen (PE) können direkt vor Ort mit einem wasserfesten Stift beschriftet werden.

Für die unterschiedlichen Kanalsysteme, wie z. B. Regen- oder Schmutzwasserkanal, sind verschiedene Schilderfarben für die eindeutige optische Erkennung vorhanden.

Grundsätzlich können Schilder bei Kanalreinigungsarbeiten hinsichtlich Planung und Steuerung eine Anwendung finden, um die Betriebsabläufe zu optimieren.

Bei der Planung mit Schildern und den dazugehörigen EDV-Systemen sind u. a. durch die automatische Übertragung der Daten hohe Zeitersparnisse vorhanden. Darüber hinaus können die für die Aufsichtsbehörde benötigten SÜWV Kan-Berichte mit dem System erstellt und bei Bedarf vorgelegt werden.



Bild 4.25: PU Schild am ersten Steigeisen

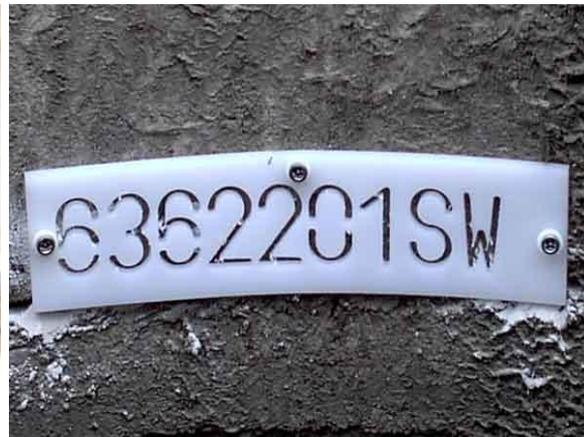


Bild 4.26: Schild an der Schachtwandung (Bodemann GmbH, 2011)

Die Zustandserfassung bei der Steuerung bzw. Durchführung der Arbeiten erfolgt nahezu ohne Papier. Weiterhin wird der Abwasserschacht eindeutig identifiziert, jedoch wird der digitale Datenfluss durch die manuelle Eingabe der Schachtnummer in das MDE-Gerät unterbrochen. Durch diese Vorgehensweise können Übertragungsfehler bzw. Tippfehler entstehen. Darüber hinaus können Schilder verschmutzen und dadurch unleserlich werden. Ein Zeitgewinn zu der herkömmlichen Variante mit Schachtprotokollen konnte nicht festgestellt werden.

Eine Kontrollmöglichkeit der Kanalreinigungsarbeiten bzw. Tätigkeitsdauer ist mit Hilfe von Schildern nicht möglich.

Als nachteilige Aspekte des Systems sind die Investitionskosten sowie die Einarbeitungszeit für das Personal zu nennen.

4.2.2.4 Markierungsstopfen

Beim Einsatz von Schachterkennungssystemen können als unterstützendes Element Markierungsstopfen (Kunststoffpfropfen) (MH-Vertrieb, 2011) eingesetzt werden. Mit den Pfropfen (Bild 4.27) ist es vor Ort möglich, ohne Planungsunterlagen das Entwässerungssystem zuzuordnen. Durch unterschiedliche Farben werden Regen-, Schmutz- und Mischwasserkanäle sowie Schächte oberirdisch eindeutig gekennzeichnet. Außerdem kann dieses Erkennungssystem unterstützend für Betriebspersonal, bspw. bei der Rattenbekämpfung oder bei Feuerwehreinsätzen, genutzt werden. Die Kunststoffpfropfen bestehen aus Polyethylen (PE) und werden oberirdisch in ein Lüftungsloch des Schachtdeckels eingesetzt.

Optional kann der Pfropfen als Verschluss für Schachtabdeckungen (Bild 4.28) eingesetzt werden, um Geruchsprobleme, Fremdwasserzulauf infolge von eindringendem Oberflächenwasser durch die Lüftungsöffnungen sowie Schmutzeintrag in die Kanalisation zu vermindern.



Bild 4.27: Pfropfen im Kanaldeckel



Bild 4.28: Pfropfen als Verschluss für Schachtabdeckungen (MH-Vertrieb, 2011)

4.2.3 EDV-Systeme zur Unterstützung der Kanalreinigung

Zur effizienten Verwaltung und Unterhaltung eines Kanalnetzes mit Abwasser-schächten, Haltungen, Sonderbauwerken, etc. können spezielle geografische In-

formationssysteme (GIS) bzw. Kanalinformationssysteme (KIS) sowie Betriebsführungssysteme (BFS) genutzt werden (Bosseler und Puhl, 2006) (Bild 4.29).

Ein geografisches Informationssystem besteht i. d. R. aus Hardware, Software, Daten und dem Anwender. GIS dient zur Erfassung, Speicherung, Bearbeitung, Analyse und Wiedergabe von Informationen bzw. Daten (Bill, 1999).

Bild 4.29 zeigt exemplarisch einen Auszug aus einem GIS.

Eine spezielle Form des GIS ist das Kanalinformationssystem (Aschauer und Mörth, 2001). Es sind explizit nur Daten, die für das Kanalnetz von Wichtigkeit sind, wie z. B. Schächte, Haltungen, Systemart, Bauwerksdaten etc., vorhanden.

Ein Betriebsführungssystem hat die Aufgabe, Arbeitsabläufe zu erfassen und dadurch ihre lückenlose Dokumentation zu ermöglichen (Stempfl, 2003). Optional können zur Visualisierung der Daten sogenannte GIS-Viewer (Oberfläche) eingesetzt werden.

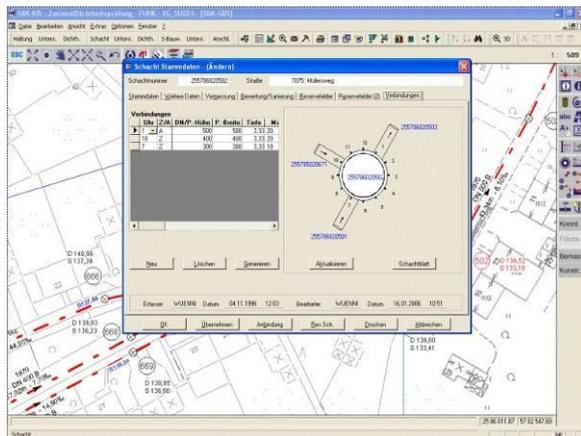


Bild 4.29: Geoinformationssystem (Bosseler und Puhl, 2006)

In der Regel erlauben EDV-Systeme die Eingabe geografischer Koordinaten, der Stammdaten des Bauwerks sowie der bei der Inspektion aufgenommenen Zustandsdaten der Schächte. Mithilfe von speziellen mobilen Datenerfassungsgeräten (MDE-Geräte) können die Schachtdaten auch direkt bei der Schachtinspektion bzw. Kanalreinigung eingegeben oder abgerufen werden. Unter MDE-Geräten werden handliche, tragbare Datenverarbeitungsgeräte, bspw. Laptops oder PDAs (Bild 4.30) verstanden. Diese Geräte werden von den Mitarbeitern des Kanalbetriebes vor Ort mitgeführt (Dohmann und Coburg, 2003).

Auf Bild 4.30 ist exemplarisch ein mobiles Datenerfassungsgerät dargestellt.



Bild 4.30: MDE-Gerät (Bosseler und Puhl, 2006)

Sofern zu jedem Schacht bzw. zu jeder Haltung die erforderlichen Informationen und Daten vorliegen, können zu jedem Schacht bzw. zu jeder Haltung die geographische Lage im Kanalnetz graphisch dargestellt und außerdem zu jedem Schacht bzw. zu jeder Haltung die Stamm- und aktuellen Zustandsdaten abgerufen werden.

Darüber hinaus ist bei einigen Systemen auch eine direkte Verknüpfung des TV-Untersuchungsvideos oder der Inspektionsbilder mit den einzelnen Schachtbauwerken möglich. Je nach System können auch Schacht- und Bildprotokolle erstellt und ausgedruckt werden. Die Einbindung eines zusätzlichen Softwaremoduls zur Bewertung und Klassifizierung des Schachtzustandes ist bei der Mehrzahl der am Markt erhältlichen EDV-Systeme möglich (Bosseler und Puhl, 2006).

Der Einsatz von EDV-Systemen und MDE-Geräten kann die Effizienz der Arbeiten durch z. B. verkürzte Datenübertragung steigern. Dadurch können Zeitpotenziale freigesetzt und frei werdende Kapazitäten und Mittel anderweitig eingesetzt werden (vgl. z. B. Coburg, 2006).

5 Praktische Versuche

Messungen in realen Kanalnetzen sind stets mit Problemen verbunden. Gründe dafür liegen in einer Vielzahl nicht zu beeinflussender und teilweise auch nicht zu erfassender Randbedingungen. Neben der Variabilität der in der Realität auftretenden Niederschlagsereignisse erschweren insbesondere die Unkenntnis über den tatsächlichen Zustand des Kanalisationsnetzes (Schäden, Ablagerungen, vorhandenes Gefälle) und die Messungenauigkeiten der verfügbaren Messtechnik präzise Auswertungen bspw. von im Kanal auftretenden Durchflüssen und transportierten Frachten.

Um Erfahrungen, die im Rahmen eines vom MUNLV-NRW geförderten Projektes bei Frachtbilanzierungen zur Bewertung der Wirksamkeit von Kanalreinigungen gemacht wurden, zu nutzen und die bisher gewonnenen Erkenntnisse zu ergänzen, wurde für dieses Forschungsprojekt die Durchführung von verschiedenen witterungsunabhängigen Versuchen geplant. Der Fokus der praktischen Versuche lag auf dem Betrieb einer Kanaltteststrecke, die es ermöglichte, die Anzahl der störenden Einflussparameter einzuschränken. Unter definierten Bedingungen wurde die Bildung von Ablagerungen beobachtet. Darüber hinaus wurden ergänzende Laborversuche hinsichtlich des Erosionswiderstandes von Ablagerungen und der Bildung von Schwefelwasserstoff unter veränderbaren Randbedingungen durchgeführt.

5.1 Kanaltteststrecke

Dass sich Feststoffe in Kanalisationen anlagern, wenn die Transportkapazität des Abwassers nicht mehr ausreicht, ist hinreichend bekannt. Der Wissensstand hinsichtlich der weiteren Entwicklung der Ablagerungen ist jedoch relativ gering. Dies ist darauf zurückzuführen, dass Messungen im Kanal immer mit Problemen verbunden sind. So lässt sich aufgrund der stark schwankenden Abflüsse im Kanal keine Aussage darüber treffen, über welchen Zeitraum sich die Ablagerungen, die man bei Inspektionen vorfindet, gebildet haben. Regenereignisse und Trockenwetterspitzen führen zu einem Abtrag von Stoffen, die bei geringem Abfluss sedimentierten, so dass man durch Messungen im Kanal zu unterschiedlichen Zeitpunkten zu völlig verschiedenen Aussagen kommen kann. In Bild 5.1 ist zu erkennen, wie stark die Ablagerungshöhen im Beobachtungszeitraum schwanken, ohne dass ein direkter Zusammenhang mit dem Niederschlag zu erkennen ist. Je nachdem, zu welchem Zeitpunkt man die entsprechende Haltung inspiziert hätte, wäre man

womöglich zu sehr unterschiedlichen Einschätzungen des Reinigungsbedarfs gekommen.

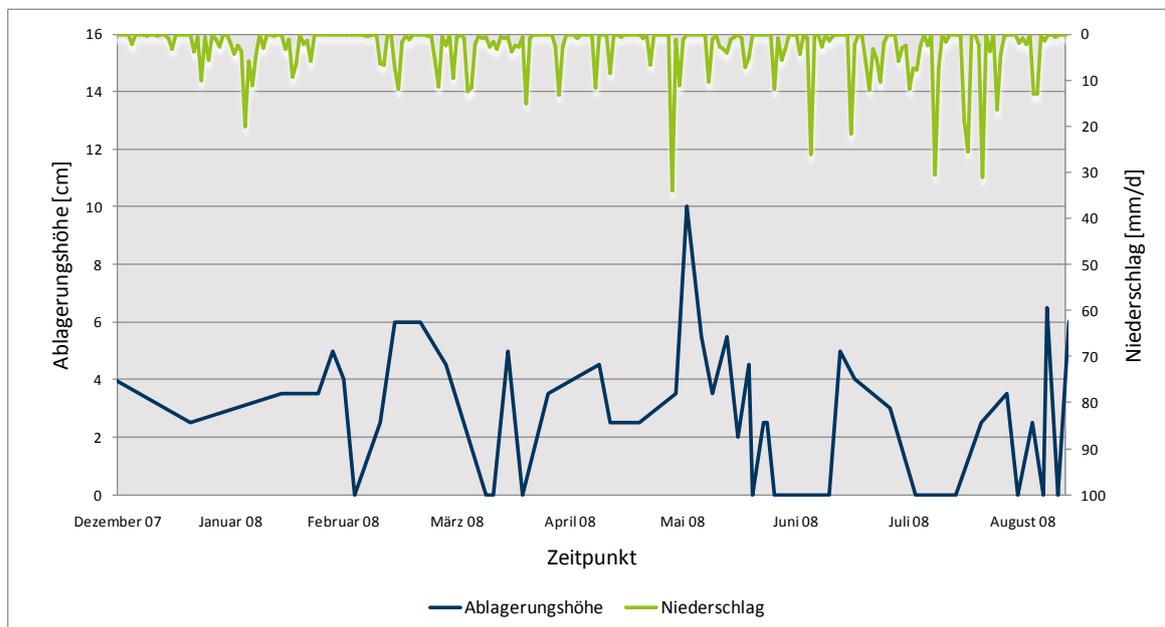


Bild 5.1: Ablagerungs- und Niederschlagshöhen (Messstelle Bochum-2, Messungen im Rahmen des MUNLV-Projektes „Zustands-, Prozess und Wirkungsanalyse zur Entwicklung einer bedarfsorientierten Reinigungsstrategie für Kanalnetze“)

Um dieses Problem zu umgehen, wurde eine Kanaltteststrecke konzipiert, bei der Kanalrohre mit unterschiedlichen Trocken- und Regenwetterabflüssen durchflossen werden. Die Ablagerungsdynamik konnte für definierte Randbedingungen gemessen werden.

5.1.1 Material und Methoden

Bei der Konzeption der Kanaltteststrecke wurde Wert darauf gelegt, Randbedingungen zu schaffen, die möglichst repräsentativ für nordrheinwestfälische Kanalnetze sind. Dies betrifft Haltungseigenschaften wie Durchmesser, Gefälle und äquivalente Sandrauheit sowie die Abwasserzusammensetzung und -menge.

5.1.1.1 Aufstellungsort der Versuchsanlage

Dank der Unterstützung des Ruhrverbands und insbesondere des Personals der Kläranlage Ölbachtal konnte ein Standort gefunden werden, der die Anforderungen an Raumbedarf, Untergrund und Infrastruktur erfüllte. Direkt über dem Zulaufkanal zur Kläranlage befindet sich eine betonierte Fläche von ausreichender Größe, die für den Versuchsaufbau genutzt werden konnte, ohne den Kläranlagenbe-

trieb zu behindern. Durch Kanalschächte in der Betonfläche oberhalb des Zulaufgerinnes ist es möglich, Abwasser direkt aus dem Zulaufkanal zu entnehmen und wieder zurückzuleiten. Da der Kläranlage (Ausbaugröße rund 320.000 Einwohnerwerte) auch bei Trockenwetterabfluss (85 %-Perzentil = 810 L/s) ausreichend Abwasser zufließt, konnten Versuche mit sehr großen Abwassermengen durchgeführt werden. Weitere Vorteile des Standorts auf dem Gelände der Kläranlage Öl-bachtal sind:

- Kurze Entfernung zur Ruhr-Universität, d. h. Möglichkeit zur kurzfristigen Reaktion auf Betriebsstörungen
- Standfester Untergrund, gute Zugänglichkeit
- Schutz vor Wildtieren und Vandalismus, da das Gelände der Kläranlage eingezäunt ist
- Kurze Leitungswege für Abwasserzu- und -abführung
- Eine gewisse Kontrolle durch das Klärwerkspersonal, größere Fehlfunktionen werden schnell bemerkt

5.1.1.2 Abwasserzusammensetzung

In der Literatur finden sich fast ausschließlich Versuchsanlagen zu Ablagerungsuntersuchungen, die mit Ersatzflüssigkeiten und/oder Ersatzsedimenten beschickt wurden (bspw. Tait et al., 1998; Biggs et al., 2005; Macke, 1982 etc.). Allerdings wurde eine realitätsnahe Abwasserzusammensetzung als Voraussetzung für die im Rahmen dieses Projektes durchgeführten Versuche angesehen, da sich für reale Kanäle repräsentative Ablagerungen am ehesten bei der Verwendung von realem Abwasser bilden. Auch wenn das Fördern von realem Abwasser mit all seinen Inhaltsstoffen stets mit vielen Problemen verbunden ist, überwiegen die Vorteile gegenüber einem „künstlichen Abwasser“. Hauptargumente für die Verwendung von realem gegenüber künstlichem Abwasser waren die gute Verfügbarkeit der großen benötigten Mengen sowie realistische biologische Aktivitäten in Abwasser und Ablagerungen. Durch die Verwendung von realem Abwasser mit seiner heterogenen Zusammensetzung und den damit verbundenen Wechselwirkungen zwischen den einzelnen Feststofffraktionen lässt sich die Ablagerungsbildung realitätsnah nachbilden. Damit die Schwankungen in der Abwasserqualität möglichst gering sind und der Abwasserbedarf der Versuchsanlage stets gedeckt werden kann, sollte die Entnahme aus einem großen Sammler erfolgen. Mit der Aufstellung auf der Kläranlage Öl-bachtal konnten diese Anforderungen erfüllt werden. Das Einzugsgebiet der Kläranlage Öl-bachtal umfasst die Bochumer Stadtteile Gerthe, Langendreer, Harpen, Laer, Altenbochum und Querenburg (einschließlich

der Ruhruniversität) sowie Teile von Dortmund (Bövinghausen und Holte), Castrop-Rauxel, Herne und Witten (Stadtmitte, Annen, Bommern, Heven und Wannebach). Das Einzugsgebiet ist aufgrund seiner Größe hinsichtlich Gefällesituation etc. sehr heterogen, so besteht es bspw. aus steilen Anfangshaltungen (bspw. in Bochum-Langendreer), flach verlegten großen Sammlern (bspw. in der Bochumer Innenstadt) sowie mehreren Druckleitungen (bspw. Anschluss von Witten an die KA).

Dass nicht alle Feststoffe im Abwasser eine Kläranlage in der Form erreichen, die sie bei ihrer Einleitung in die Kanalisation noch hatten, da sie ggf. zerrieben, aufgeweicht oder biologisch zersetzt wurden, wurde als unproblematisch angesehen, da bspw. Fäkalien und Toilettenpapier außer in Anfangshaltungen bei der Ablagerungsbildung selten eine Rolle spielen. Hinsichtlich der Konzentrationen der Standardparameter AFS, CSB und BSB₅ kann der Zulauf zur Kläranlage als repräsentativ für einen Trockenwetterabfluss im Kanalnetz angesehen werden (Tabelle 5.1).

Tabelle 5.1: Vergleich der Abwasserkonzentrationen im Kanalnetz und im Kläranlagenzulauf

	AFS [mg/L]	CSB [mg/L]	BSB ₅ [mg/L]
Mittelwerte aus vier Einzugsgebieten in Bochum und Marl (24h-Mischproben von 2007 und 2008)	354	641	299
Mittelwerte des Zulaufs zur KA Ölbachtal (41 Stichproben von 1984-2006)	366	529	309
Mittelwert des Zulaufs zur KA Ölbachtal (berechnet aus Daten des Informationsblattes des Ruhrverbands)	251	522	301

5.1.1.3 Rohrleitung

Die Teststrecke umfasst drei Versuchskanäle, um zeitgleich Versuche mit unterschiedlichen Randbedingungen durchführen zu können. Die drei Testrohre sind jeweils 10 m lang und bestehen aus je fünf Plexiglasrohren. Diese Teilstücke haben eine Länge von 2 m, einen Durchmesser von 300 mm und sind mit Flanschen verbunden (Bild 5.2). Plexiglas bietet mehrere Vorteile gegenüber anderen Rohr-

materialien. Zum einen ist es durchsichtig, so dass die Prozesse im Rohr gut beobachtet werden können, zum anderen hat es ein sehr geringes Eigengewicht. Dies hat den Vorteil, dass eine variabelere Unterkonstruktion gewählt werden konnte. Betonrohre hätten einen deutlich höhere Anforderungen an die Unterkonstruktion gestellt und bspw. die Variation des Gefälles erschwert.



Bild 5.2: Plexiglasrohr während der Montage

Plexiglasrohre haben eine äußerst glatte Oberfläche, deren äquivalente Sandrauheit näherungsweise der von Kunststoffrohren (0,0015 bis 0,01 mm) entspricht. Da Kunststoffrohre an den Rohren im Kanalnetz derzeit einen geringen Anteil von etwa 7 % haben (Bild 5.3), wurde nach einer Möglichkeit gesucht, die äquivalente Sandrauheit der verwendeten Rohre so zu erhöhen, dass sie vergleichbar mit Rohren aus Beton oder Steinzeug sind. Dies konnte realisiert werden, indem Schleifpapier in die Rohre eingeklebt wurde. Schleifpapier oder Schleifgewebe sind in verschiedenen Körnungen erhältlich. Die Einheit der Körnung wird in der Regel in Mesh angegeben und steht für die Anzahl der Maschen eines Siebes pro Zoll (25,4 mm). Je größer die Körnungszahl des Schleifpapiers ist, desto feiner ist die Körnung und desto geringer die äquivalente Sandrauheit. Durch die Bandbrei-

te verschiedener Körnungen kann die äquivalente Sandrauheit der Testrohre mit vergleichsweise geringem Aufwand variiert werden. Damit bietet dieses Verfahren, das bspw. auch bei Banasiak et al. (2005) zur Anwendung kam, entscheidende Vorteile gegenüber Verfahren zur Aufrauung der Plexiglasoberfläche. Diese Verfahren können nur einmal durchgeführt werden, die äquivalente Sandrauheit kann dabei nicht exakt gesteuert werden und das Plexiglasrohr verliert seine Durchsichtigkeit. In den bisherigen Versuchen kamen Schleifpapier und Schleifgewebe mit einer Körnung von 60 bzw. einer äquivalenten Sandrauheit von $k_S=0,4$ mm zur Anwendung, was ungefähr der äquivalenten Sandrauheit von neuen Rohren aus Steinzeug oder Beton entspricht (Tabelle 5.2).

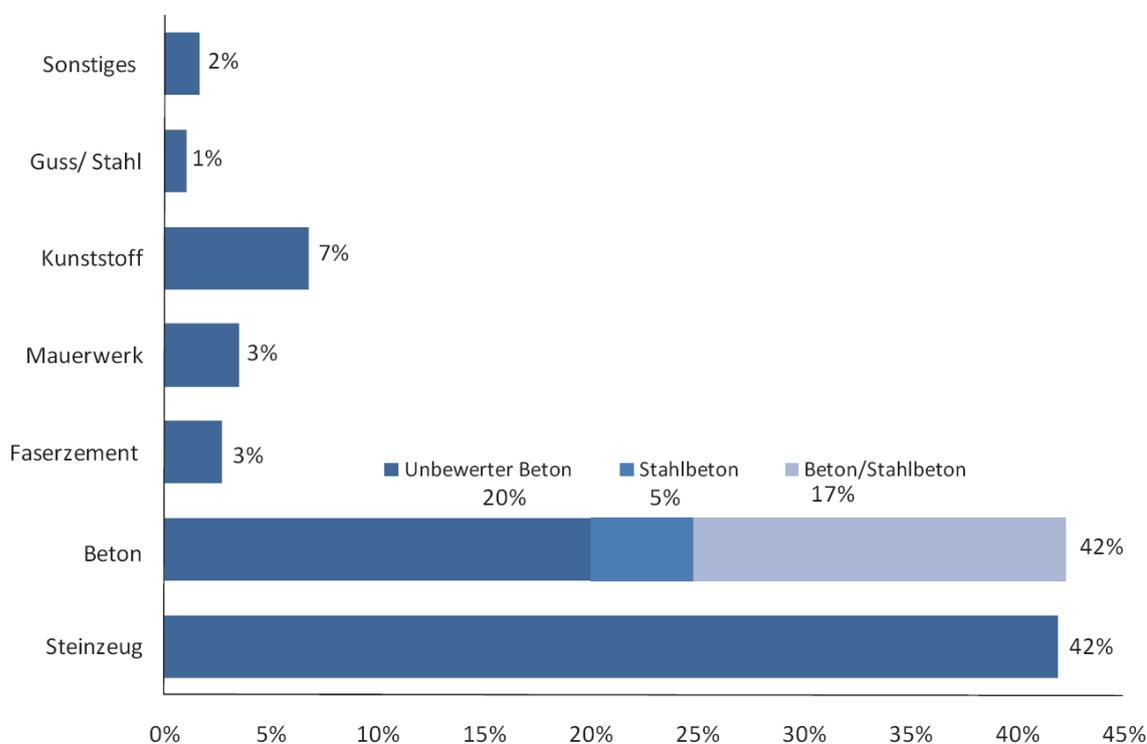


Bild 5.3: Verteilung der Rohrmaterialien im Gesamtnetz Deutschlands (Berger und Falk, 2011)

Um den Einfluss der äquivalenten Sandrauheit auf die Ablagerungsbildung zu untersuchen, sollen weitere Versuche mit Schleifpapier unterschiedlicher Körnungen durchgeführt werden. Diese Versuche werden im Falle einer Bewilligung Bestandteil der separat beantragten Phase II des Projektes sein. Die Ergebnisse von ersten Vorversuchen mit äquivalenten Sandrauheiten von 0,1 und 0,635 mm finden sich in Kapitel 5.1.3.

Die zur Dimensionierung von Abwasserleitungen und -kanälen im Arbeitsblatt DWA-A 110 (DWA, 2006) vorgegebenen betrieblichen Rauheiten k_b von 0,25 bis 1,5 mm sind mit dem gewählten Wert von $k_s=0,4$ mm nicht unmittelbar vergleichbar, da die betriebliche Rauheit neben der äquivalenten Sandrauheit noch die Einflüsse von Lageungenauigkeiten und -änderungen, Rohrstößen, Zulauf-Formstücken und Schachtbauwerken enthält. Die den betrieblichen Rauheiten aus dem Arbeitsblatt DWA-A 110 zugrundeliegende äquivalente Sandrauheit für derzeit durch den Normenausschuss Wasserwesen genormte Rohre beträgt 0,1 mm.

Die betriebliche Rauheit k_b der mit Schleifpapier beklebten Versuchsrohre ist folglich größer als die äquivalente Sandrauheit des Schleifpapiers. Anhand der Messung von Fließhöhe und Abflussmenge wurde versucht, die betriebliche Rauheit der Versuchsrohre genauer zu bestimmen. Dabei ergab sich für die Messwerte zu Beginn der Versuchsreihen ein Median der berechneten betrieblichen Rauheiten von 1,275 mm. Die Messwerte unterlagen jedoch erheblichen Schwankungen und mit zunehmender Versuchsdauer Einflüssen durch Ablagerungen.

Tabelle 5.2: äquivalente Sandrauheit k_s für Rohre (Auswahl aus Schröder und Zanke, 2003; Schneider, 2001)

Werkstoff	Art, Form, Zustand	k_s in mm
Gusseisen	roh, neu	0,15 bis 0,95
	gereinigt	0,1 bis 1,5
	korrodiert, verkrustet	1,0 bis 8,5
Kunststoff	Rohre und Gerinne aus Plexiglas, neu	0,0015
	Polyäthylen, weich und hart, neu; PVC, neu	0,0015 bis 0,01
Steinzeug	glasiert, neu	0,04 bis 1,5
	verkrustet	0,5 bis 2,0
Beton	Fertigteile, neu	0,03 bis 0,64
	Fertigteile, alt	1,9 bis 6,4
	aus Stahlschalung, neu	0,06 bis 1,5
	aus Stahlschalung, alt	0,55 bis 1,8

Um Messungen der Ablagerungshöhen und die Entnahme von Ablagerungsproben zu ermöglichen, wurden in jedes der zwei Meter langen Teilstücke der Rohre im Scheitel vier Öffnungen mit 100 mm Breite und 300 mm Länge geschnitten (Bild 5.4). So ist es möglich, jeden Bereich im Rohr problemlos zu erreichen, ohne dass sich die Plexiglasrohre aufgrund von inneren Spannungen verformen.



Bild 5.4: Plexiglasrohr mit Ausschnitten im Scheitel

5.1.1.4 Unterbau

Der Unterbau der Versuchsrohre muss sehr stabil sein, um das Gewicht der Rohre im Vollfüllungszustand aufnehmen zu können. Dabei sollte es nicht zu Verformungen (bspw. Durchbiegen) kommen, damit das Gefälle konstant bleibt. Aus diesem Grund wurde ein Aluminiumgerüst angefertigt, welches aus einer Art Leiter besteht, die auf mehreren Stützen gelagert ist (Bild 5.5).

Der Abstand der Holme wurde dabei so gewählt, dass die Rohre sowohl mit den Flanschen auf den Holmen als auch mit der Rohrunterseite auf den Sprossen aufliegen und die Last gleichmäßig verteilt wird. Da sich die Querstreben der Stützen,

auf denen die Leitern aufliegen, stufenlos in der Höhe verstellen lassen, kann auch das Gefälle bis zu einem Maximalwert von etwa 5 % beliebig variiert werden.

Um bei der Einstellung des Gefälles eine größtmögliche Genauigkeit erreichen zu können, wurde gemeinsam mit den Geodäten der Ruhr-Universität Bochum und der Hochschule Bochum ein Höhennivellement der fertig aufgebauten Versuchsanlage erstellt.



Bild 5.5: Unterkonstruktion für die Versuchsrohre (links: Vertikale Stützen mit höhenverstellbaren Querstreben; rechts: Horizontale Träger als Auflage für die Versuchsrohre)

5.1.1.5 Förderung des Abwassers

Die Entnahme und Förderung des Abwassers erfolgte durch eine selbstansaugende Kreiselpumpe vom Typ AbwasserStar 6“ der HEIDE-Pumpen GmbH. Vorteil einer trocken aufgestellten, selbstansaugenden Pumpe gegenüber einer Tauchpumpe ist, dass der Wartungsaufwand im Falle einer Verstopfung geringer ist, da kein Einstieg in den Kanal bzw. kein Kran zum Heben der Pumpe erforderlich ist. Die verwendete Pumpe hat einen freien Feststoffdurchgang von 70 mm, so dass auch repräsentative Feststoffe in die Testrohre gelangen können. Damit möglichst viele Feststoffe in die Testrohre transportiert werden, wurde auf einen Saugkorb oder ähnliche Vorrichtungen verzichtet. Dies brachte jedoch das Problem mit sich, dass Faserstoffe wie Putzlappen, Tampons und andere Hygieneartikel regelmäßig zu Verstopfungen der Pumpe führten. Durch einen entsprechend hohen Wartungsaufwand konnte jedoch eine weitgehend konstante Abwasserförderung ermöglicht werden.

Das Abwasser wurde aus dem Kanal mit einem Schlauch DN 150 in ein eigens angefertigtes Verteilerrohr mit fünf Ausgängen geleitet, welche jeweils mit pneumatisch betriebenen Schiebern (DOMINO-Schieber der GEFA Prozesstechnik GmbH) versehen waren (Bild 5.6). Ein Ausgang mit DN 150 diente der Druckregu-

lierung und führte das Abwasser bei Überschreiten eines vorgegebenen Maximaldrucks zurück in den Kanal. Die Versorgung der Versuchsrohre im simulierten Trockenwetterfall erfolgte über drei Leitungen mit DN 50. Der letzte Ausgang hatte einen Durchmesser von DN 100 und wurde an eines der drei Testrohre angeschlossen, wenn der benötigte Abfluss, bspw. bei der Simulation eines Regenerignisses, mit dem Schlauch mit Durchmesser DN 50 nicht mehr gewährleistet werden konnte. Die Regelung der Schieber der Zuleitungen zu den Testrohren erfolgte mit Hilfe magnetisch induktiver Durchflussmesser (MID) vom Typ Promag 50W von Endress+Hauser, die permanent den tatsächlichen Durchfluss erfassten.

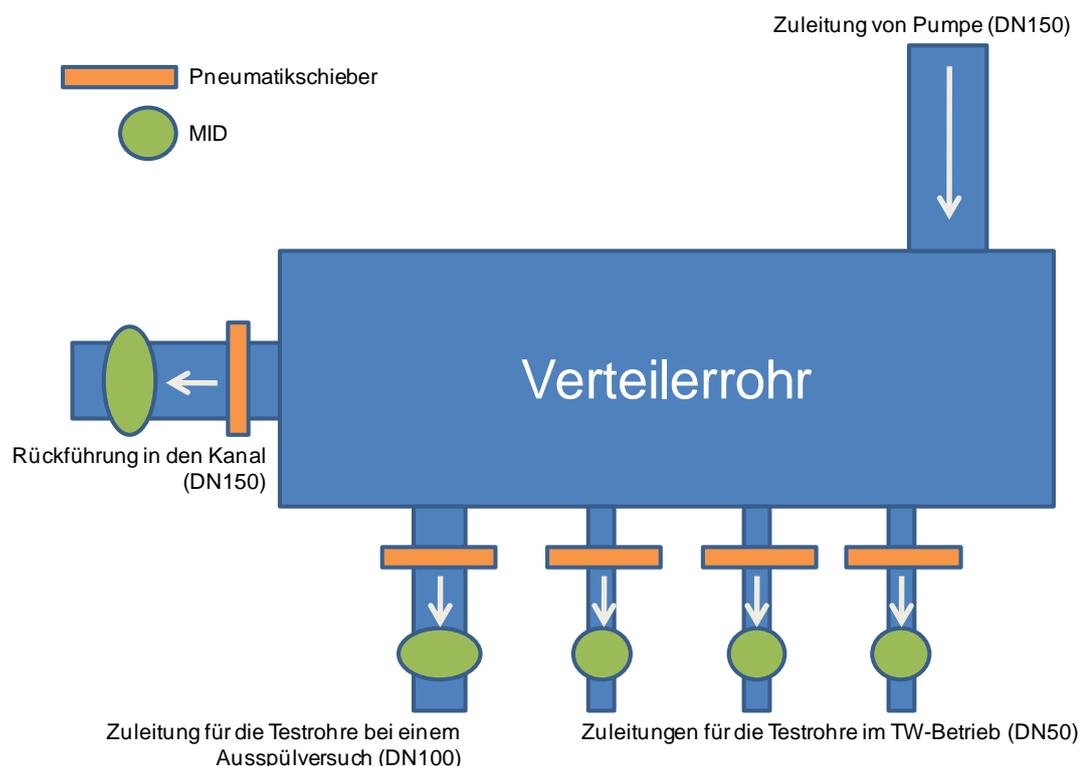


Bild 5.6: Funktionsskizze des verwendeten Verteilerrohrs

Bevor das Abwasser aus den an das Verteilerrohr angeschlossenen Schläuchen in das Plexiglasrohr gelangt, ist eine Beruhigung des Abwasserstroms notwendig, damit sich Ablagerungen bilden können. Dies wurde praktisch umgesetzt, indem die Plexiglasrohre an einen Vorlagebehälter, bestehend aus einem senkrechten, etwa einen Meter langen Kunststoffrohr mit DN 300, angeschlossen wurden (Bild 5.7). In diesem Vorlagebehälter wurde der Zuleitungsschlauch aus dem Verteilerrohr bis auf den Grund geführt, so dass das Abwasser langsam aufstieg und nahezu frei von Turbulenzen in das Plexiglasrohr floss. Damit es bei geringen Trockenwetterabflüssen nicht zu übermäßiger Sedimentation im Vorlagebehälter kam, wurden zusätzlich austauschbare Einsätze geringeren Querschnitts, bspw.

DN 100 konstruiert, um zu gewährleisten, dass die Sinkgeschwindigkeit (siehe Pisano, 1996) der Feststoffe die Fließgeschwindigkeit nicht übersteigt.

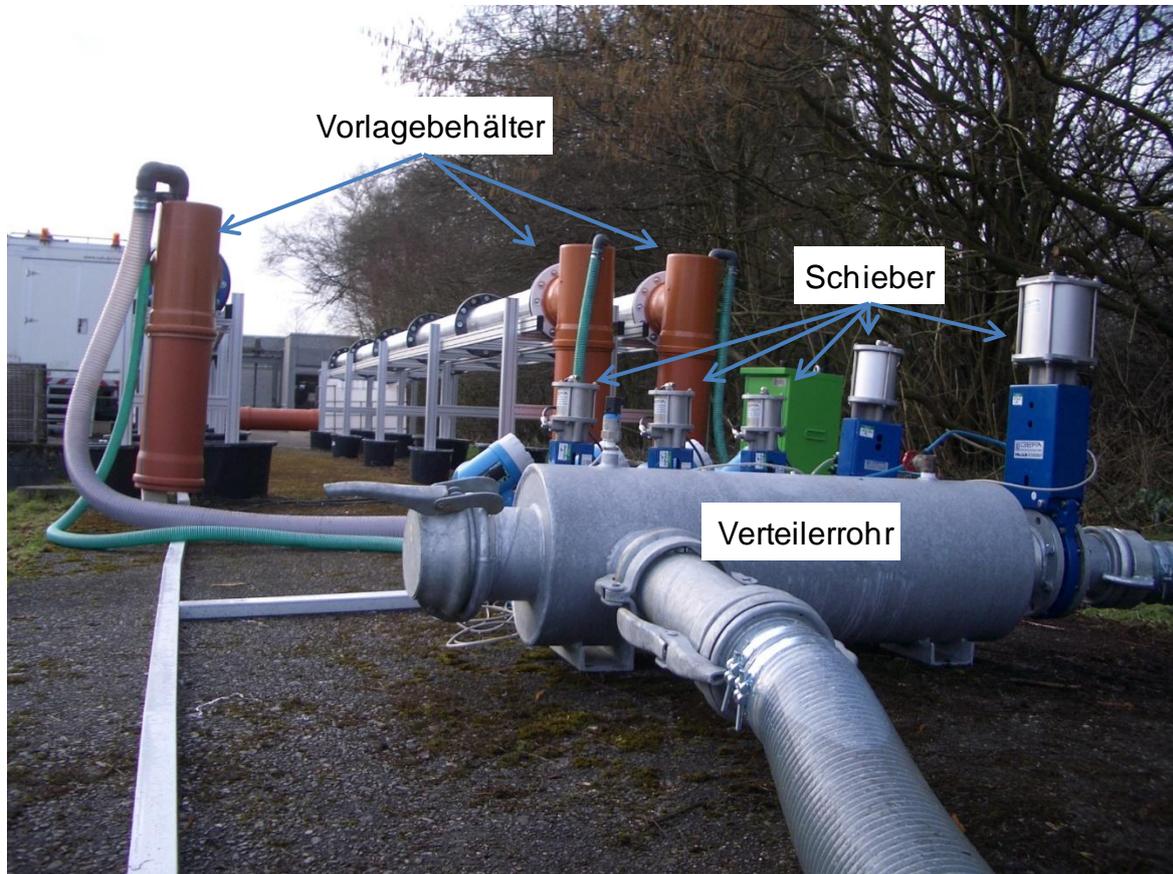


Bild 5.7: Verteilerrohr mit Schiebern (im Vordergrund) und Vorlagebehälter (braune Rohre im Hintergrund)

5.1.1.6 Anlagensteuerung

Die Steuerung der Versuchsanlage erfolgte über eine speicherprogrammierbare Steuerung (SPS), das WAGO-I/O-System 750 der WAGO Kontakttechnik GmbH. Programmiert wurde die Steuerung mit der Software InTouch der Wonderware GmbH. Diese Software ermöglicht es, an jeden Anwendungsfall angepasste Benutzeroberflächen zu erstellen. Bild 5.8 zeigt die zur Steuerung der Versuchsanlage hauptsächlich verwendete Benutzeroberfläche, auf der die gewünschten Abflüsse eingegeben und die wichtigsten Werte abgelesen werden können. Weitere Benutzeroberflächen wurden programmiert, um zusätzliche Details ablesen oder gespeicherte Daten betrachten und auslesen zu können.

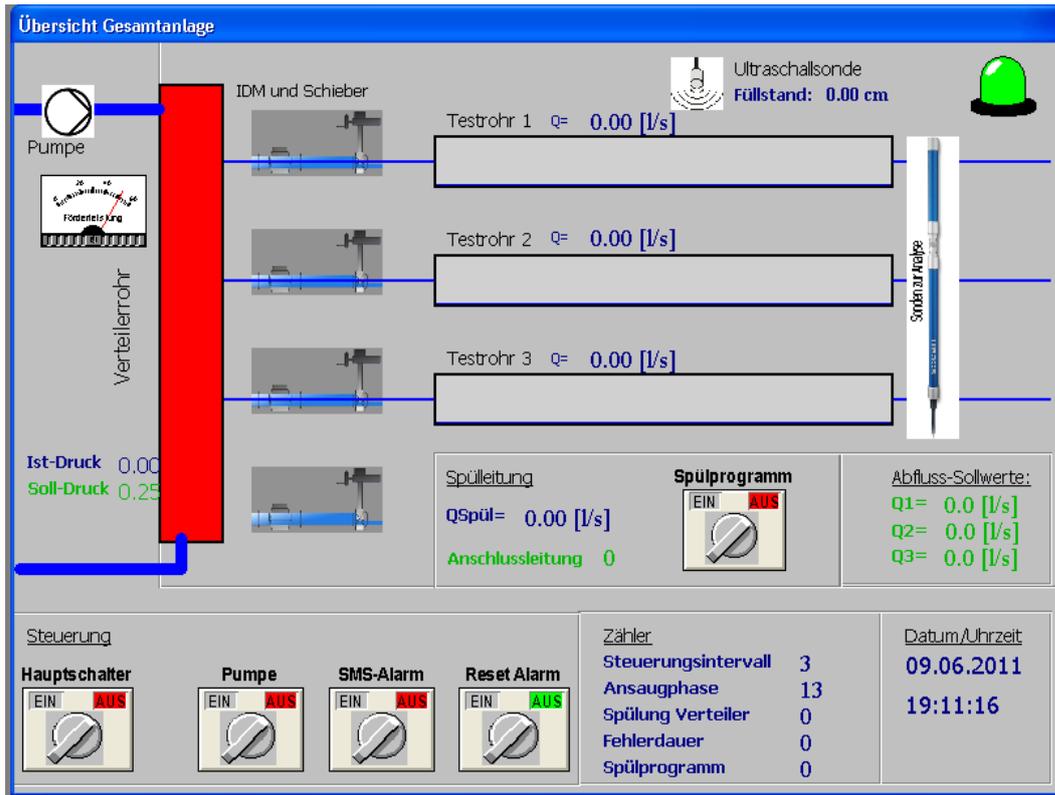


Bild 5.8: Steuerung der Kanalteststrecke über InTouch, Hauptfenster

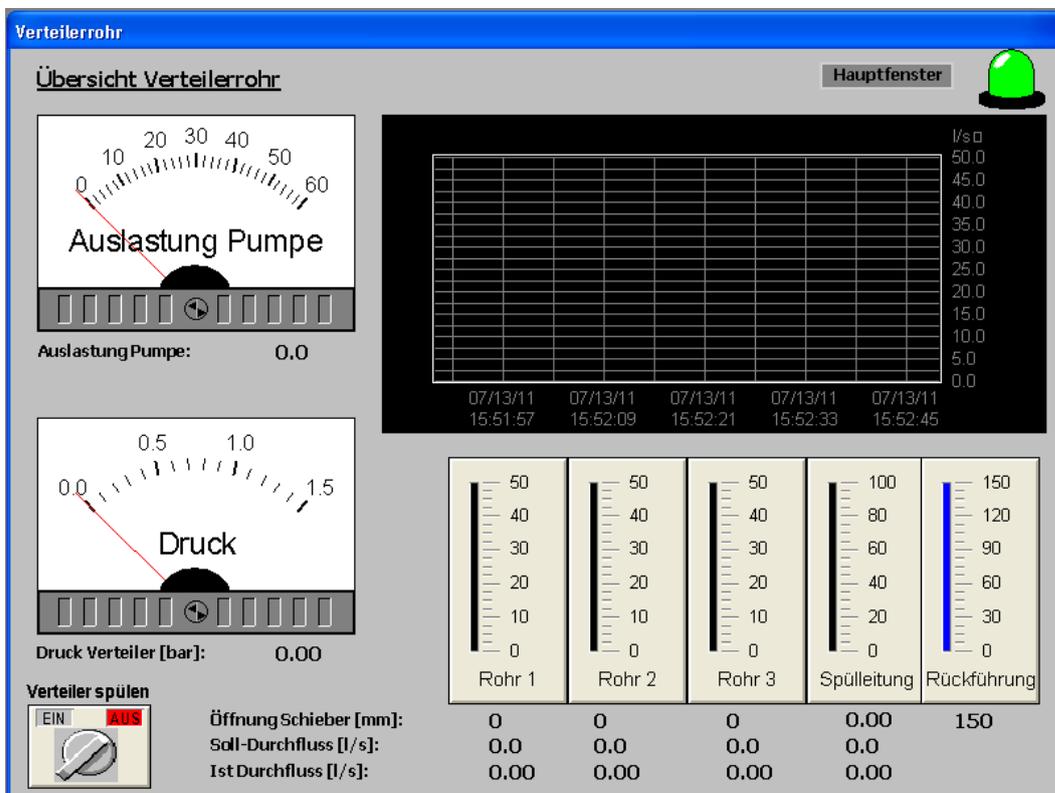


Bild 5.9 Steuerung der Kanalteststrecke über InTouch, Übersicht Verteilerrohr

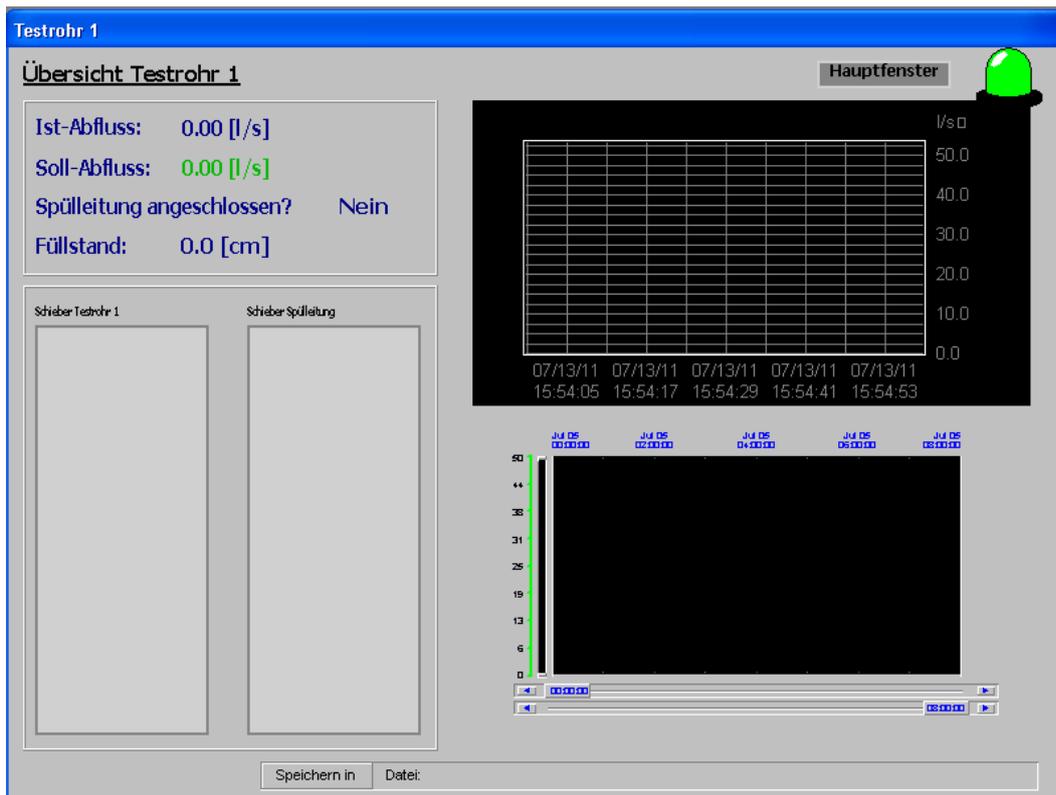


Bild 5.10: Steuerung der Kanalteststrecke über InTouch, Übersicht Testrohr1

Da sich der Druck im Verteilerrohr durch den verstopfungsbedingten Leistungsabfall der Pumpe und variable Abflussmengen in den einzelnen Testrohren ständig ändert, muss die Steuerung permanent die Soll- mit den Ist-Abflüssen abgleichen und die Schieberöffnungen anpassen. Um starke Abflussschwankungen in den Testrohren zu vermeiden, darf die Regelung nicht zu grob erfolgen, da es sonst ggf. zu ungewollten Schwallwellen im Testrohr kommen könnte. Umgekehrt darf die Regelung nicht zu kleinschrittig erfolgen, damit die gewünschten Abflüsse zügig erreicht werden. Durch eine Programmierung, die die Differenz des Soll-Abflusses zum Ist-Abfluss unter Berücksichtigung der aktuellen Schieberöffnung ins Verhältnis stellt zum theoretischen Maximalabfluss bei Vollöffnung, konnte eine schnelle Annäherung an den Sollwert erreicht werden.

$$Q_{Soll} > Q_{Ist}: \quad S_{Soll} = S_{Ist} + \frac{(S_{max} - S_{Ist}) \cdot (Q_{Soll} - Q_{Ist})}{f \cdot Q_{max}} \quad \text{in mm} \quad (5.1)$$

$$Q_{Soll} < Q_{Ist}: \quad S_{Soll} = S_{Ist} + \frac{S_{Ist} \cdot (Q_{Soll} - Q_{Ist})}{f \cdot Q_{max}} \quad \text{in mm} \quad (5.2)$$

Mit: S_{Soll} : Soll-Öffnungsweite des Schiebers in mm

S_{Ist} : Ist-Öffnungsweite des Schiebers in mm

S_{\max} : maximale Öffnungsweite des Schiebers in mm

Q_{Soll} : Soll-Abfluss in L/s

Q_{Ist} : tatsächlicher Abfluss in L/s

Q_{\max} : Abfluss bei maximaler Schieberöffnung (abhängig vom Druck) in L/s

f : Faktor zur Steuerung der Annäherungsgeschwindigkeit

Multipliziert man in dieser Gleichung den maximalen Abfluss Q_{\max} mit einem Faktor f , lässt sich darüber die Größe der Annäherungsschritte variieren. Bei Werten von f größer als 1 werden die Änderungen der Schieberöffnung verkleinert, was sinnvoll sein ist, wenn der Ist-Abfluss Q_{Ist} kleiner ist als der Soll-Abfluss Q_{Soll} . Auf diese Weise wird vermieden, dass der Schieber zu weit öffnet und der Soll-Abfluss den Ist-Abfluss deutlich überschreitet. Dies hätte einen ungewollten Austrag der Sedimente zur Folge. Sollte Q_{Ist} dennoch größer sein als Q_{Soll} , empfiehlt es sich, den Faktor f kleiner als 1 zu wählen, damit der Ist-Abfluss Q_{Ist} möglichst schnell wieder unter den Soll-Abfluss Q_{Soll} absinkt. In Bild 5.11 wird deutlich, wie sich die unterschiedliche Werte für f auf die Größe der Annäherungsschritte auswirken.

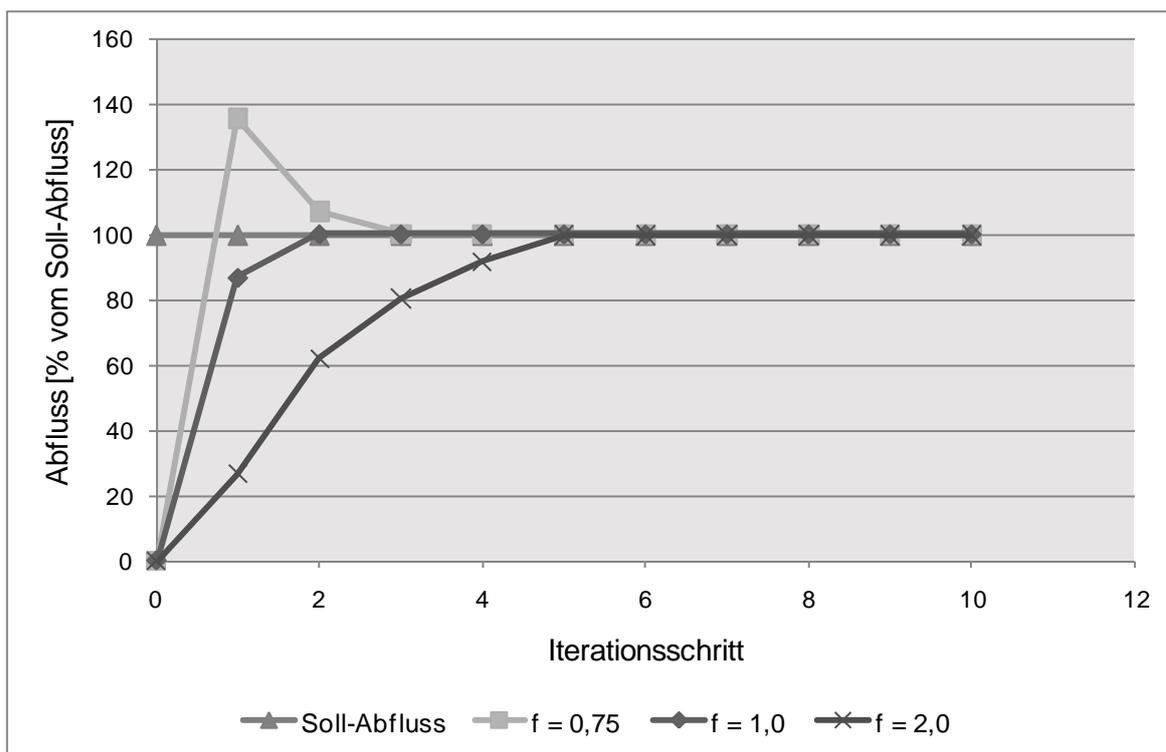


Bild 5.11: Beispielhafte Annäherung von Ist- und Soll-Abfluss für unterschiedliche Annäherungsgeschwindigkeiten (ohne Messwerte)

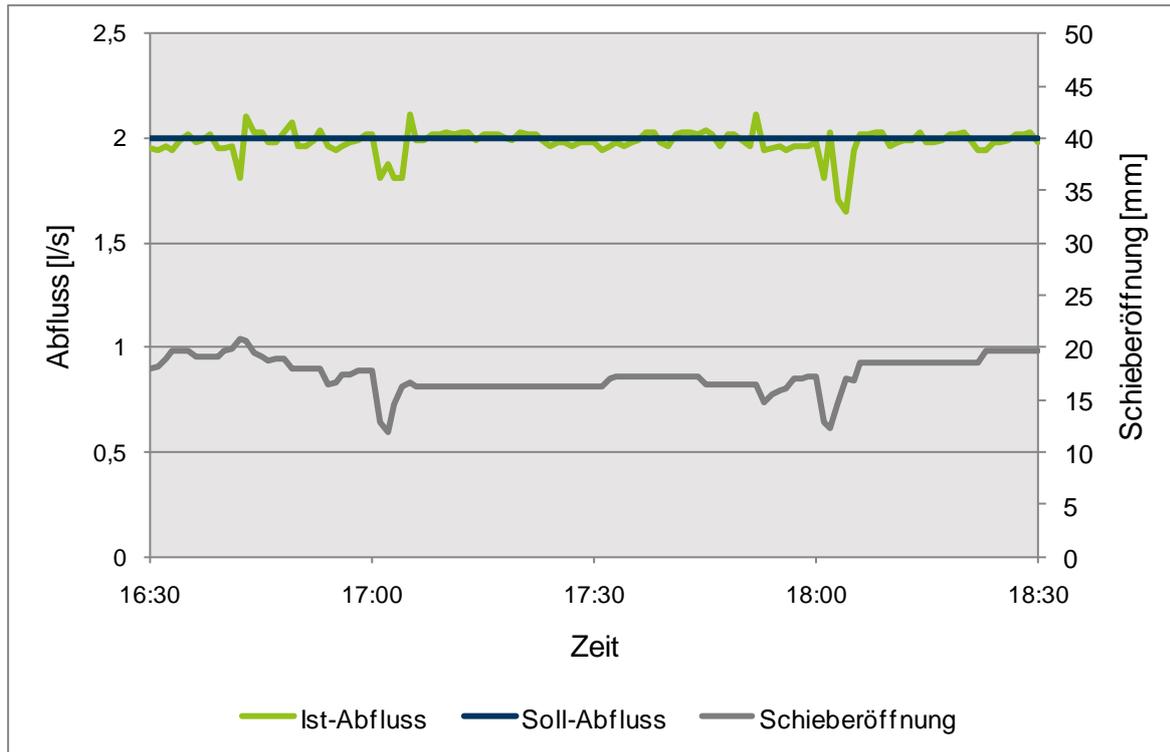


Bild 5.12: Abfluss bei konstantem Soll-Abflüsse, leichte Abflussschwankungen bedingt durch Druckänderungen im Verteilerrohr (Schieber DN50), (Versuchsreihe 10, $Q=2$ L/s, $I_S=1$ ‰, $k=0,4$ mm, $\tau=0,3$ N/m²)

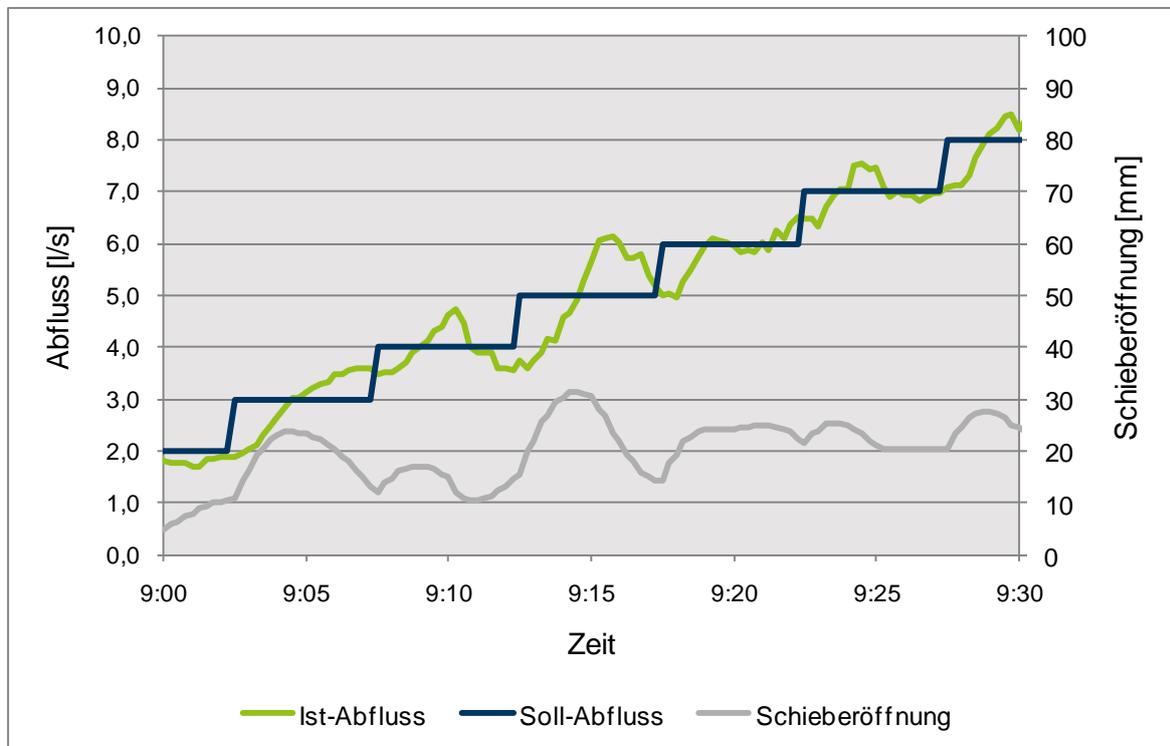


Bild 5.13: Schieberöffnung und Ist-Abfluss für einen sukzessive anwachsenden Soll-Abfluss (Schieber DN100) (Versuchsreihe 10, $I_S=1$ ‰, $k=0,4$ mm)

Generell näherte sich in den Versuchen der Ist-Abfluss Q_{Ist} dem Soll-Abfluss Q_{Soll} gut an, insbesondere dann, wenn Q_{Soll} nicht variiert wird und konstante Randbedingungen herrschen (Bild 5.12). Wird der Soll-Abfluss Q_{Soll} häufig verändert, ist der Ist-Abfluss Q_{Ist} aufgrund der trägen Regelung zeitlich verzögert (Bild 5.13). In Bild 5.13 ist zudem sehr gut zu erkennen, dass Schieberöffnung und vorhandener Abfluss bedingt durch Druckschwankungen nicht zwangsweise miteinander korrelieren.

Da der Motor der verwendeten Pumpe eine Nennleistung von 18,5 kW hat, wurde ein Frequenzumrichter (Mitsubishi, FR-F 740-00380-EC) eingesetzt der es ermöglichte, die Förderleistung der Pumpe den benötigten Abflüssen anzupassen. Der Verbrauch elektrischer Energie konnte somit von theoretisch $18,5 \text{ kW} \cdot 24 \text{ h/d} = 444 \text{ kWh/d}$ auf durchschnittlich rund 80 kWh/d gesenkt werden.

5.1.1.7 Messgrößen

In Tabelle 5.3 sind die wichtigsten Parameter, die im Rahmen der Versuche erfasst wurden, zusammengestellt. Während die Parameter Sauerstoff, CSB, AFS, TS, pH-Wert und Leitfähigkeit zur Beschreibung der Abwasserqualität/-zusammensetzung dienen, lag der Fokus der Untersuchungen auf der Bestimmung von Durchfluss und Ablagerungshöhe. Während der Durchfluss hinreichend genau mittels der MID bestimmt wurde, musste eine Möglichkeit gefunden werden, die Ablagerungshöhe im Rohr so genau wie möglich zu erfassen.

Zunächst wurden dazu optische Verfahren, bspw. die regelmäßige Erstellung eines 3D-Profiles mit Hilfe von Laser und Kamera, in Betracht gezogen. Diese Ideen mussten allerdings verworfen werden, da sich bereits bei ersten Versuchen zeigte, dass das Abwasser nie vollständig aus den Rohren abläuft, sondern sich vor Ablagerungen anstaut und so die Ergebnisse der optischen Verfahren, welche nur bis zur Wasseroberfläche messen können, verfälscht. Deshalb wurde auf eine manuelle Messung mittels Messschieber zurückgegriffen, der auf einer Platte montiert wurde, so dass er mittig auf die Ausschnitte in den Plexiglasrohren aufgesetzt werden konnte (Bild 5.15). Da die sorgfältige Messung der Ablagerungshöhen an allen 120 Messpunkten (40 je Rohr, s. Bild 5.14) sehr zeitaufwändig ist, wurde sie nur einmal täglich ausgeführt. Häufigere Messungen wären nicht sinnvoll gewesen, da der Abwasserstrom für die Ablagerungsmessung abgestellt werden musste und somit die Durchströmung der Testrohre häufig unterbrochen gewesen wäre.

Tabelle 5.3: Zusammenstellung der erfassten Messgrößen

Parameter	Art der Erfassung	Messgerät	Messintervall
Durchfluss	Messung durch magnetisch induktive Durchflussmesser (MID) an den Abgängen des Verteilerrohres	Endress + Hauser Promag 50W	1 Sekunde
Fließhöhe	Messung per Ultraschallsonde in einem der Plexiglasrohre	Endress + Hauser, Prosonic FDU80	15 Sekunden
Ablagerungshöhe	Messung an 40 Messpunkten je Testrohr mit Hilfe eines digitalen Messschiebers		1 Tag
Abwassertemperatur	Sonde im Zulauf	WTW Trioxmatic® 700 IQ	15 Sekunden
AFS/TS im Abwasser	Kontinuierliche Messung über Spektrometersonde im Ablauf der Versuchsstrecke	s::can spectro::lyser Hach-Lange SOLITAX	15 Sekunden
CSB im Abwasser	Kontinuierliche Messung über Spektrometersonde	s::can spectro::lyser	15 Sekunden
pH-Wert	Sonde im Zulauf	WTW SensoLyt® 700 IQ	15 Sekunden
Leitfähigkeit	Sonde im Zulauf	WTW TetraCon® 700 IQ	15 Sekunden
Sauerstoff im Abwasser	Sonde im Zulauf	WTW Trioxmatic® 700 IQ	15 Sekunden

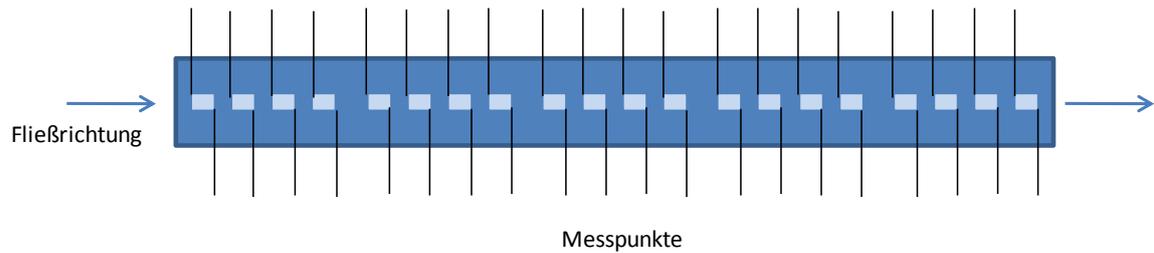


Bild 5.14: Auszug aus dem Messprotokoll für die Ablagerungshöhen, die schwarzen Strich markieren die Messpunkte (Draufsicht)



Bild 5.15: Messschieber

Die Intervalle, in denen die mit Onlinemesstechnik gemessenen Parameter aufgezeichnet wurden, lagen je nach Parameter zwischen 1-15 Sekunden. Die extrem kurzen Intervalle von einer Sekunde wurden jedoch nur von den Durchflussmessgeräten verwendet und waren für die Steuerung der Schieber erforderlich. Im Rahmen der Auswertung wurden Messdaten mit einem Intervall von 15 Sekunden während der RW-Abflüsse bzw. 60 Sekunden während der TW-Abflüsse betrachtet.

5.1.2 Versuchsprogramm

Die im Rahmen der Phase I des Forschungsprojektes durchgeführten Versuchsreihen sind in Tabelle 5.4 aufgeführt. Der Großteil der Versuchsreihen (ausgenommen Versuchsreihe 15 und 18) wurde mit einem Gefälle von $I_S=1\text{ ‰}$ und einem Abfluss $Q=2\text{ L/s}$ durchgeführt. Dies entspricht unter Annahme einer betrieblichen Rauheit von $k_b = 0,75$ einer Sohlschubspannung von rund $0,3\text{ N/m}^2$. Damit wird der vom Arbeitsblatt DWA-A 110 (DWA, 2006) empfohlene Grenzwert einer Mindestsohlschubspannung von $\tau=1,0\text{ N/m}^2$ unterschritten, dessen Einhaltung weitestgehend ablagerungsfreie Kanäle gewährleisten soll. Durch diese in der Praxis zwar suboptimalen, jedoch aufgrund von topographischen Gegebenheiten und Ungenauigkeiten bei der baulichen Ausführung dennoch auch in NRW vorkommenden Randbedingungen, wurde sichergestellt, dass es in den Versuchsrohren zur Ablagerungsbildung kam. Die Variation der Dauern der Ablagerungsbildung zwischen den einzelnen Versuchsreihen diente dazu, Zusammenhänge zwischen Erosionswiderstand und Alter der Ablagerungen herzustellen. Hierfür wurde nach Ablauf der simulierten Trockenwetterphase, in der sich Ablagerungen bildeten, innerhalb weniger Stunden der Abfluss kontinuierlich gesteigert und beobachtet, wann sich die Ablagerungen lösen.

Nach einer solchen Spülphase wurden die Rohre komplett gereinigt und mit neuem Schleifpapier beklebt, damit zu Beginn jeder Versuchsreihe die gleichen Bedingungen herrschten.

Tabelle 5.4: Bisher abgeschlossene Versuchsreihen (Stand 01.12.2011)

Bezeichnung	Dauer [d]	Gefälle [‰]	Abfluss [L/s]	äquivalente Sandrauheit [mm]
Versuchsreihe 1	1	1	2	0,4
Versuchsreihe 2	1	1	2	0,4
Versuchsreihe 3	2	1	2	0,4
Versuchsreihe 4	3	1	2	0,4
Versuchsreihe 5	3	1	2	0,4
Versuchsreihe 6	4	1	2	0,4
Versuchsreihe 7	4	1	2	0,4
Versuchsreihe 8	5	1	2	0,4
Versuchsreihe 9	5	1	2	0,4
Versuchsreihe 10	6	1	2	0,4
Versuchsreihe 11	7	1	2	0,4
Versuchsreihe 12	7	1	2	0,4
Versuchsreihe 13	10	1	2	0,4
Versuchsreihe 14	14	1	2	0,4
Versuchsreihe 15	14	2,5	2	0,4
Versuchsreihe 16	28	1	2	0,4
Versuchsreihe 17	56	1	2	0,4
Versuchsreihe 18	28	2,5	2	0,4
Versuchsreihe 19	28	1	4	0,4
Versuchsreihe 20	150	1	2	0,4
Versuchsreihe 21	28	5	2	0,4
Versuchsreihe 22	28	1	1	0,4
Versuchsreihe 23	28	1	Tagesgang	0,4
Versuchsreihe 24	28	5	1	0,4
Versuchsreihe 25	28	1	Tagesgang	0,4
Versuchsreihe 26	28	1	2	0,1
Versuchsreihe 27	28	1	2	0,635
Versuchsreihe 28	28	7,5	2	0,4
Versuchsreihe 29	28	10	2	0,4
Versuchsreihe 30	28	5	4	0,4
Versuchsreihe 31	28	1	8	0,4

5.1.3 Auswertung und Ergebnisse

Zu Beginn der Versuchsphase war von großem Interesse, wie sich die Ablagerungsbildung in den Testrohren vollzieht und ob ausreichend Feststoffe bis in die

Testrohre transportiert werden und dort sedimentieren. Schon unmittelbar nach Inbetriebnahme konnte festgestellt werden, dass Feststoffe verschiedenster Art (von Sandkörnern bis hin zu Putzlappen) in und durch die Plexiglasrohre transportiert wurden. Da, wie bereits unter Kapitel 5.1.1 erwähnt, die äquivalente Sandrauheit der Plexiglasrohre sehr gering ist, kam es in den zunächst nicht ausgekleideten Rohren nur zu einer sehr geringen Ablagerungsbildung. Hauptbestandteil dieser Ablagerungen waren feine mineralische Stoffe (Bild 5.16).

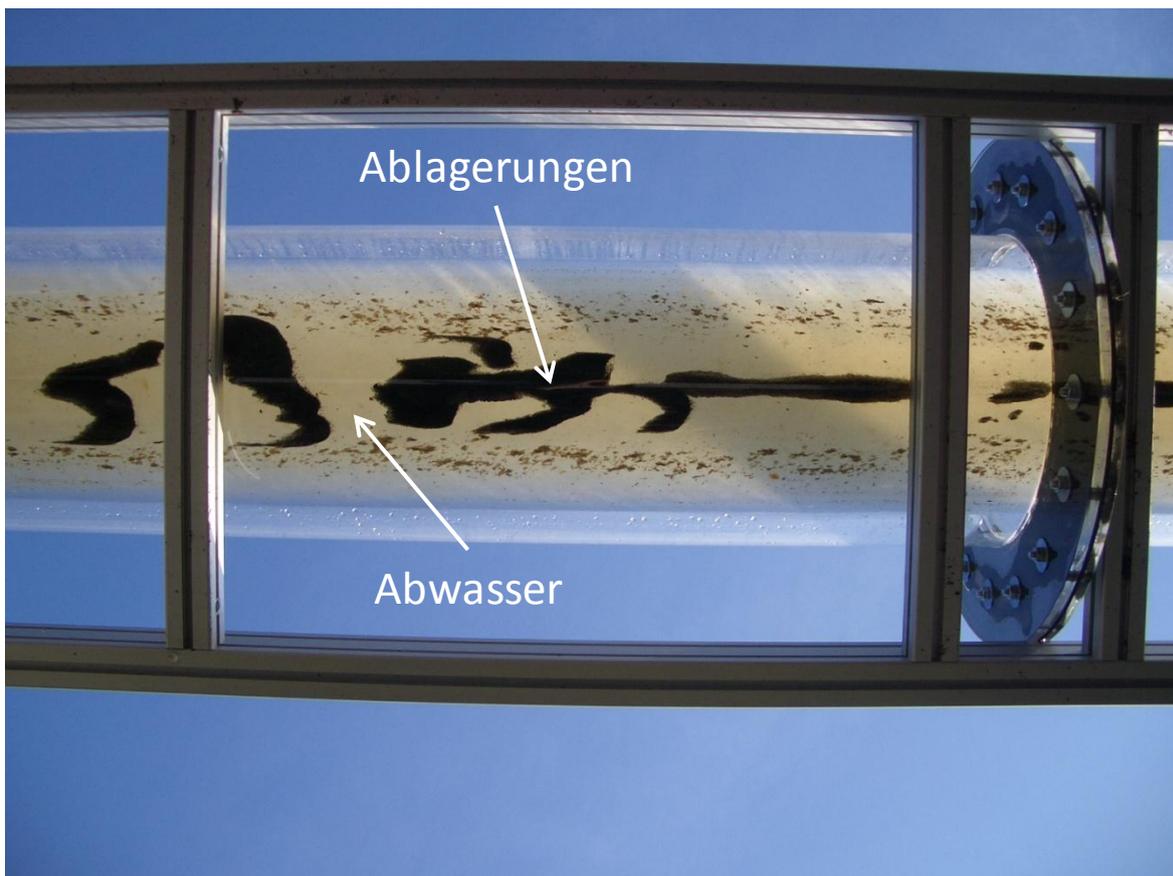


Bild 5.16: Ablagerungsbildung in einem glatten Plexiglasrohr nach einem Tag ($Q=2 \text{ L/s}$, $I=1 \text{ ‰}$, $k_S \approx 0,0015 \text{ mm}$), von unten aufgenommen

Versuche mit Sandpapier zeigten im Gegensatz dazu signifikante Unterschiede in der Ablagerungsbildung. So lagerten sich in den Abschnitten, die mit Sandpapier ausgekleidet waren, deutlich mehr Feststoffe ab, die sich nicht allein aus mineralischen Bestandteilen, sondern auch aus Organik und Faserstoffen zusammensetzten (Bild 5.17). Durch die verminderte Fließgeschwindigkeit im Bereich der durch das Sandpapier erhöhten äquivalenten Sandrauheit kam es zudem zu einer vermehrten Ablagerungsbildung vor diesen Bereichen (Bild 5.18).



Bild 5.17: Ablagerungen auf Sandpapier nach zwei Tagen ($Q=2$ L/s, $I_S=1$ ‰, $k_S=0,4$ mm, $\tau=0,3$ N/m²)



Bild 5.18: Ablagerungsbildung mit (links) und ohne (rechts) Sandpapier bei ansonsten gleichen Randbedingungen ($Q=2$ L/s, $I_S=1$ ‰), Fließrichtung von unten nach oben

Diese Beobachtungen wurden durch die Messungen der Ablagerungshöhen bestätigt. In Bild 5.19 ist deutlich zu erkennen, wie die Ablagerungshöhen nach vier Metern, also bei Beginn der erhöhten äquivalenten Sandrauheit, deutlich anstei-

gen. Dass die Ablagerungen im glatten Bereich nach sechs Metern sehr hohe Werte aufweisen, ist darauf zurückzuführen, dass Faserstoffe, die sich am rauen Sandpapier verhakt hatten, bis in das folgende glatte Rohr reichten. Generell zeigte sich, dass Faserstoffe einen großen Einfluss auf die Ablagerungsmessungen haben, da sie verglichen mit den mineralischen oder anderen organischen Sedimenten oft sehr voluminös sind. Da sie häufig aus dem Abwasserstrom herausragen und das Strömungsbild beeinflussen, begünstigen sie die Bildung weiterer Ablagerungen, die in ihrem Strömungsschatten sedimentieren.

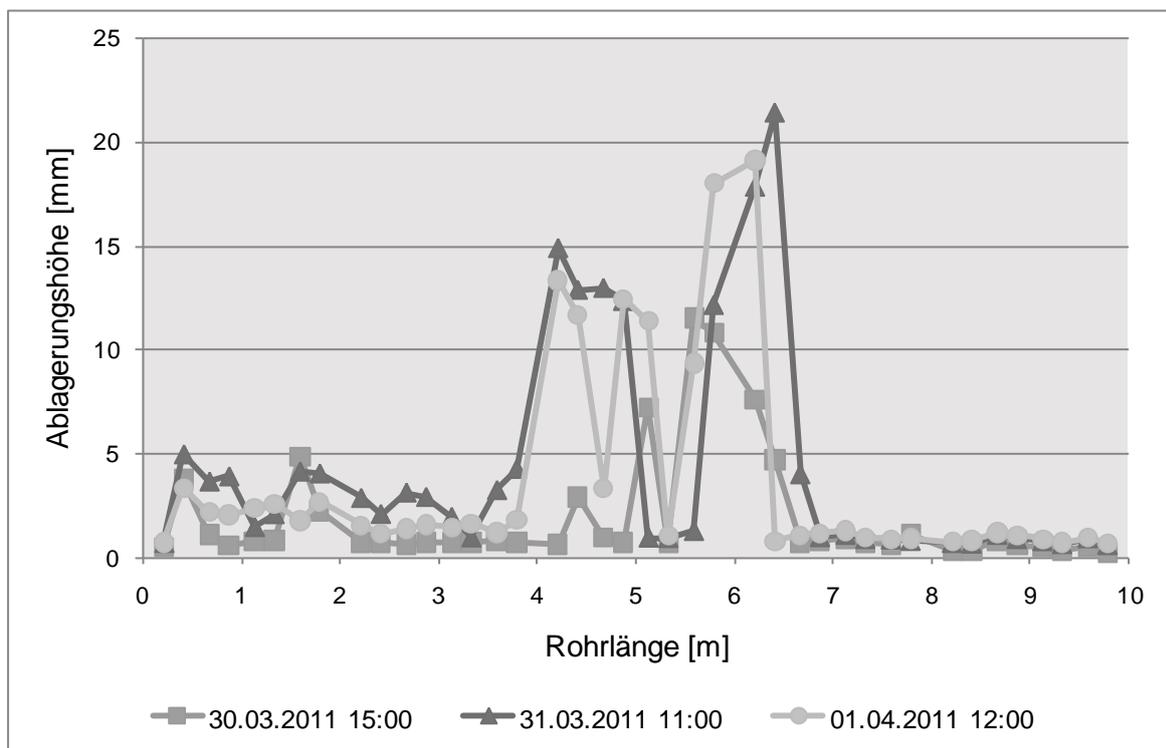


Bild 5.19: Ablagerungshöhen über die Rohrlänge, Auskleidung mit Sandpapier im Bereich von Meter 4 bis 6 ($Q=2$ L/s, $I_s=1$ ‰, $k_s=0,4$ mm)

Angesichts der in den Vorversuchen beobachteten guten Eignung des Sandpapiers zur Erhöhung der äquivalenten Sandrauheit der Testrohre, wurden diese in den folgenden Versuchen komplett mit Sandpapier ausgekleidet.

5.1.3.1 Verlauf der Ablagerungsbildung

Da sich einzelne Ablagerungshöhen nur schwer für die Auswertung der zeitlichen Entwicklung der Ablagerungen verwenden lassen, wurden aus den punktuellen Ablagerungshöhen Ablagerungsmengen für das gesamte Testrohr berechnet. Da-

zu wurde zunächst mit Gleichung (5.3) die Querschnittsfläche der Ablagerung an der Stelle der Ablagerungsmessung bestimmt.

$$A_i = r^2 \cdot \cos^{-1} \left(1 - \frac{h_i}{r} \right) - \sqrt{2 \cdot r \cdot h_i - h_i^2} \cdot (r - h_i) \quad \text{in m}^2 \quad (5.3)$$

Mit: A_i : Querschnittsfläche der Ablagerungen am Messpunkt i in m^2

r : Radius des Rohres in m

h_i : Ablagerungshöhe am Messpunkt i in m

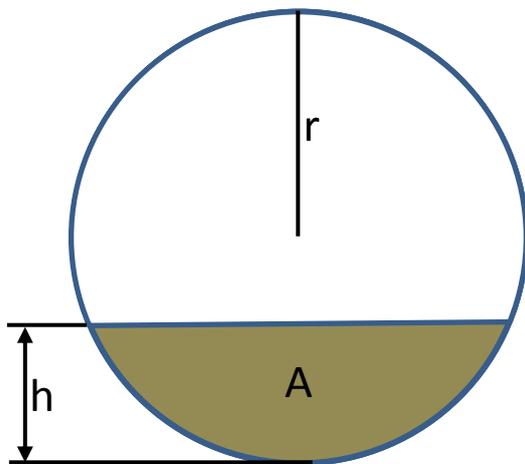


Bild 5.20: Idealisierte Querschnittsfläche der Ablagerungen

Zur Berechnung der Ablagerungsmenge wurden die einzelnen Querschnittflächen mit den zugehörigen Rohrlängen multipliziert:

$$V_{ges} = \sum A_i \cdot l_i \quad \text{in m}^3 \quad (5.4)$$

Mit: V_{ges} : Volumen der Ablagerungen im gesamten Rohr in m^3

l_i : Länge des zum Messpunkt i gehörigen Rohrabschnitts in m

Der Verlauf der Ablagerungsmengen über die Versuchsdauer von 30 Tagen ist für die Messwerte der Versuchsreihen 11, 13, 14, 16, 17 und 20 in Bild 5.21 exemplarisch dargestellt. Die Streuung der Messwerte spiegelt die auch in realen Kanalnetzen zu beobachtende Dynamik der Ablagerungsmengen wider. So konnten vereinzelt bereits in den ersten Tagen einer Versuchsreihe erhebliche Ablagerungsmengen in den Testrohren gemessen werden. Insgesamt zeigte sich, dass die Ablagerungsmengen in den ersten 30 Tagen der Versuchsreihen kontinuierlich stiegen. Das Einstellen eines Gleichgewichtszustandes, der durch ein Abflachen

der Kurve in Bild 5.21 gekennzeichnet wäre, ist bei der gleichzeitigen Betrachtung mehrerer Versuchsreihen innerhalb von 30 Tagen nicht zu erkennen.

Grund hierfür kann neben den sich überlagernden Schwankungen der einzelnen Ablagerungsverläufe der kurze Beobachtungszeitraum von nur 30 Tagen sein. Dass die Ablagerungsmengen nicht unbegrenzt anwachsen, ist in Bild 5.22 zu erkennen, welches die Ablagerungsmengen der längsten durchgeführten Versuchsreihe (Versuchsdauer 150 Tage) zeigt. Nachdem die Ablagerungsmengen rund 70 Tage lang weitgehend kontinuierlich angestiegen sind, nehmen sie anschließend wieder ab und scheinen in einem Bereich von 40-50 L Sediment verteilt auf die 10 Meter Versuchrohr zu stagnieren. Dies beweist, dass es in Kanälen ein stetiges Wechselspiel von Sedimentation und Erosion gibt, welches maßgeblich durch die herrschenden Witterungsverhältnisse beeinflusst wird. Die täglichen Änderungen der Ablagerungsmengen in den Versuchsröhrchen sind während des beobachteten Zeitraumes weitgehend konstant (Bild 5.23). Aufgrund dieser Schwankungen ist es naheliegend, dass Ablagerungen in Kanälen bereits nach wenigen Wochen oder Monaten ein Maß erreichen, welches langfristig nur noch unwesentlich überschritten wird. Zur Validierung dieser These bedarf es weiterer Langzeitversuche mit Versuchsdauern von mindestens 6 Monaten.

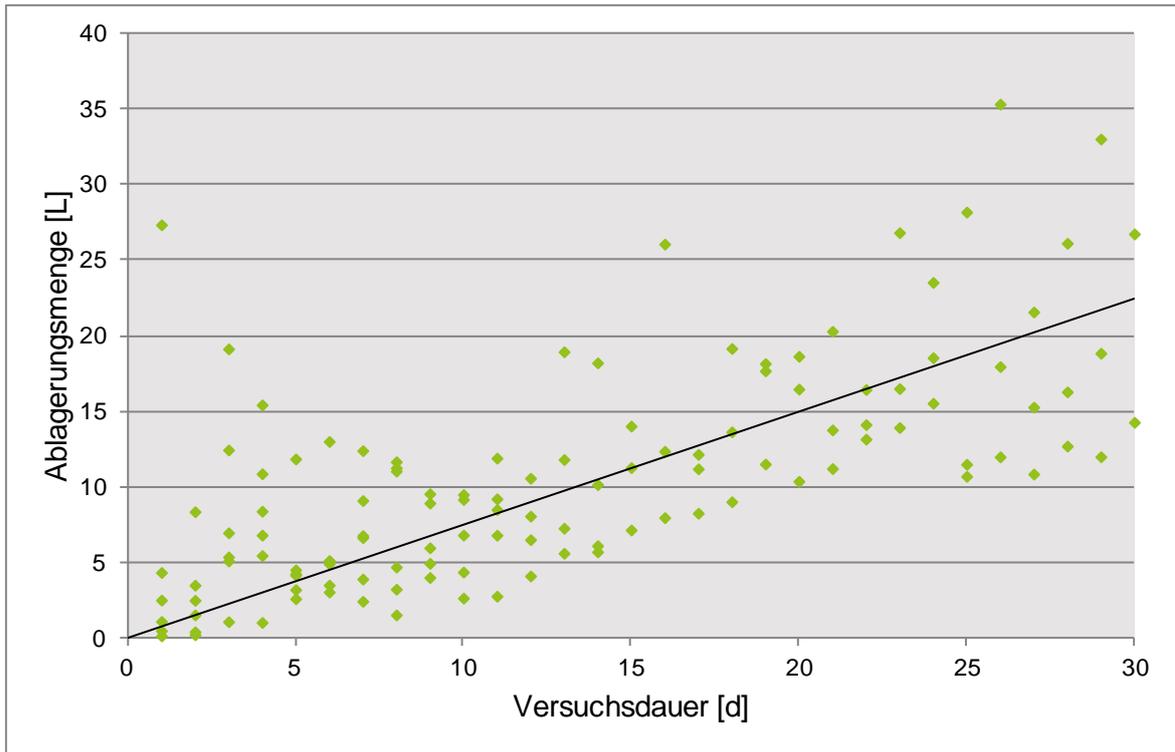


Bild 5.21: Entwicklung der Menge aller Ablagerungen im Testrohr (Versuchsreihen 11, 13, 14, 16, 17 und 20, $Q=2$ L/s, $I_S=1,0$ ‰, $k_S=0,4$ mm)

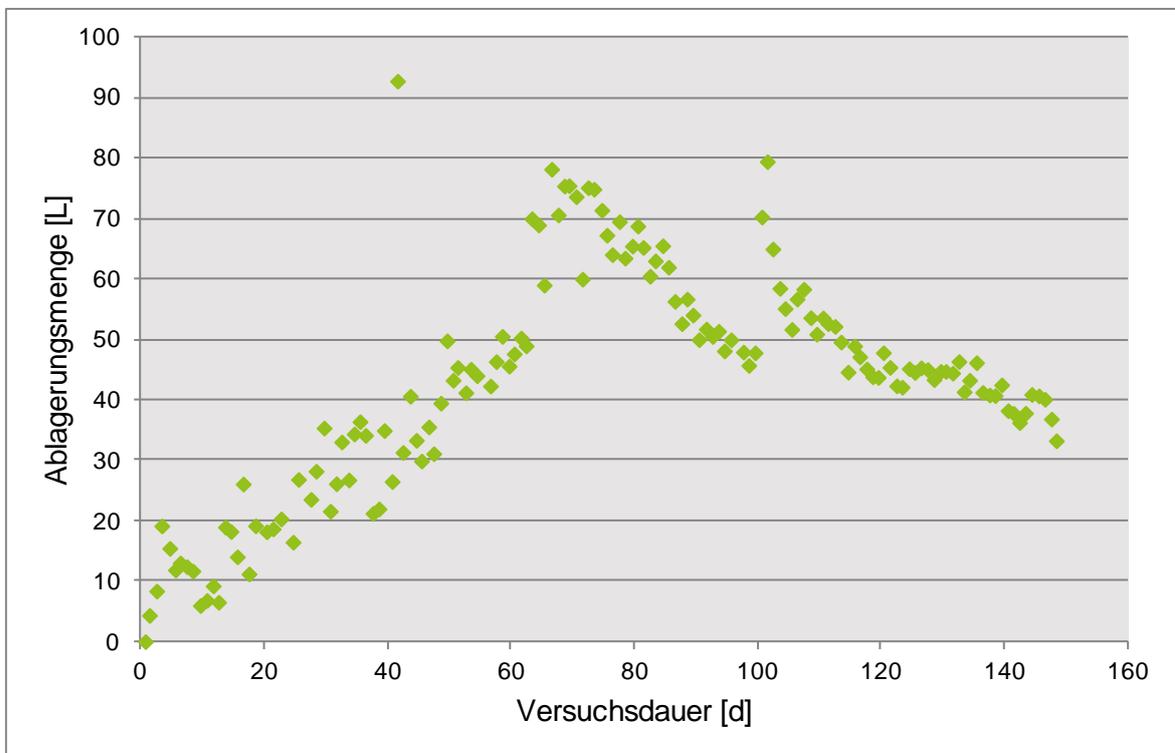


Bild 5.22: Entwicklung der Menge aller Ablagerungen im Testrohr (Versuchsreihe 20, $Q=2$ L/s, $I_S=1$ ‰, $k_S=0,4$ mm)

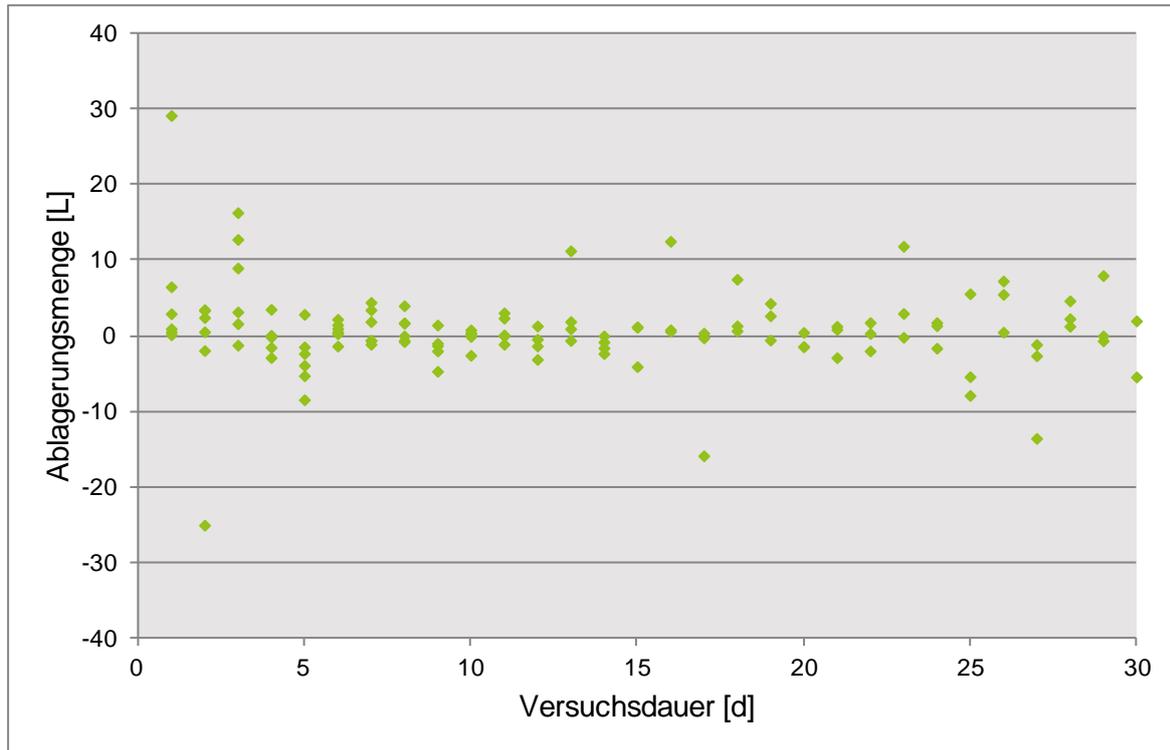


Bild 5.23: tägliche Änderung der Menge aller Ablagerungen im Testrohr in Abhängigkeit der Versuchsdauer (Versuchsreihen 11, 13, 14, 16, 17 und 20, $Q=2$ L/s, $I_S=1$ ‰, $k_S=0,4$ mm)

Im Folgenden wird auf den Einfluss der Variation von Randbedingungen wie Gefälle, äquivalenter Sandrauheit und Durchfluss eingegangen. Bei den bisher durchgeführten Versuchen mit unterschiedlichen Randbedingungen handelt es sich um Vorversuche, die nicht Bestandteil der bisher bewilligten ersten Phase (Phase I) des diesem Bericht zugrunde liegenden Forschungsprojektes sind. Eine umfassendere Auseinandersetzung mit dieser Thematik ist im Falle einer Bewilligung durch den Fördermittelgeber (MKULNV) NRW in einer zweiten Projektphase (Phase II) geplant.

5.1.3.2 Einfluss von Gefälle, äquivalenter Sandrauheit und Durchfluss auf die Ablagerungsbildung

Die Vorversuche zum Einfluss der Variation von Gefälle, äquivalenter Sandrauheit und Durchfluss auf die Ablagerungsbildung dienten dazu, eine erste Einschätzung zu gewinnen, wie sensibel die Ablagerungsdynamik auf diese Veränderungen der Randbedingungen reagiert.

Eine Erhöhung des Gefälles führt im Allgemeinen zu einer Erhöhung der Fließgeschwindigkeit und somit zu größeren Sohlschubspannungen, so dass mit einer geringeren Ablagerungsbildung zu rechnen ist. Aus der Gegenüberstellung der

Ablagerungsverläufe der durchgeführten Versuchsreihen mit unterschiedlichen Sohlgefällen wird dieser Zusammenhang allerdings nicht deutlich. Erwartungsgemäß sind die Ablagerungsmengen bei einem Sohlgefälle von $I_S=1\%$ geringer als bei den niedrigeren Sohlgefällen $I_S=0,5\%$ und $I_S=0,25\%$. Widersprüchlich ist jedoch, dass für das geringste Sohlgefälle von $I_S=0,1\%$ entgegen der Erwartung die geringsten Ablagerungsmengen gemessen wurden. Diese Beobachtung ist darauf zurückzuführen, dass bspw. die durch Niederschlagsereignisse bedingten Schwankungen der Abwasserzusammensetzung, einen größeren Einfluss auf die Ablagerungsdynamik haben als das Sohlgefälle. Auf den Einfluss von Niederschlägen auf die Versuchsergebnisse wird auf den Seiten 97ff detaillierter eingegangen.

Bei der Variation der äquivalenten Sandrauheit wurden ein ähnlicher Einfluss des Regens auf die Ergebnisse beobachtet. Wird die äquivalente Sandrauheit erhöht, sinkt die Fließgeschwindigkeit ab. Bedingt durch den höheren Wasserstand und somit den größeren hydraulischen Radius sollte es nach Gleichung (3.7) zu einer leichten Erhöhung der Schubspannung kommen. Bei den praktischen Versuchen tritt die größte Ablagerungsbildung bei der niedrigsten äquivalenten Sandrauheit ($k_S=0,1\text{ mm}$) auf, obwohl hier die Fließgeschwindigkeiten am größten sind (Bild 5.25). Die erhebliche Differenz in den Ablagerungshöhen gegenüber den übrigen Versuchsreihen lässt darauf schließen, dass diese Versuchsreihe maßgeblich durch niederschlagsbedingte Schwankungen der Abwasserzusammensetzung beeinflusst wurde (s. Seiten 97ff). Das Ergebnis eines geringen Einflusses der Wandrauheit auf die Ablagerungsbildung deckt sich weitgehend mit den Aussagen der Literatur, wonach äquivalente Sandrauheit und Oberflächenstruktur von Kanalarohren nur einen untergeordneten Einfluss auf die Ablagerungsbildung besitzen (Staufer, 2009).

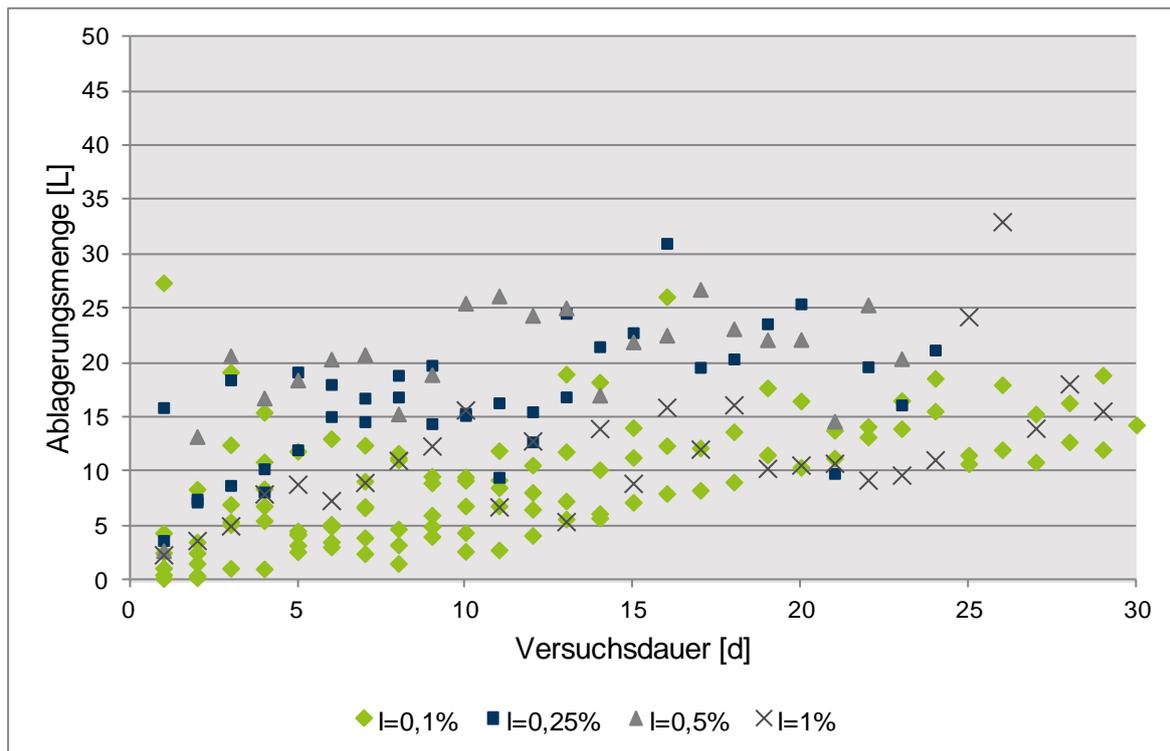


Bild 5.24: Entwicklung der Menge aller Ablagerungen im Testrohr bei unterschiedlichen Rohrgefällen (Versuchsreihen 11, 13-18, 20 und 21, $Q=2$ L/s, $k_s=0,4$ mm)

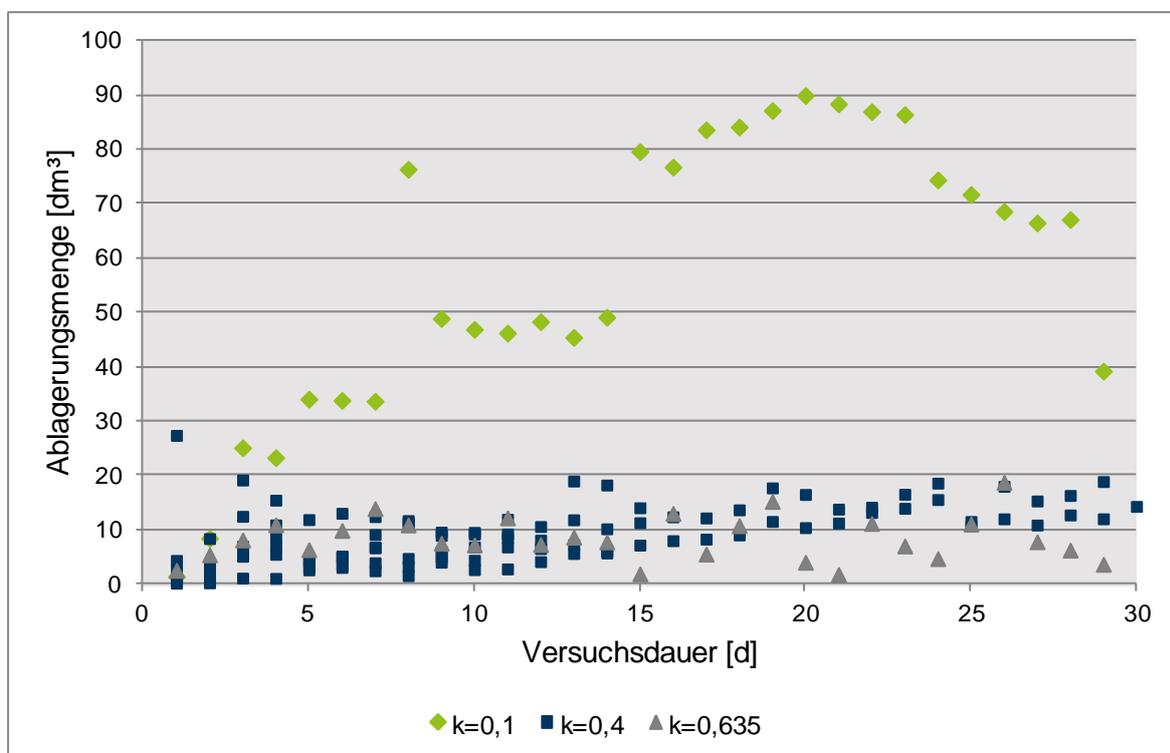


Bild 5.25: Entwicklung der Menge aller Ablagerungen im Testrohr bei unterschiedlichen äquivalenten Sandrauheiten (Versuchsreihen 11, 13, 14, 16, 17, 20 und 26-27, $Q=2$ L/s, $I_S=1$ ‰)

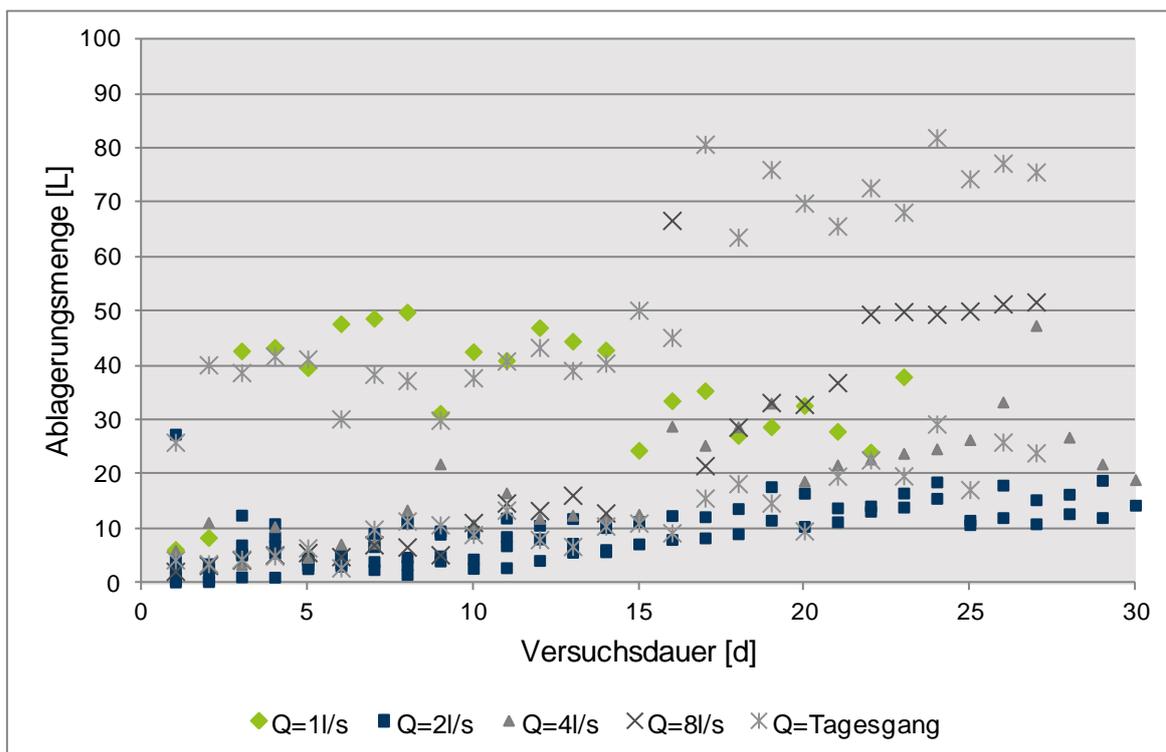


Bild 5.26: Entwicklung der Menge aller Ablagerungen im Testrohr bei unterschiedlichen Abflussmengen (Versuchsreihen 11, 13, 14, 16, 17, 19, 20, 22, 23, 25 und 31, $I_s=1\text{‰}$, $k=0,4\text{ mm}$)

Besonders auffällig ist, dass ein erhöhter Abfluss und damit erhöhte Schubspannungen nicht zwangsläufig zu weniger Ablagerungen führen. Zusätzlich zu den Versuchsreihen mit dem Standardabfluss von $Q=2\text{ L/s}$ wurden Versuchsreihen mit $Q=1\text{ L/s}$, $Q=4\text{ L/s}$ und $Q=8\text{ L/s}$ sowie einer Tagesganglinie, deren Mittelwert $Q=2\text{ L/s}$ entsprach, durchgeführt. Die größten Ablagerungsmengen bildeten sich bei diesen Versuchen bei der Versuchsreihe mit $Q=1\text{ L/s}$ (Bild 5.26). Dieses Ergebnis wäre theoretisch zu erwarten, da bei geringeren Abflüssen auch geringere Schubspannungen herrschen. Jedoch deuten sowohl die geringen Unterschiede zwischen den Ablagerungsverläufen der übrigen Abflussmengen als auch der grundsätzlich verschiedene Verlauf der beiden Versuchsreihen mit Tagesganglinie darauf hin, dass die Ergebnisse maßgeblich von niederschlagsbedingten Schwankungen der Abwasserzusammensetzung beeinflusst werden.

5.1.3.3 Einfluss von Niederschlägen auf die Versuchsergebnisse

Das Abwasser für die Versuchsrohre wird wie bereits beschrieben aus dem Zulaufkanal zur Kläranlage Ölbachtal entnommen. Die Qualität des Trockenwetterzuflusses ist dabei, abgesehen von den üblichen tageszeitlichen Schwankungen,

von weitgehend gleichbleibender Qualität und wird durch äußere Einflüsse (Industrieeinleitungen etc.) nicht maßgeblich und dauerhaft beeinflusst. Anders sieht es hingegen bei Niederschlag aus. Dann unterliegen die Feststoffkonzentrationen im Abwasserstrom starken Schwankungen, die durch verschiedene Effekte bedingt sind. Feststoffe, die sich während einer Trockenperiode auf befestigten Flächen (Dächern, Straßen etc.) abgesetzt haben, gelangen mit dem Regenwasser in die Mischkanalisation und führen dort zu einer Erhöhung der Feststofffracht, oftmals sogar der Feststoffkonzentration. Der durch den Niederschlag erhöhte Mischwasserabfluss führt zudem dazu, dass Kanalablagerungen, die sich in Perioden mit geringem Abfluss gebildet haben, wieder erodiert werden. Dies vollzieht sich vornehmlich in den meist steiler verlegten Bereichen der Einzugsgebiete mit kleinen Rohrdurchmessern. Die Feststoffe werden in die Sammler und dort bei ausreichender Transportkapazität des Mischwasserabflusses weiter Richtung Kläranlage transportiert. Im Anschluss an einen Regen sinkt der Mischwasserabfluss und ein Teil der Feststoffe, die noch nicht bis zur Kläranlage transportiert wurden, sedimentiert im Kanalnetz. Der Anteil der Feststoffe, der bis zur Kläranlage transportiert wird, hängt unter anderem von der Regendauer und -intensität, der Dauer der vorangegangenen Trockenwetterperiode und der Fließzeit im Kanalnetz ab. Ist ein Regen lang und stark, sind nach einer Weile die erodierbaren Feststoffe abtransportiert und es setzt in der Folge des ersten Konzentrationsanstiegs (teilweise als Spülstoß bezeichnet) ein Verdünnungseffekt ein und die Feststoffkonzentrationen im Mischwasserabfluss sinken deutlich unter den Wert des Trockenwetterabflusses.

Die oben beschriebenen Effekte beeinflussen den Betrieb der Versuchsanlage und die Bildung von Ablagerungen in den Versuchsrohren in nicht unerheblichem Maße. Bei Niederschlag gelangen sehr große Feststoffmengen in den Zulaufkanal der Kläranlage Ölbachtal. Die Entnahme des Abwassers für die Versuchsrohre erfolgt in Sohlhöhe, um auch bei geringen Trockenwetterabflüssen die Versorgung der Versuchsanlage gewährleisten zu können. Da die Konzentration der Feststoffe im Fließquerschnitt von oben nach unten zunimmt, steigt die Menge an Feststoffen, die in die Versuchsrohre transportiert werden, bei Regen stark an. Da der Abwasserstrom durch die Versuchsrohre jedoch konstant eingestellt ist, steigt lediglich die Feststoffkonzentration, nicht aber die Transportkapazität, so dass es zu einer vermehrten Ablagerung in den Versuchsrohren kommt. Normalisiert sich die Feststoffkonzentration nach einem Niederschlag wieder, ist die Transportkapazität des Abflusses ggf. nicht mehr vollständig ausgeschöpft und an Stelle von Sedimentation findet eine Erosion der zuvor gebildeten Ablagerungen statt.

Deutlich wird der Einfluss der Niederschläge bzw. der Zuflussmenge zur Kläranlage auf die Versuchsergebnisse in Bild 5.27. Während des Anstiegs der Ablagerungsmengen in den ersten 70 Tagen treten regelmäßig Niederschläge auf und die Ablagerungsmengen unterliegen relativ großen täglichen Schwankungen. In den Trockenperioden zwischen Tag 70-90 sowie Tag 110-150 ist jedoch ein weitgehend konstanter Rückgang der Ablagerungen zu erkennen.

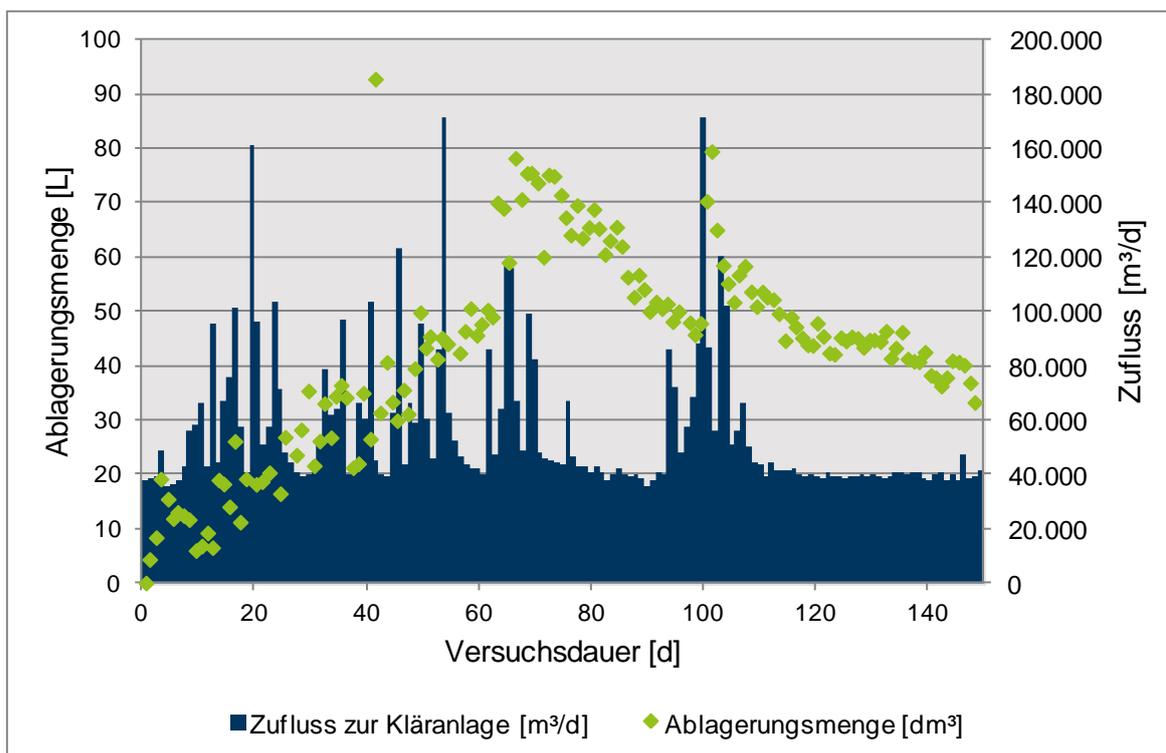


Bild 5.27: Entwicklung der Menge aller Ablagerungen im Testrohr und Tageswerte der Zuflüsse zur Kläranlage Ölbachtal (Versuchsreihe 20, $Q=2$ L/s, $I_S=1$ ‰, $k=0,4$ mm)

Der Einfluss von Niederschlägen auf die Ablagerungsdynamik wird auch in Bild 5.28 deutlich. Die größten Schwankungen in den Ablagerungshöhen treten in den ersten Tagen nach Niederschlägen auf. Je länger die Trockenperiode dauert, desto geringer werden die Schwankungen der Ablagerungshöhen. Dies spricht dafür, dass sich bei anhaltend unveränderten Zuflussbedingungen ein Gleichgewichtszustand einstellt.

Um bei zukünftigen Versuchen an der Kanalteststrecke eine unerwünschte niederschlagsbedingte Beeinflussung der Ablagerungsbildung zu vermeiden, werden in Kapitel 5.1.3.5 Hinweise zur Modifizierung des Anlagenbetriebs gegeben.

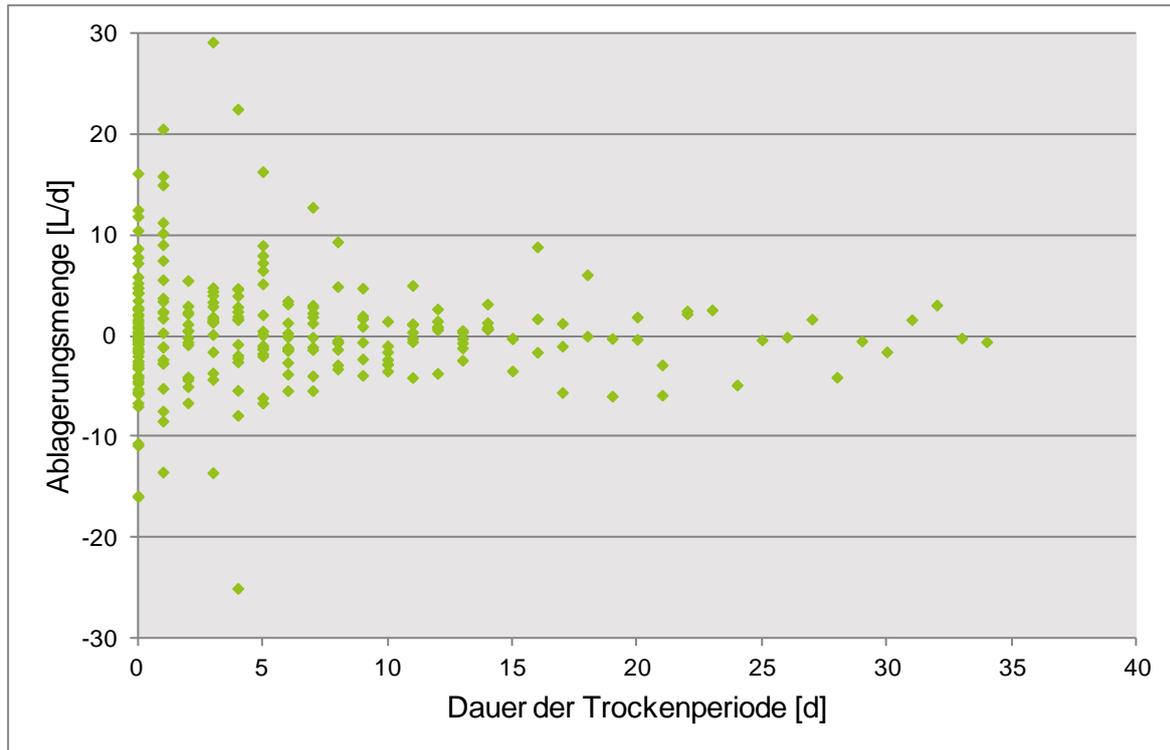


Bild 5.28: tägliche Änderung aller Ablagerungen im Testrohr in Abhängigkeit von der Dauer der Trockenperiode (Versuchsreihen 11, 13, 14, 16, 17 und 20, $Q=2$ L/s, $I_S=1$ ‰, $k=0,4$ mm)

5.1.3.4 Ausspülversuche

Um festzustellen, inwiefern sich der Erosionswiderstand der Ablagerungen ändert, wurden zum Abschluss jeder Versuchsreihe Ausspülversuche mit realem Abwasser durchgeführt. Im Rahmen eines solchen Spülversuches wurde der Abfluss kontinuierlich gesteigert. Dabei wurde festgestellt, dass ein komplett ablagerungsfreier Zustand im Rohr (mit den in der Versuchsstrecke realisierbaren Abflüssen) nicht erreicht werden kann. Dies ist unter anderem darauf zurückzuführen, dass mit dem erhöhten Abfluss auch größere und schwerere Feststoffe in die Rohre gelangen und zu neuen Ablagerungen führen. Es fand also keine Beseitigung, sondern ein Austausch der Ablagerungen statt. Die Menge der Ablagerungen nach einem Spülversuch konnte die ursprüngliche Ablagerungsmenge sogar übertreffen. Dies deckt sich mit Beobachtungen aus realen Kanalnetzen, in denen einige Haltungen nach einem Regen deutlich mehr Ablagerungen aufweisen als zuvor.

Trotz dieser Problematik wurde versucht, den Zeitpunkt zu bestimmen, bei dem sich die während der Trockenwettersimulation sedimentierten Feststoffe wieder lösen. Aus dem zu diesem Zeitpunkt herrschenden Abfluss wurde die entsprechende Sohlschubspannung berechnet.

Zur Bestimmung des Zeitpunkts des Erosionsbeginns wurden sieben verschiedene Kriterien herangezogen. Neben den Standardparametern AFS/TS, CSB und Trübung, die jeweils mit optischen Sonden gemessen wurden, wurden die während des Spülversuches aufgezeichneten Videodaten zur Auswertung genutzt. Die Videokamera wurde mittig unter dem Testrohr aufgestellt, so dass die Ablagerungen und die Veränderungen deutlich erkennbar waren. An diesen etwa 10 cm breiten Teilstücken wurde auf eine Auskleidung mit Sandpapier verzichtet (Bild 5.29). Drei Zeitpunkte wurden bei der Auswertung der Videoaufnahmen bestimmt:

- visuell 1: Die Ablagerungen geraten in Bewegung, die ersten Bestandteile bzw. Feststoffteilchen lösen sich. Die Gesamtmenge der Ablagerungen bleibt jedoch nahezu unverändert, da gleichzeitig neue Teilchen sedimentieren.
- visuell 2: Die Ablagerungsmenge nimmt erkennbar ab. Die abgespülten Teilchen werden mengenmäßig nicht mehr vollständig ersetzt.
- visuell 3: Scheinbare Ablagerungsfreiheit. Alle Feststoffe sind in Bewegung.



Bild 5.29: Versuchsrohr mit „Sichtfenster“ im Schleifpapier

Die Bestimmung der maßgebenden Zeitpunkte anhand der Parameter AFS/TS, CSB und Trübung erfolgte durch eine Auswertung der Konzentrationsganglinien. Theoretisch sollte die Abwasserzusammensetzung im Zulauf zum Testrohr konstant sein, so dass über Konzentrationsspitzen im Ablauf des Testrohres der Zeitpunkt der Erosion identifiziert werden kann. In der Praxis zeigte sich jedoch, dass die Konzentrationen erheblichen Schwankungen unterliegen, deren Ursachen nicht immer eindeutig zu identifizieren sind.

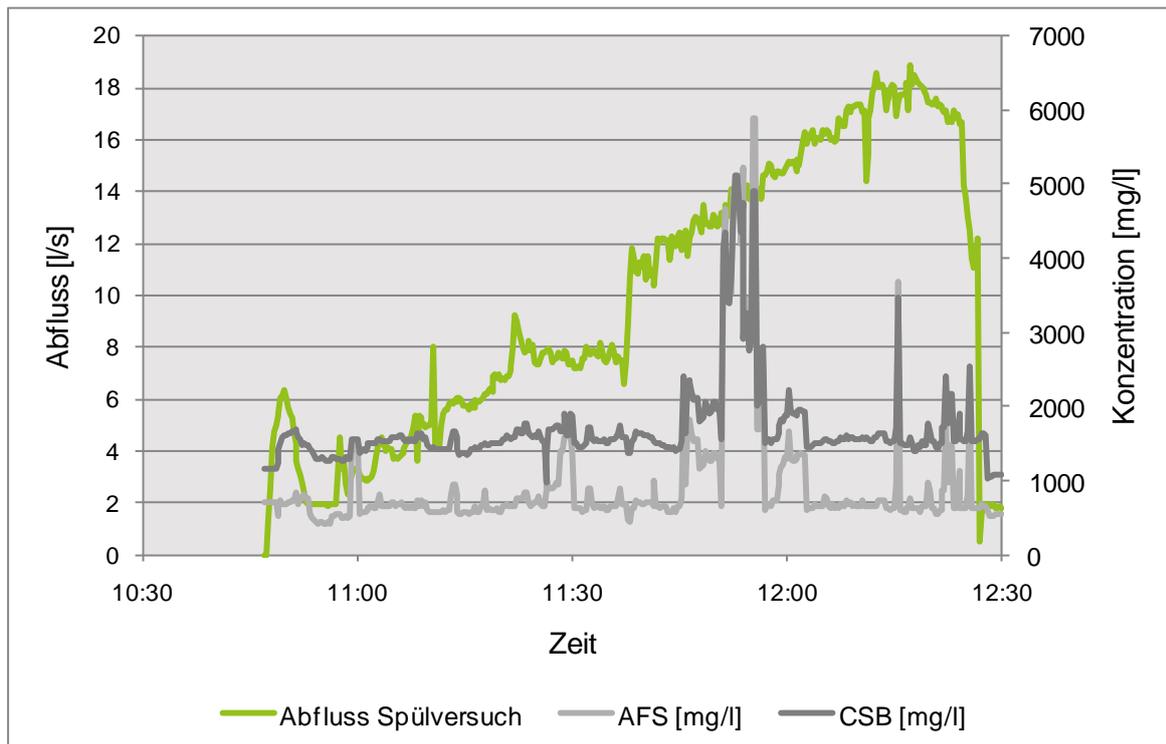


Bild 5.30: AFS- und CSB-Konzentrationen während eines Spülversuchs (Versuchsreihe 15, $Q=2$ L/s, $I_s=2,5$ ‰, $k=0,4$ mm)

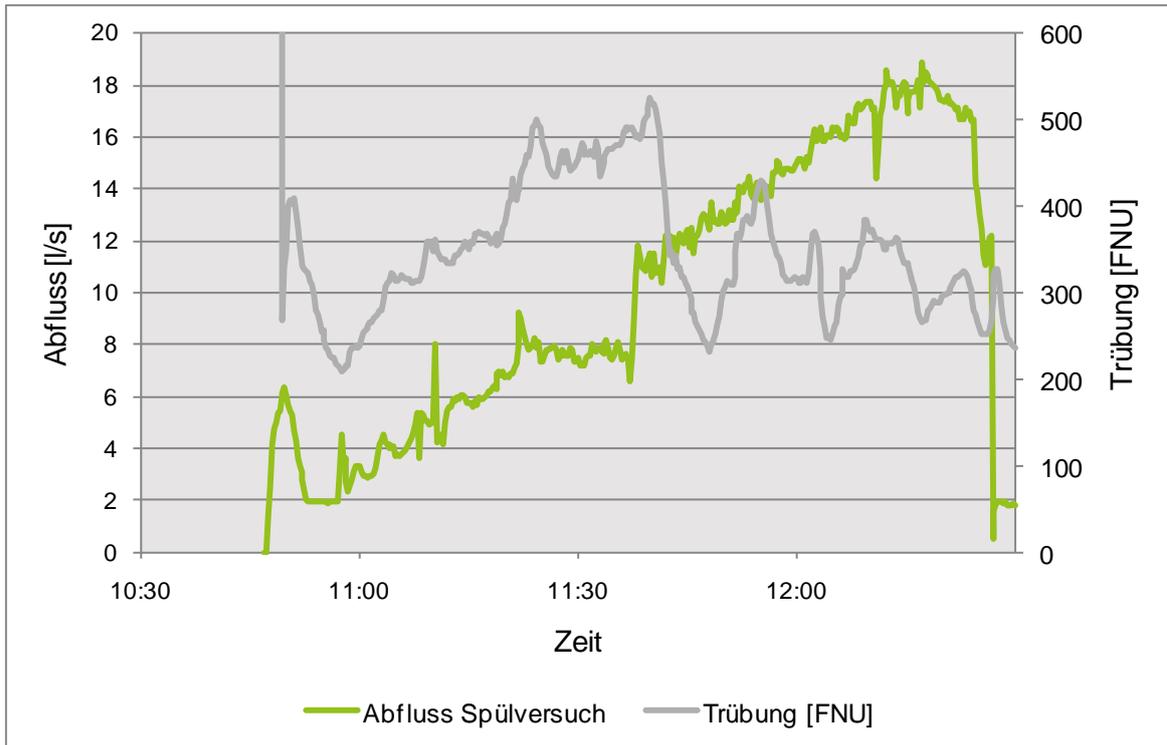


Bild 5.31: Verlauf der Trübungsmessung während eines Spülversuchs (Versuchsreihe 15, $Q=2 \text{ L/s}$, $I_S=2,5 \text{ ‰}$, $k=0,4 \text{ mm}$)

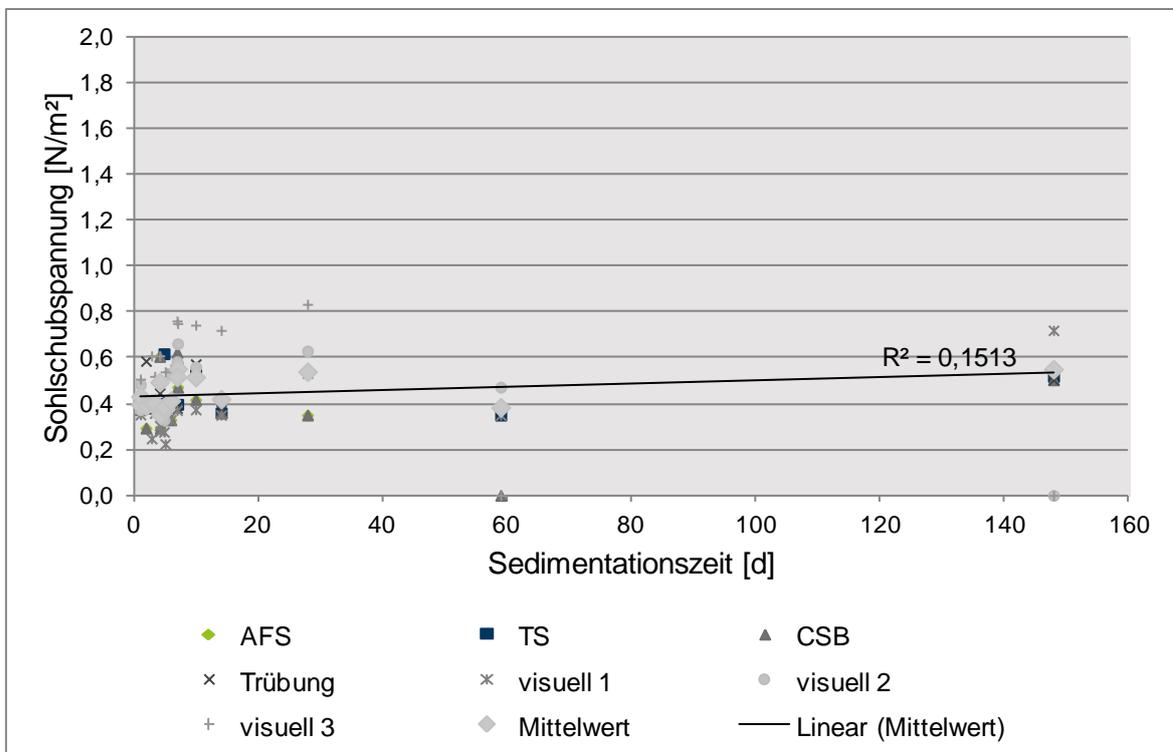


Bild 5.32: Erosionsschubspannung für verschiedene Kriterien (Versuchsreihen 11, 13, 14, 16, 17 und 20, $Q=2 \text{ L/s}$, $I_S=1 \text{ ‰}$, $k=0,4 \text{ mm}$)

In Bild 5.30 ist eine eindeutige Spitze im Verlauf der Konzentrationsganglinien von AFS und CSB zu erkennen. Diese Beobachtung lässt sich jedoch nicht durch die anderen Parameter, bspw. die Trübung (Bild 5.31) belegen. Aus diesem Grund wurden sämtliche Ergebnisse für die sieben betrachteten Kriterien in einer Grafik zusammengefasst (Bild 5.32).

Die Streuung zwischen den einzelnen Parametern ist relativ groß, dennoch zeichnet sich ab, dass die Festigkeit mit zunehmender Sedimentationszeit steigt. Es fällt auf, dass die beobachteten Werte ausnahmslos sehr gering sind und unterhalb der Grenze von $\tau=1,0 \text{ N/m}^2$ liegen. Diese Grenze gewährleistet nach dem Arbeitsblatt DWA-A 110 (DWA, 2006) weitgehend ablagerungsfreie Kanäle. Es ist anzunehmen, dass diese Ablagerungen nicht entstanden wären, wären die Versuchsbedingungen und insbesondere das Gefälle gemäß Arbeitsblatt DWA-A 110 (DWA, 2006) eingestellt worden. Um diese Annahme zu validieren, werden im Falle der Bewilligung der Phase II des Forschungsprojekts weiterführende Untersuchungen unter Variation des Gefälles durchgeführt.

In Bild 5.32 ist auffällig, dass die Werte für die Erosionsschubspannung teilweise sogar unterhalb der Schubspannung $\tau=0,3 \text{ N/m}^2$ liegen, die während der Sedimentationsphase unter idealen Bedingungen im Rohr herrschen. Dies kann verschiedene Ursachen haben, bspw. die Bildung einer Spülwelle zu Beginn des Spülversuchs oder die Möglichkeit, dass die Konzentrationsspitzen durch Feststoffe verursacht wurden, die sich zuvor beim Leerlaufen des Rohres abgelagert haben, unter normalen Umständen aber nicht sedimentiert wären.

5.1.3.5 Hinweise für eine weitere Versuchsplanung

Die unter Kapitel 5.1.3.2 beschriebenen Vorversuche zur Variation von Gefälle, Abfluss und Rauheit lieferten wichtige Erkenntnissen zur niederschlagsbedingten Beeinflussung der Versuchsergebnisse (s. Kapitel 5.1.3.3), welche in einer ggf. bewilligten Phase II des diesem Bericht zugrunde liegenden Forschungsprojektes genutzt werden können. Für weitere Forschungen an der Kanaltteststrecke empfiehlt es sich, die Niederschlagsmengen im Einzugsgebiet der Versuchsanlage detailliert zu erfassen sowie anhand von Online-Messungen Abwassermenge und -zusammensetzung im Kanal, aus dem das Abwasser für die Versuchsanlage entnommen wird, zu ermitteln. So kann die Beeinflussung der Ablagerungen in der Kanaltteststrecke durch die niederschlagsbedingten Schwankungen der Abwasserzusammensetzung berücksichtigt werden. Dies ist notwendig, um die Einflüsse anderer Parameter wie Gefälle, Rauheit etc. eindeutiger quantifizieren zu können.

Zusätzlich zur detaillierteren Erfassung der Abwasserbeschaffenheit im Entnahmekanal soll bei zukünftigen Untersuchungen an der Kanaltteststrecke die Entnahme des Rohabwassers umgestellt werden, um eine Verminderung des Niederschlagseinflusses auf die Versuchsreihen zu erreichen. In Abhängigkeit von der Zielstellung der Versuche bieten sich unterschiedliche Modifizierungen in der Versuchsdurchführung an:

- Untersuchung der Ablagerungsbildung bei Trockenwetterabfluss :
Die Versuchsrohre sollten nur bei Trockenwetter mit Abwasser beschickt werden, damit die stark verschmutzten Mischwasserabflüsse die Ablagerungsbildung nicht beeinflussen. Die praktische Umsetzung soll durch eine Pumpensteuerung erfolgen, die auf den Wasserstand im Entnahmekanal reagiert. Übersteigt der Wasserstand das Trockenwettermaximum, wird die Förderung eingestellt bis der Wasserstand wieder auf trockenwettertypische Werte zurückgegangen ist. Für die Untersuchung der Geschwindigkeit der Ablagerungsbildung im Trockenwetterfall und der Frage, ob sich bei konstanten Randbedingungen ein Gleichgewichtszustand hinsichtlich der Ablagerungsmengen einstellt, ist diese Vorgehensweise notwendig.
- Untersuchung der Ablagerungsdynamik in Mischwasserkanälen
Um neben dem Trocken- auch den Regenwetterfall bewerten zu können, sollen Versuche durchgeführt werden, bei denen der Abfluss im Versuchsrohr nicht konstant eingestellt ist, sondern proportional zum Abfluss im Entnahmekanal gesteuert wird. Dadurch ist sichergestellt, dass das Verhältnis von Feststoffkonzentration und Volumenstrom im Versuchsrohr die Realität besser widerspiegelt als in den Vorversuchen. Es ist sinnvoll, die Entnahmehöhe des Rohabwassers abhängig vom Wasserstand im Entnahmekanal zu variieren. So ist es möglich, sowohl bei Trockenwetter als auch bei Mischwasserabfluss im Versuchsrohr Feststoffkonzentrationen zu erhalten, die repräsentativ für den Gesamtabfluss im Entnahmekanal sind.

5.2 Erosionsversuche

Da die Messung des Erosionswiderstandes der Ablagerungen in der Kanaltteststrecke schwer zu realisieren ist, wurde nach anderen Möglichkeiten, den Zusammenhang zwischen Alter der Ablagerungen und Erosionswiderstand zu untersuchen, gesucht. Ein probates und in der Wissenschaft bewährtes Mittel ist das Erosionsmessgerät (EROSIMESS) nach Liem et al. (1997). Das Verfahren beruht

auf der Erzeugung von Schubspannungen in einem zylindrischen Gefäß mit Hilfe eines an einer vertikalen Achse befestigten Propellers. Durch zeitgleiche Messung der Feststoffkonzentration im Überstandswasser mittels TS-Sonde. Das Verfahren wird unter anderem zur In-Situ-Untersuchung von Fluss- bzw. Gewässersedimenten (bspw. Prochnow et al., 2001) und zur Bestimmung des Erosionsverhaltens von Kanalablagerungen eingesetzt. Hinsichtlich der Kanalablagerungen wurden bereits mehrfach Laborversuche mit angepassten Erosionsmessgeräten (Reuber, 2004) durchgeführt. Die TU Dresden verwendete 2011 ein Erosionsmessgerätes, welches dem EROSIMESS der RWTH Aachen (Liem et al., 1997) nachempfunden wurde, für In-Situ-Untersuchungen im Dresdner Kanalnetz.

5.2.1 Material und Methoden

5.2.1.1 Verwendetes Material

Der Versuchsaufbau wurde teilweise dem EROSIMESS-Erosionsmessgerät (Bild 5.33) nachempfunden. Dazu wurden vier Plexiglasbehälter mit einem Durchmesser von 12 cm angefertigt, die auf der Innenseite mit vertikalen Strömungsbrechern versehen sind. Diese Strömungsbrecher verhindern eine Strudelbildung und tragen dazu bei, dass die Strömung im Behälter radial sowie parallel zur Sohle verläuft. Über einen seitlichen Stutzen lässt sich eine TS-Sonde einbringen, um den Feststoffgehalt während des Erosionsversuchs aufzeichnen zu können (Bild 5.34). Über Anschlüsse im oberen Bereich des Behälters ist es möglich, diesen mit Frisch- oder Abwasser zu beschicken. Die Sohlschubspannung wurde mithilfe eines elektronischen Rührwerks der Firma Heidolph (Modell RZR 2051) aufgebracht, dessen Drehzahl über einen PC gesteuert und aufgezeichnet wurde.

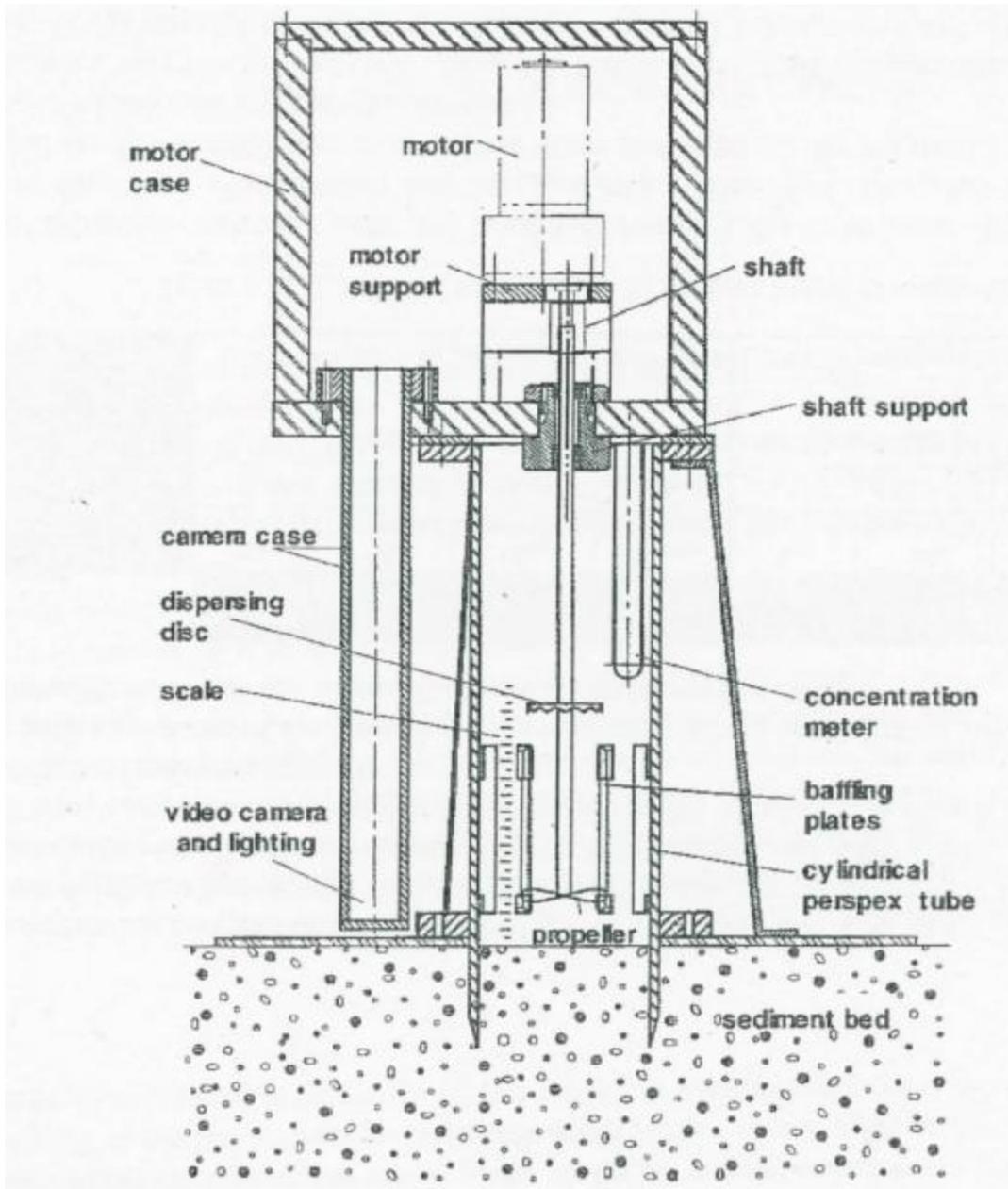


Bild 5.33: Erosionsmessgerät (EROSIMESS) (Liem et al., 1997)

Bevor die Versuche mit dem Erosionsmessgerät beginnen konnten, mussten repräsentative Sedimente in die Plexiglaszylinder eingebracht werden. Im Gegensatz zu bisherigen Untersuchungen sollten keine Ersatzsedimente, bspw. aus gemahlene Olivenkernen (Reuber, 2004), sondern Feststoffe aus realem Abwasser verwendet werden. Um dies umzusetzen, wurden die Gefäße mit Abwasser durchströmt, bis sich Ablagerungen von 3 cm Höhe gebildet hatten. Da sich zeigte, dass das Überstandswasser im Plexiglasbehälter nach wenigen Tagen zu faulen begann, wurden die Behälter permanent mit Frischwasser durchströmt. Auf

diese Weise konnten Erosionsversuche mit Ablagerungen durchgeführt werden, deren Sedimentationsdauer bis zu zwei Wochen betrug.

War die Sedimentationsdauer länger als zwei Wochen, unterlagen die Sedimente so starken biologischen Umsatzprozessen, dass sie nicht weiter genutzt werden konnten. So kam es bspw. zur Bildung von Gasblasen, welche beim Aufsteigen die Sedimente auflockerten, so dass zeitweise eine Vergrößerung des Volumens zu beobachten war. Dieser Effekt wurde u. a. bereits von Banasiak et al. (2005) beobachtet. In einem Versuch bildete sich ein Pilzgeflecht, welches die gesamte Ablagerung umspannte und dafür sorgte, dass sich die Ablagerungen weitestgehend von der Sohle lösten und sich zusammenballten. Die starke biologische Aktivität in den Ablagerungen ist wahrscheinlich auf den sehr hohen Organikanteil zurückzuführen. Das auf der Versuchskläranlage des Lehrstuhls im Ölbachtal verfügbare Abwasser enthält sehr wenige mineralische Stoffe, da es auf der Kläranlage Ölbachtal des Ruhrverbands im Ablauf des Sandfangs entnommen und zur Versuchskläranlage gepumpt wird. Den Anteil der mineralischen Bestandteile zu erhöhen, indem die Pumpe das Abwasser vor dem Sandfang entnimmt, war aufgrund zu geringer Pumpenleistung, einer Förderstrecke von mehreren hundert Metern und starker Verschleißerscheinungen an der Pumpe nicht möglich.



Bild 5.34: Plexiglasbehälter zur Messung des Erosionswiderstandes von Sedimenten

Da das verwendete Abwasser offensichtlich nicht geeignet war, um repräsentative Ablagerungen zu erzeugen, wurde für weitere Versuche Sediment aus der Kanalteststrecke auf der Kläranlage Ölbachtal genutzt. Bei diesen Sedimenten zeigte sich, dass der Anteil an organischen Feststoffen mit 3-7 % offensichtlich so gering war, dass die Faulprozesse die Sedimentstabilität nicht erkennbar negativ beeinflussten.

5.2.1.2 Kalibrierung

Bevor mit den Erosionsversuchen mit Feststoffen aus Abwasser begonnen werden konnte, war es erforderlich, das Erosionsmessgerät mit Quarzsand zu kalibrieren, um einen festen Zusammenhang zwischen Drehzahl des Rührwerks und aufgebrachtener Sohlschubspannung herstellen zu können. Diese Kalibration erfolgte über die Shields-Approximation nach Zanke, die für die von Shields (1936) erhobenen Messwerte zum Bewegungsbeginn von Körnern an der Sohle einen funktionalen Zusammenhang angibt (Schröder und Zanke, 2003):

$$\theta_{c,Shields} = \frac{0,24K}{\left(1 + 1,8 \frac{u'_{rms,b}}{v_b}\right)^2 \left(1 + 0,14 \left(1,8 \frac{u'_{rms,b}}{v_*}\right)^2 K\right)} \quad (5.5)$$

Mit:

$\theta_{c,Shields}$: kritische Schleppspannung nach Shields

$u'_{rms,b}$: Standardabweichung der Geschwindigkeitsschwankungen $u'(t)$ am Boden in Höhe der Körner

v_b : Geschwindigkeit am Boden in Höhe der Körner

v_* : gesamte Schubspannungsgeschwindigkeit

K : Koeffizient zur Beschreibung der Kohäsionswirkung

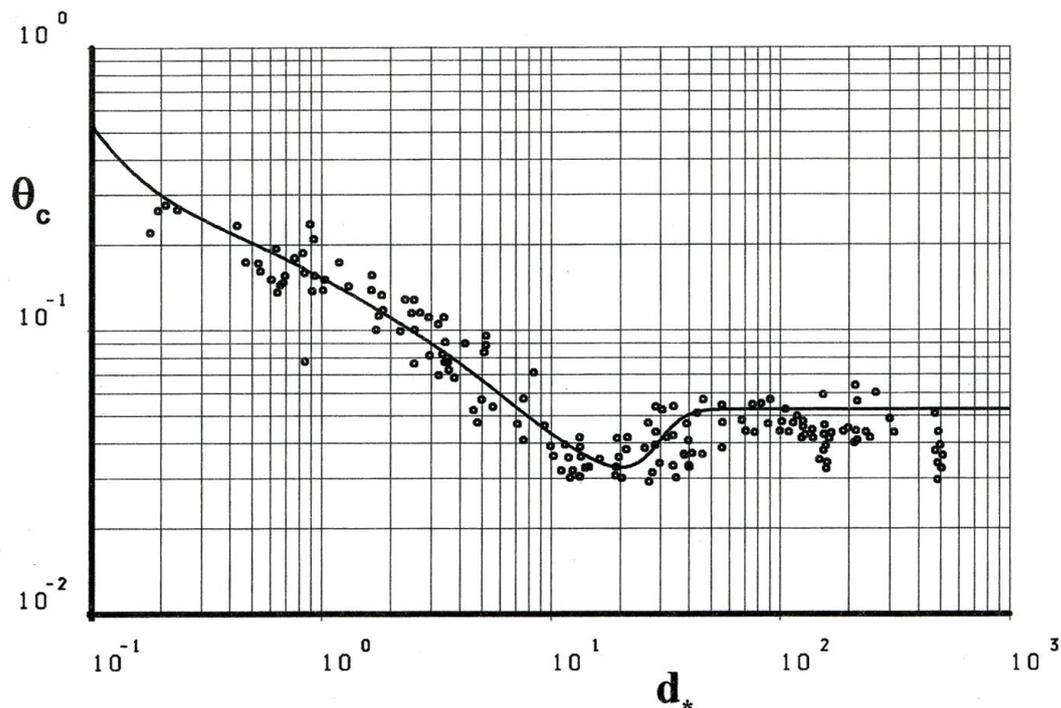


Bild 5.35: Kritische Schlepptension θ_c nach Gleichung (5.5) und dimensionslose Korngröße nach Gleichung (5.6) (Schröder und Zanke, 2003)

Die explizite Kurve für den Bewegungsbeginn nach Bild 5.35 lässt sich für praktische Belange durch einen Polygonzug beschreiben (Schröder und Zanke, 2003):

$$\begin{array}{lll}
 d_* < 0,2 & \rightarrow & \theta_c = 0,082 \cdot d_*^{-0,8} \\
 0,2 < d_* < 2,5 & \rightarrow & \theta_c = 0,15 \cdot d_*^{-0,43} \\
 2,5 < d_* < 17 & \rightarrow & \theta_c = 0,17 \cdot d_*^{-0,58} \\
 17 < d_* < 24 & \rightarrow & \theta_c = 0,033 \\
 24 < d_* < 42 & \rightarrow & \theta_c = 0,0026 \cdot d_*^{0,8} \\
 42 < d_* & \rightarrow & \theta_c = 0,052
 \end{array}$$

Dabei ist d_* eine dimensionslose Korngröße, die sich aus der maßgebenden Korngröße nach Gleichung (5.6) berechnet:

$$d_* = d_m \cdot \sqrt[3]{\left(\frac{g'}{v^2}\right)} \quad (5.6)$$

Mit: d_* : dimensionslose Korngröße

d_m : maßgebende Korngröße in m

g' : modifizierte Erdbeschleunigung in m/s^2 (s. Gleichung (5.7))

ν : Viskosität von Wasser bei $10\text{ }^\circ\text{C}$ in m^2/s

$$g' = g \cdot \frac{\rho_s - \rho}{\rho} \quad (5.7)$$

Mit: ρ_s : Dichte des Feststoffmaterials (Quarzsand: $\rho_s=2650\text{ kg/m}^3$)

ρ : Dichte der transportierenden Flüssigkeit (Wasser: $\rho=1000\text{ kg/m}^3$)

Die kritische Sohlschubspannung berechnet sich dann zu:

$$\tau_c = \theta_c \cdot (\rho_s - \rho) \cdot g \cdot d_m \quad (5.8)$$

Bei den hier dargestellten Formeln handelt es sich um einen Überblick, eine ausführliche Erläuterung der Shields-Approximation nach Zanke findet sich in Schröder und Zanke (2003).

Die Vorgehensweise bei der Kalibrierung sah so aus, dass zunächst Quarzsande mit möglichst feinen Abstufungen in den Plexiglasbehälter eingefüllt wurden und beobachtet wurde, bei welcher Drehzahl des Rührers die Sandkörner in Bewegung geraten. Aus der jeweils maßgebenden Korngröße d_m konnte dann berechnet werden, welche Sohlschubspannung zum Zeitpunkt des Bewegungsbeginns vorherrschen muss. Um Einflüsse subjektiver Bewertung möglichst zu vermeiden, wurden die Versuche von vier verschiedenen Mitarbeitern durchgeführt und die Ergebnisse in einem Diagramm aufgetragen (Bild 5.36).

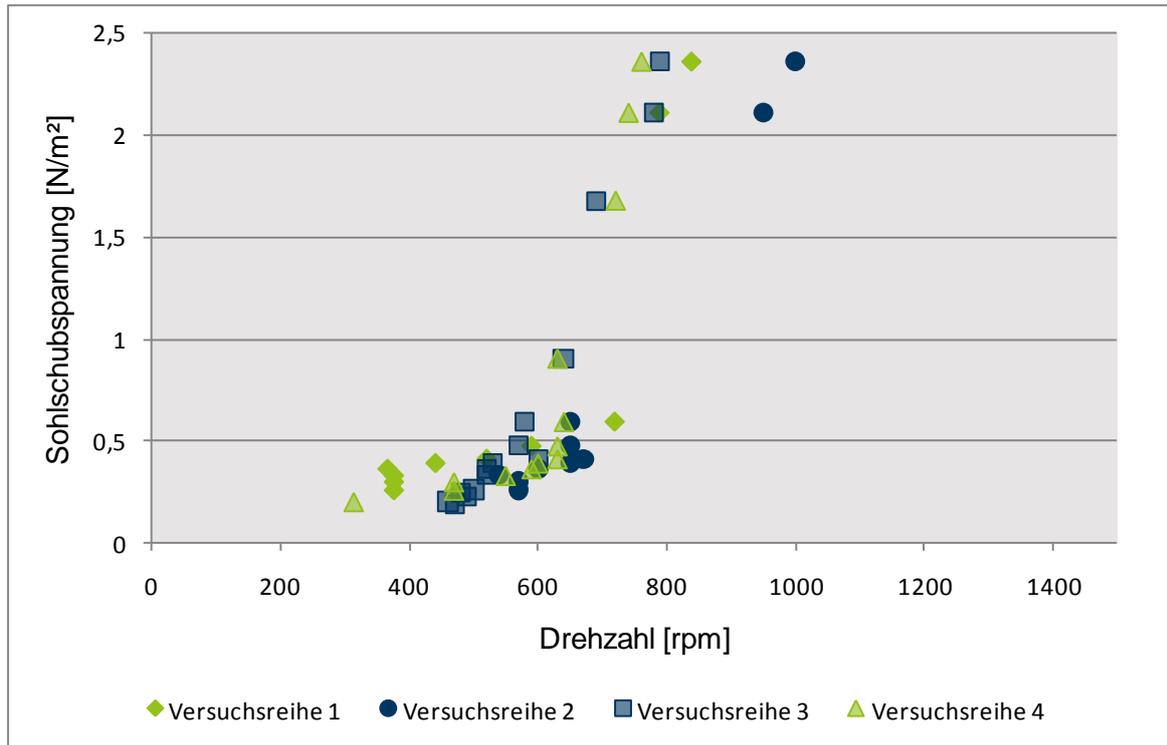


Bild 5.36: Ergebnisse der Erosionsversuche mit Sand verschiedener Korngrößen

Für diese Werte, die einer gewissen Streuung unterliegen, wurde eine mathematische Funktion gesucht, die die Ergebnisse möglichst gut beschreibt. Für die in Bild 5.36 dargestellten Ergebnisse der Erosionsversuche wurde eine Kurve ausgewählt, die sich aus zwei Exponentialfunktionen zusammensetzt:

- Für Drehzahlen von 0-500 gilt: $y = 0,1258e^{0,0019x}$
- Für Drehzahlen von 500-1000 gilt: $y = 0,0168e^{0,0061x}$

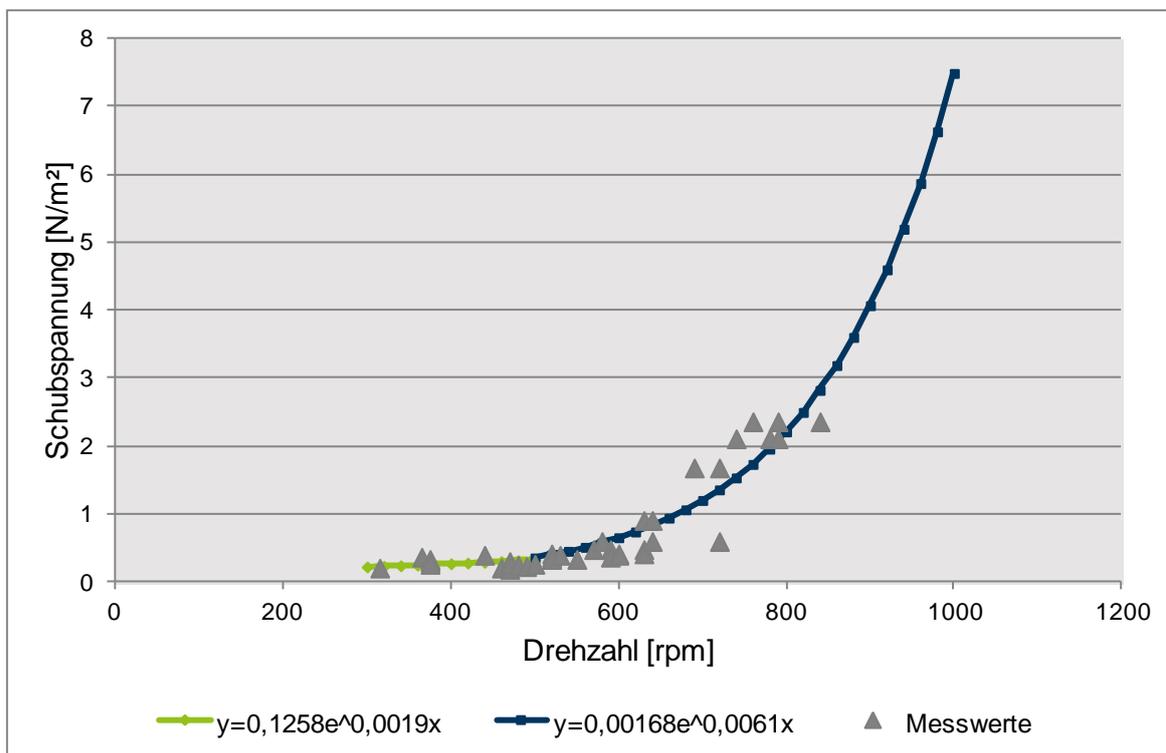


Bild 5.37: Ergebnisse der Kalibrierung

5.2.2 Auswertung und Ergebnisse

Die Erosionsversuche wurden so durchgeführt, dass die Drehzahl des Rührwerks stetig gesteigert wurde. Anhand der aufgezeichneten TS-Konzentration konnte anschließend der maßgebliche Zeitpunkt bestimmt werden, an dem die Sedimente erodiert wurden. Bild 5.38 und Bild 5.39 zeigen den Zusammenhang zwischen Drehzahl bzw. Schubspannung und der TS-Konzentration. Durch den plötzlichen starken Anstieg der TS-Konzentration ist bei diesem Beispiel besonders gut erkennbar, wann die Erosion beginnt. Dass die TS-Konzentrationsganglinie so steil ansteigt, ist in diesem Fall auf den relativ homogenen, hauptsächlich organischen Feststoffanteil zurückzuführen, der auch die sehr geringe Grenzsohlschubspannung von etwa $\tau=0,25 \text{ N/m}^2$ erklärt. Die „Stufen“ in der TS-Konzentrationsganglinie deuten darauf hin, dass das Sediment nicht gleichmäßig über die Zeit erodiert wurde, sondern dass jeweils bei Erreichen einer bestimmten Sohlschubspannung größere Mengen Sediment gelöst wurden. Dies könnte darauf zurückgeführt werden, dass sich die kleinen Partikel während der Sedimentationsdauer miteinander verbunden haben und sich dann als größere Klumpen von der Sohle lösen.

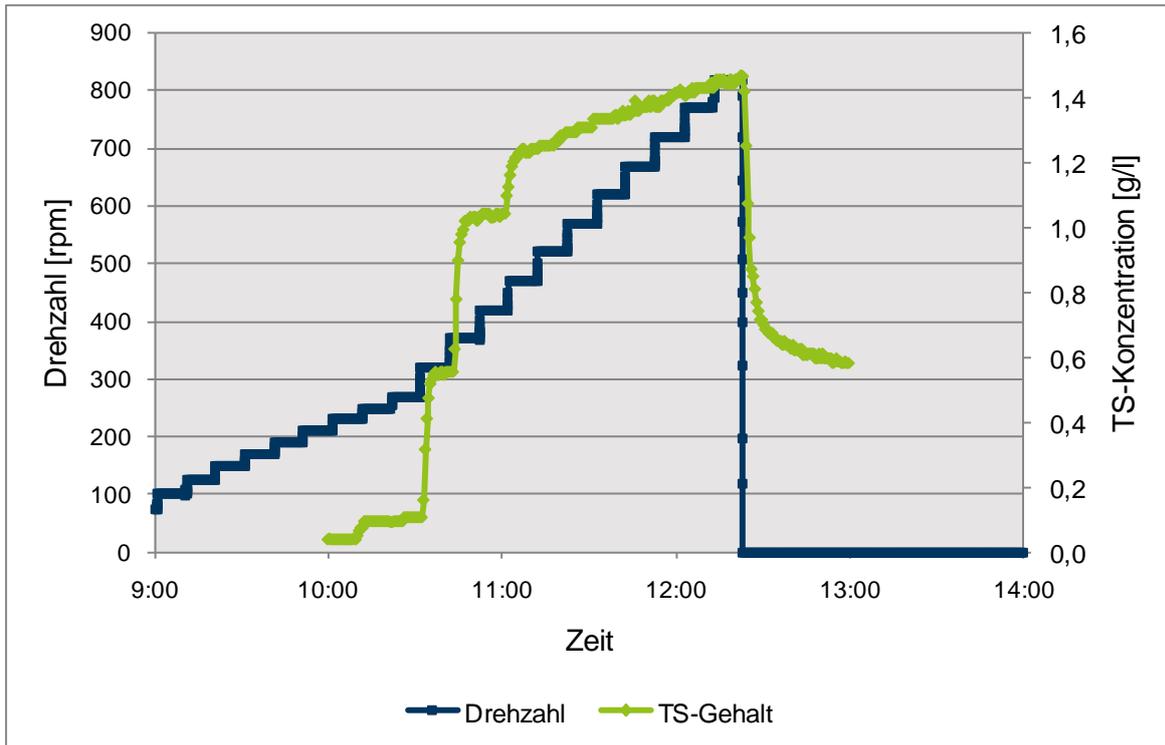


Bild 5.38: Drehzahl und TS-Konzentration bei einem Erosionsversuch mit überwiegend organischem Sediment

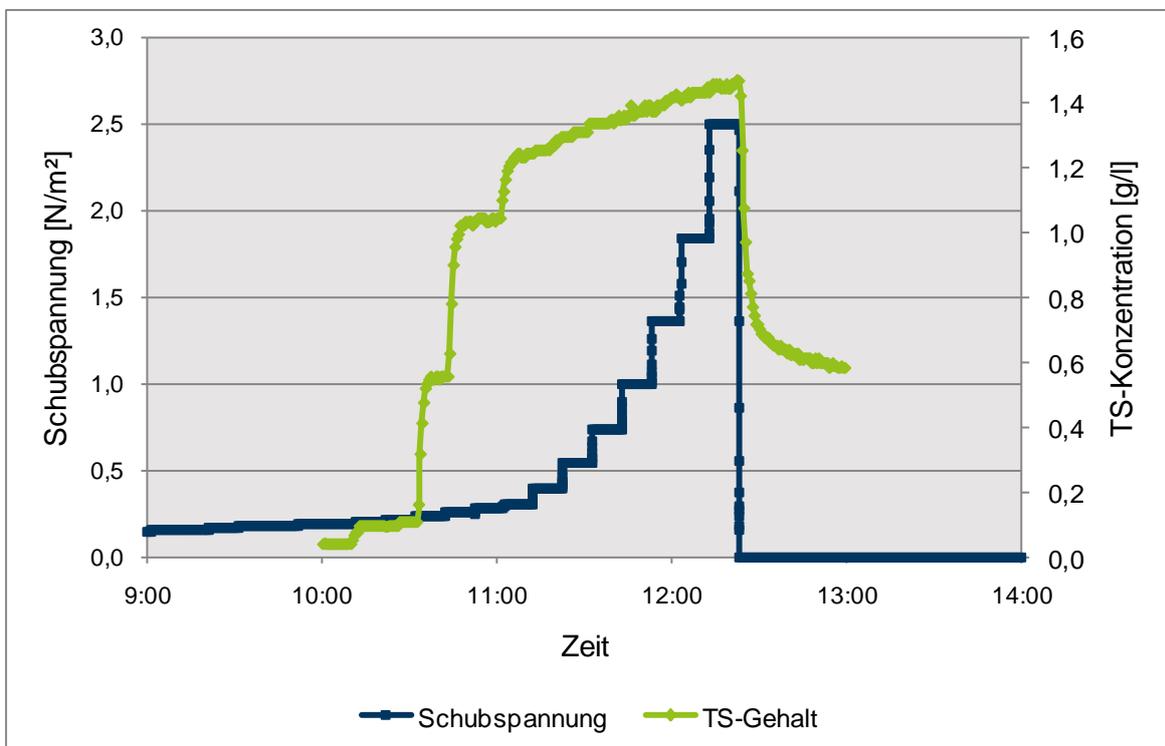


Bild 5.39: Sohlschubspannung und TS-Konzentration bei einem Erosionsversuch mit überwiegend organischem Sediment

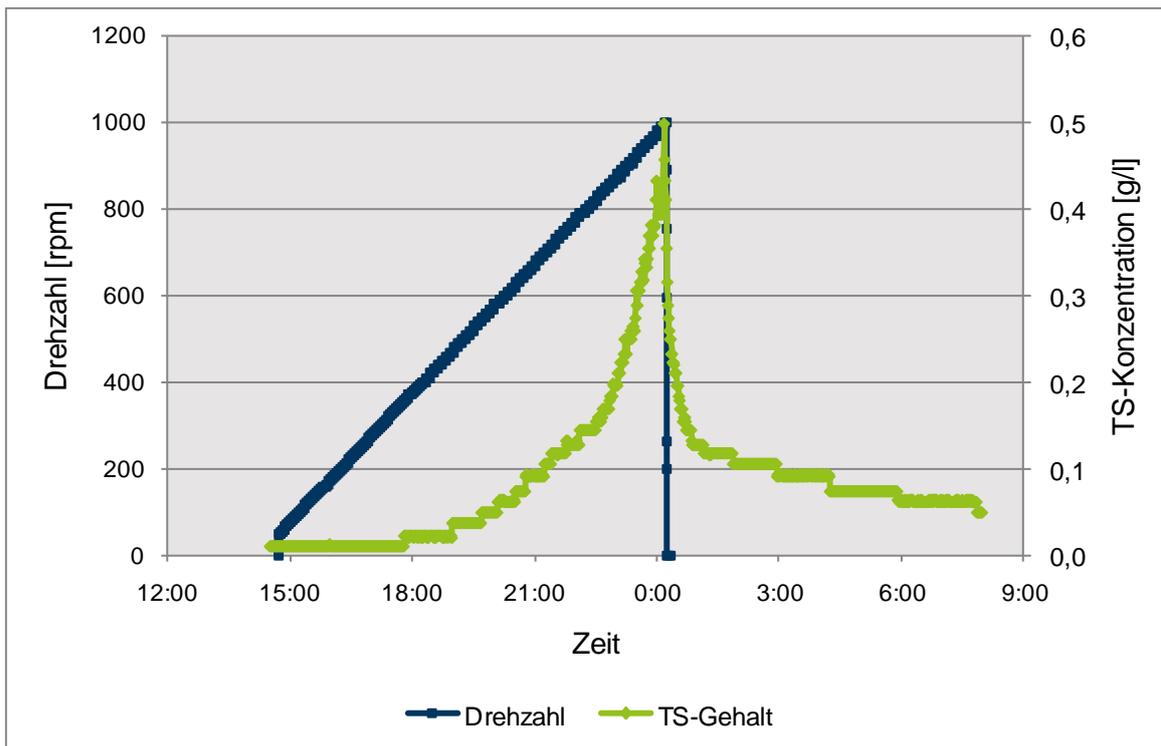


Bild 5.40: Drehzahl und TS-Konzentration bei einem Erosionsversuch mit überwiegend mineralischen Sediment

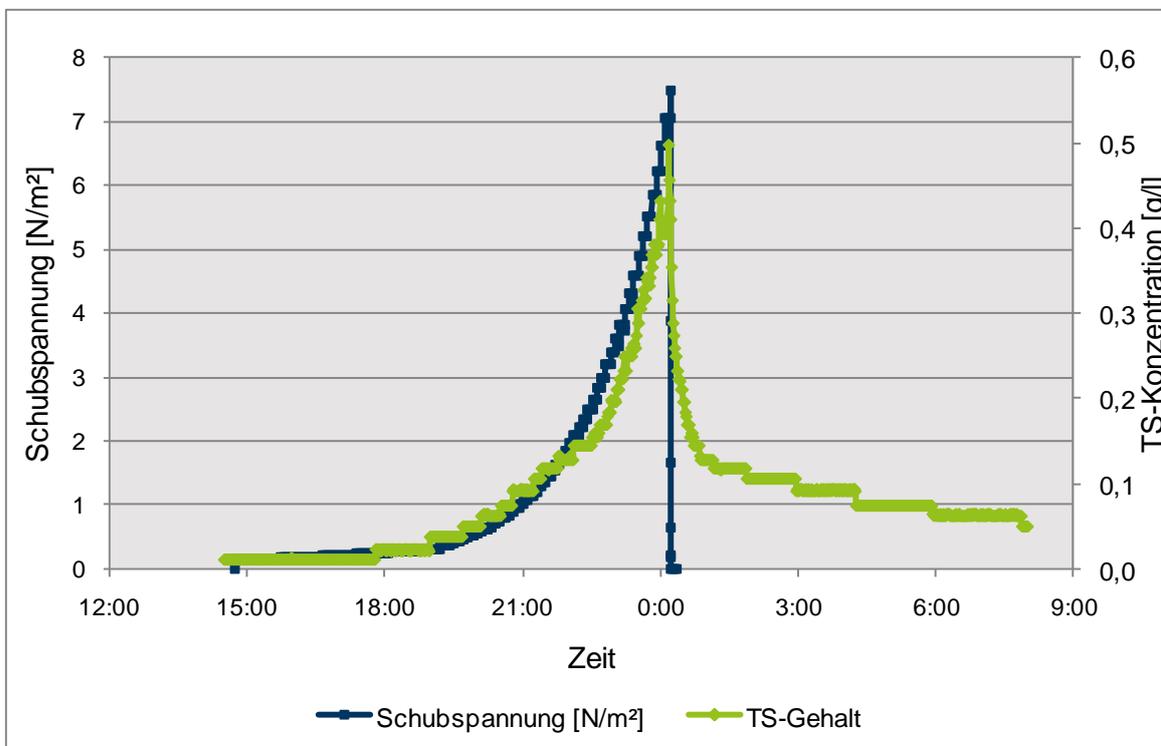


Bild 5.41: Sohlschubspannung und TS-Konzentration bei einem Erosionsversuch mit überwiegend mineralischem Sediment

Bei den inhomogeneren Sedimenten aus der Kanalteststrecke ist der Verlauf der TS-Konzentration verändert. Der Feststoffgehalt im Überstandswasser nimmt exponentiell mit linear steigender Drehzahl zu (Bild 5.40) und korreliert sehr stark mit der ebenfalls exponentiell steigenden Schubspannung (Bild 5.41). Dass sich kein eindeutiger Zeitpunkt für den Anstieg feststellen lässt, liegt wahrscheinlich daran, dass sich mit steigender Sohlschubspannung kontinuierlich neue Feststoffe mit größerem Erosionswiderstand aus den Ablagerungen lösen.

Die Erosionsversuche mit den Proben, die aus der Kanalteststrecke stammen und sich hauptsächlich aus mineralischen Bestandteilen zusammensetzen, wurden jeweils bei einer Drehzahl von 1000 rpm bzw. einer Sohlschubspannung von etwa 7,5 N/m² abgebrochen. Die bis dahin erreichten TS-Konzentrationen schwanken jedoch sehr stark.

Um die Ergebnisse der einzelnen Versuche vergleichen zu können, wurden die Sohlschubspannungen bestimmt, bei denen die TS-Konzentrationen im Überstandswasser auf 0,1 g_{TS}/L angestiegen sind (Bild 5.42). Es zeigt sich, dass der Erosionswiderstand tendenziell mit steigender Sedimentationsdauer anwächst, jedoch können die Sedimente auch schon innerhalb der ersten Tage hohe Festigkeiten aufweisen.

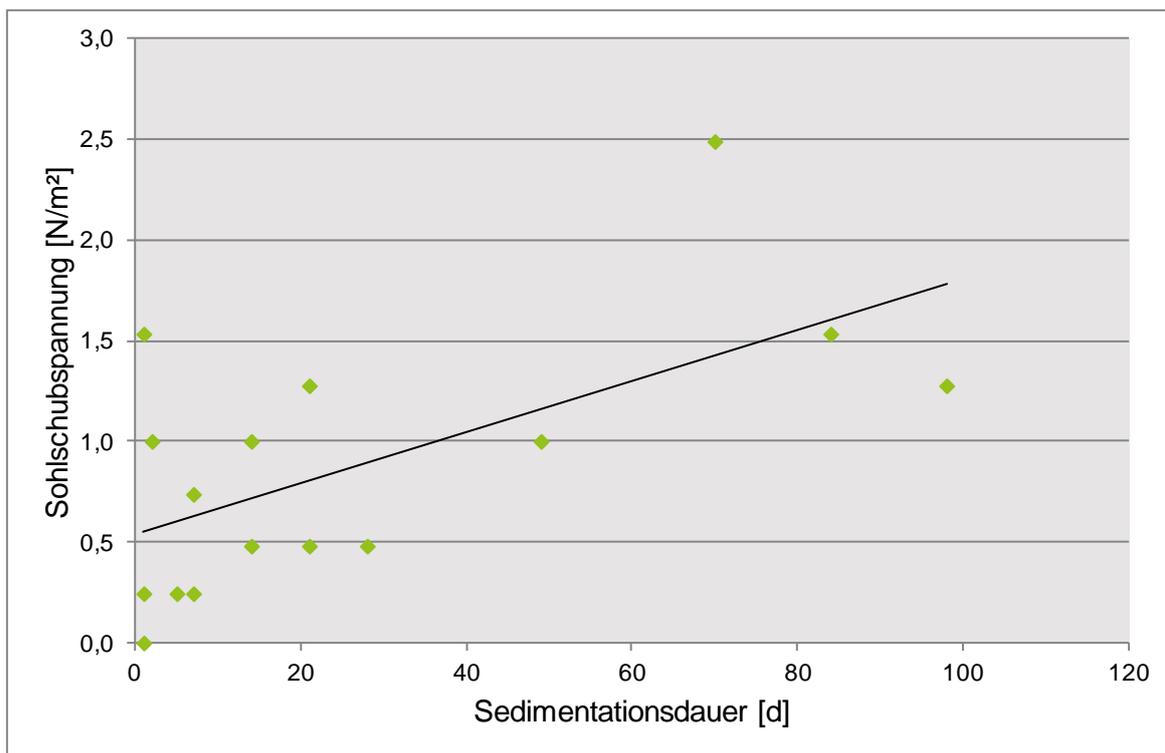


Bild 5.42: Sohlschubspannungen von überwiegend mineralischen Sedimenten in Abhängigkeit von der Sedimentationsdauer (als Grenzwert für die Erosion wurde eine TS-Konzentration von 0,1 g_{TS}/L angenommen)

5.3 Schwefelwasserstoffrohr

Da die Kanalteststrecke durch den Standort unter freiem Himmel und aufgrund der zahlreichen Öffnungen sehr gut durchlüftet war, waren Schwefelwasserstoffmessungen in den Testrohren nicht erfolversprechend. Deshalb wurden Laborversuche an einem Versuchsrohr durchgeführt, mit dem bereits im vom MUNLV geförderten Forschungsprojekt „Zustands-, Prozess- und Wirkungsanalyse zur Entwicklung einer bedarfsorientierten Reinigungsstrategie für Kanalnetze“ Ergebnisse erzeugt werden konnten. Die Versuche des aktuellen Projekts sollten insofern über die damaligen Versuche hinausgehen, dass sich die Temperatur und der Sauerstoffgehalt des zufließenden Abwassers beeinflussen ließen und dass durch den Einbau weiterer Sonden mehr Parameter erfasst werden konnten. Während im ersten Projekt nur der Schwefelwasserstoffgehalt in der Luft gemessen wurde, wurden dieses Mal auch die Eigenschaften des Abwassers stärker untersucht. Neben den Standardparametern Temperatur, Sauerstoff, pH-Wert, AFS, CSB und CSB_{filtr} wurde mittels einer Spektrometersonde auch der HS⁻-Gehalt gemessen, um

unter Berücksichtigung des pH-Wertes den Schwefelwasserstoffgehalt in der Wasserphase bestimmen zu können.

Ziel der Versuche war es, festzustellen, wie lange es dauert, bis sich in einem zunächst gereinigtem, von Abwasser durchflossenem Rohr Schwefelwasserstoff bildet.

5.3.1 Material und Methoden

Der Versuchsaufbau bestand im Kern aus einem Plexiglasrohr (DN 150, Länge: 1,50 m), durch das Abwasser der Kläranlage Ölbachtal des Ruhrverbands geleitet wurde (Bild 5.43). Am Ende des Rohres befand sich ein Versatz, der dazu führte, dass sich ein Teil der im Abwasser transportierten Feststoffe ablagerte und sich nach wenigen Tagen eine Ablagerungshöhe von etwa 1-1,5 cm einstellte. Da das Abwasser aus dem Ablauf des Sandfangs der Kläranlage Ölbachtal entnommen wurde, waren die sedimentierten Feststoffe zum größten Teil organischer Art.

Bevor das Abwasser in das Rohr geleitet wurde, konnte es mit Hilfe eines Thermostats auf die gewünschte Temperatur gebracht werden. In Abhängigkeit der Außentemperatur konnten so bei einem Abfluss von 80 L/s Abwassertemperaturen zwischen 10 und 25 °C eingestellt werden. Mit kleineren Abflüssen ließen sich auch extremere Temperaturen erreichen, dies hätte jedoch keine Praxisrelevanz, da dieser Temperaturbereich in Kanälen nur selten unter- bzw. überschritten wird.

Über einen Belüfter ließ sich der Sauerstoffgehalt im zufließenden Abwasser beeinflussen. Dies sollte dazu genutzt werden, den Einfluss der Sauerstoffkonzentration auf die Dauer bis zur ersten H₂S-Bildung zu bestimmen. Ohne Belüftung lag der Sauerstoffgehalt des verwendeten Abwassers bei annähernd 0 mg/l.

Im Anschluss an das Durchfließen des Plexiglasrohrs erfolgt die Messung der verschiedenen Parameter. Zunächst hat die Luft im Rohr die Möglichkeit in einem senkrechten Stutzen aufwärts zu steigen und dabei an einer Schwefelwasserstoffsonde vorbeizuströmen. Bei der Schwefelwasserstoffsonde handelte es sich um OdaLogs von AppTek, Datenlogger zur kontinuierlichen Langzeitaufzeichnung von Schwefelwasserstoffkonzentrationen bis 100 bzw. 1000 ppm.

In das abfließende Abwasser wurden eine Sauerstoffsonde, eine PH-Sonde sowie eine Spektrometersonde installiert. Die Spektrometersonde spectro::lyser von s::can wurde dazu eingesetzt, kontinuierlich die Parameter AFS, CSB, CSB_{fit} und H₂S zu bestimmen. Der Parameter H₂S wird dabei indirekt bestimmt, indem per Spektrometrie die Konzentration an Hydrogensulfid HS⁻ bestimmt wird und dann

unter Berücksichtigung des pH-Wertes die H_2S -Konzentration berechnet wird. Dabei kam folgende, werksseitig einprogrammierte Formel zur Anwendung:

$$H_2S = HS^- \cdot \left(\frac{10^{-6,98}}{10^{-pH}} + 1 \right) \quad \text{in mg/l} \quad (5.9)$$

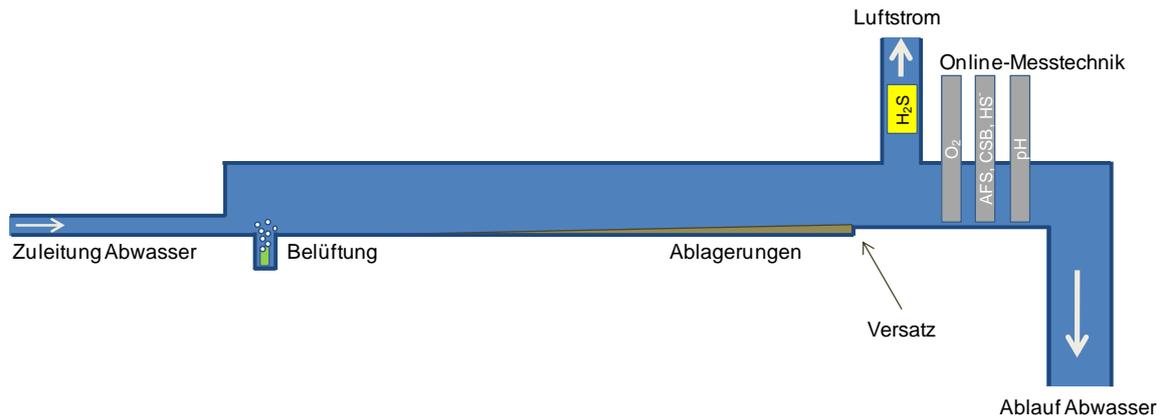


Bild 5.43: Prinzipskizze des Versuchsrohrs zur Schwefelwasserstoffbildung

Auch wenn dieses Verfahren zur Bestimmung der Schwefelwasserstoffbildung noch kein Standard ist und bisher selten in der Praxis angewandt wurde, zeigte sich nach einiger Zeit, dass verlässlich bestimmt werden kann, ob Schwefelwasserstoff vorliegt oder nicht. Allerdings unterliegen sämtliche Messwerte der Spektrometersonde einem starken Drift, der die Messwerte im Mittel kontinuierlich steigen lässt. Dies ist auf eine zunehmende Belegung des Messfensters zurückzuführen, die sich auch durch eine regelmäßige (alle 10 Minuten) Druckluftreinigung nicht verhindern lässt.

Tabelle 5.5: Zusammenstellung der erfassten Parameter

Parameter	Art der Erfassung	Messgerät	Messintervall
Durchfluss	Messung durch magnetisch induktiven Durchflussmesser (MID)	ABB DN23	1 Sekunde
Abwassertemperatur	Sonde im Zulauf	WTW SensoLyt® 700	15 Sekunden
AFS im Abwasser	Kontinuierliche Messung über Spektrometersonde im Ablauf der Versuchsstrecke	s::can spectro::lyser	2 Minuten
CSB im Abwasser	Kontinuierliche Messung über Spektrometersonde	s::can spectro::lyser	2 Minuten
HS⁻ im Abwasser	Kontinuierliche Messung über Spektrometersonde	s::can spectro::lyser	2 Minuten
pH-Wert	Sonde im Zulauf	WTW SensoLyt® 700	15 Sekunden
Sauerstoff im Abwasser	Sonde im Zulauf	Lange LDO Prozesssonde	15 Sekunden
Schwefelwasserstoff in der Luft	H ₂ S-Sonde im Luftstrom	AppTek OdaLog	1 Minute

5.3.2 Auswertung und Ergebnisse

Die Versuche mit dem Schwefelwasserstoffrohr waren leider bestimmt von technischen Schwierigkeiten. Zu Beginn bestand das Hauptproblem darin, die Spektrometersonde so einzurichten, dass sie in der Lage war, Schwefelwasserstoff zu messen. Im Anschluss daran wurden die Versuchsreihen von regelmäßigen Ausfällen der Zulaufpumpe unterbrochen, so dass viele Versuchsreihen abgebrochen werden mussten, bevor es überhaupt zu signifikanter Schwefelwasserstoffbildung kam. Grund für die häufigen Ausfälle der Pumpe war Wartungsarbei-

ten an der Rechenanlage der Kläranlage im Ölbachtal, die dazu führten, dass Faserstoffe in den Sandfang gerieten und das Laufrad der Pumpe blockierten.

Aus diesem Grund wurden die Versuche von April bis Anfang September ausgesetzt, bis die Rechenanlage der Kläranlage wieder vollständig in Betrieb war.

Die Ergebnisse der bisher durchgeführten Versuchsreihen zeigt Bild 5.44. Der Beginn der Schwefelwasserstoffbildung wurde in der Auswertung so definiert, dass ein Grenzwert von 1,5 ppm_{H₂S} (in der Luft) und 5 mg_{H₂S}/L (im Wasser) für mindestens 15 Minuten überschritten wird. Die Wahl eines Grenzwertes ist notwendig, da insbesondere in der Wasserphase ständig niedrige (<2 mg_{H₂S}/L) H₂S-Konzentrationen gemessen werden, die aber durch Messungenauigkeiten, bspw. aufgrund eines Biofilmes auf dem Messfenster, verursacht werden.

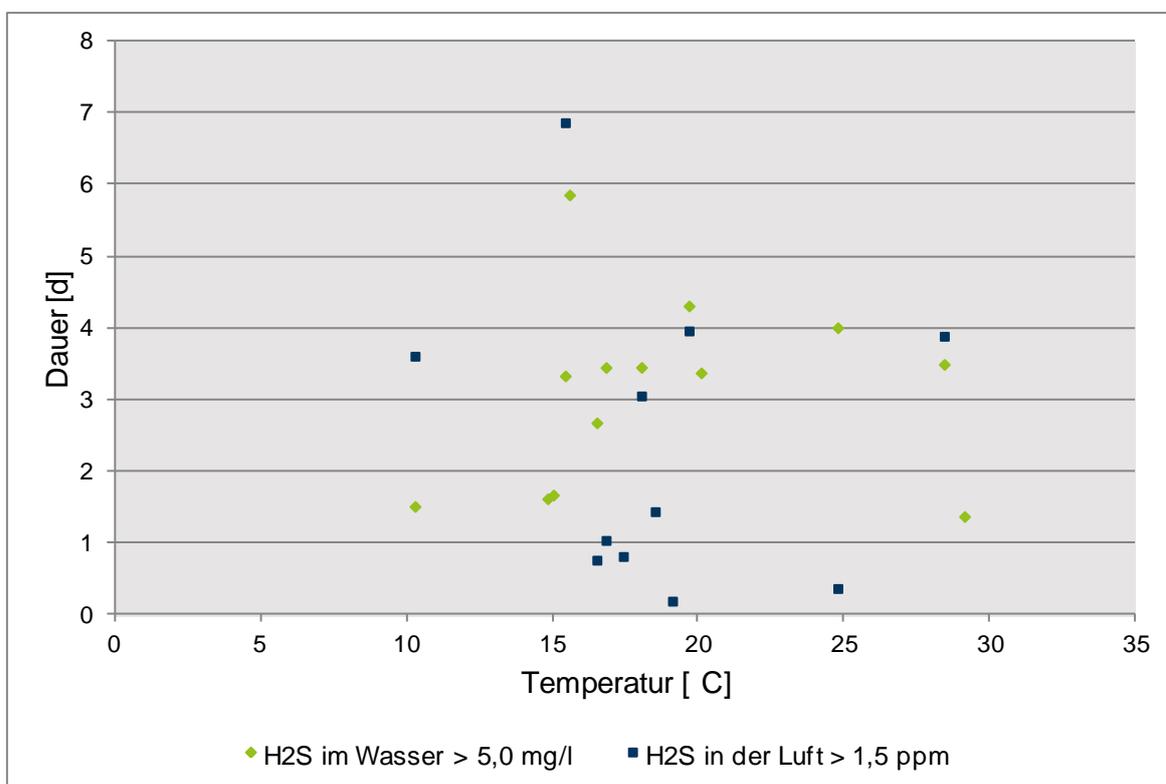


Bild 5.44: Dauer bis Grenzwerte für von 5,9 mg_{H₂S}/l (im Wasser) bzw. 1,5 ppm_{H₂S} (in der Kanalluft) überschritten werden in Abhängigkeit von der Temperatur

Aus den bisherigen Ergebnissen lässt sich noch kein Trend ableiten, wie lange es unter definierten Bedingungen dauert, bis sich eine längerfristige Schwefelwasserstoffbildung einstellt. Bei allen Versuchen zeigte sich jedoch, dass die verantwortlichen Prozesse ziemlich schnell ablaufen und sich innerhalb weniger Tage, in der Regel innerhalb einer Woche, eine Schwefelwasserstoffbildung einstellen kann. In

Bild 5.45 lässt sich erkennen, dass die H_2S -Konzentration sowohl im Wasser als auch in der Luft mit der AFS-Konzentration und somit auch der CSB-Konzentration (zur besseren Übersichtlichkeit nicht abgebildet) korreliert. Dies ist darauf zurückzuführen, dass mehr leicht abbaubares organisches Substrat sowie Sulfat für die Bakterien verfügbar waren und somit die Desulfurikationsrate anstieg. In den Nachtstunden ging die Sulfatkonzentration meist so weit zurück, dass in der Atmosphäre des Versuchsröhrchens kein Schwefelwasserstoff mehr gemessen wurde.

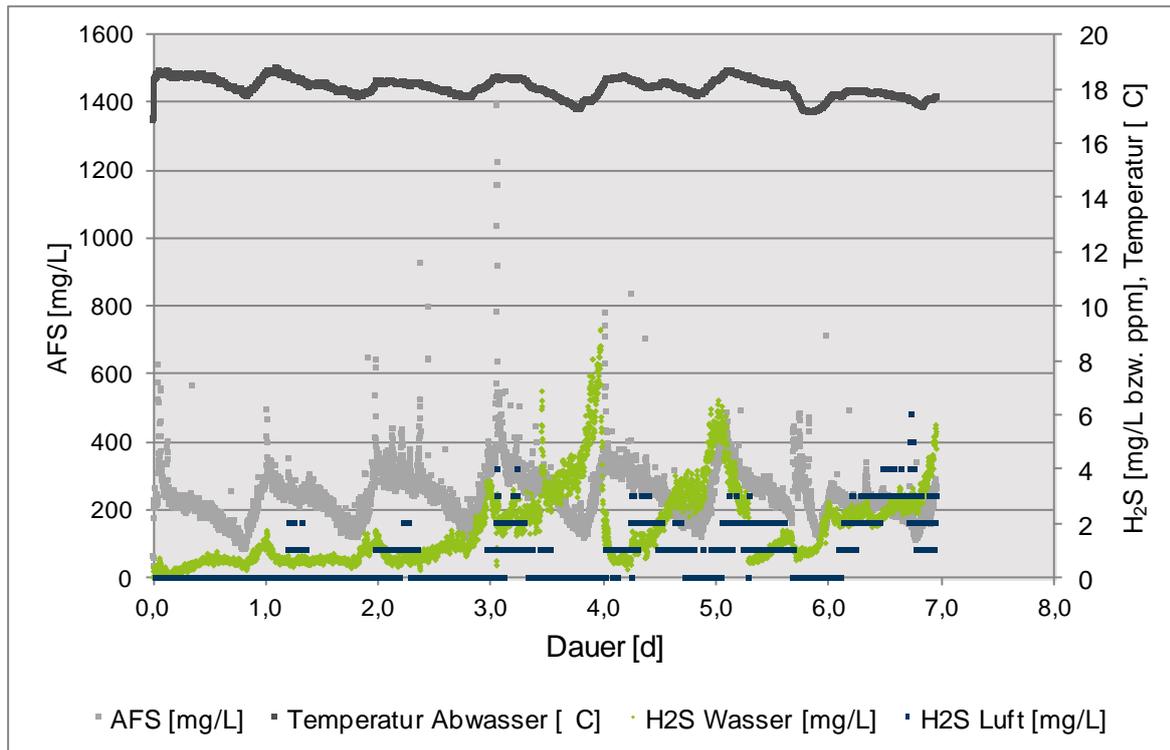


Bild 5.45: Verlauf von Schwefelwasserstoff, AFS und Temperatur über die Versuchsdauer

Gleiches passierte, wenn die Abwasserzufuhr unterbrochen wurde. Bild 5.46 zeigt eine Versuchsreihe mit zwei Ausfällen der Zulaufpumpe (zwischen dem 25. und 28.03.) Deutlich ist zu sehen, dass die H_2S -Produktion stoppte, da keine weiteren Sulfate für die Umsatzprozesse zu Schwefelwasserstoff zur Verfügung standen.

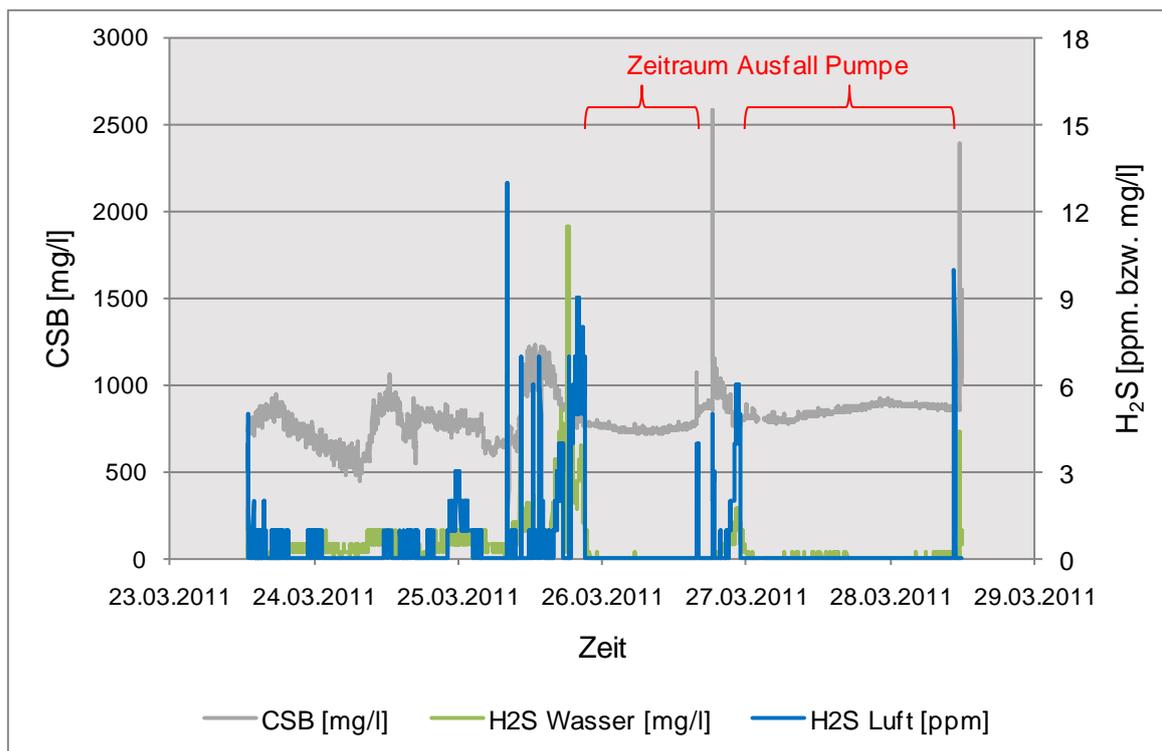


Bild 5.46: Verlauf der H₂S- und CSB-Konzentrationen

5.4 Zusammenfassung der praktischen Untersuchungen

Die Ablagerungsbildung in der Kanalteststrecke verlief bei den meisten Versuchsreihen sehr ähnlich. Schon während der ersten Minuten konnte beobachtet werden, wie Faserstoffe (Hygienepapier etc.) sich an der rauen Oberfläche des Sandpapiers verhakten und somit auch anderen Stoffen die Möglichkeiten boten, sich anzulagern. Nach etwa 4-7 Tagen bildete sich ein Biofilm aus, der wahrscheinlich mit dafür verantwortlich ist, dass sich kaum neue Faserstoffe ansammelten. Für das weitere Wachstum der Ablagerungen waren nun überwiegend mineralische Feststoffe (feiner bis grober Sand, vereinzelt auch kleine Steine) und seltener Essensreste und anderes organisches Material verantwortlich. Das Erscheinungsbild der Ablagerungssituation wandelte sich von den anfangs vereinzelt Ablagerungssinseln aus Faserstoffen hin zu einer gleichmäßigen, bis zu mehreren Zentimeter dicken, schwarzen Sedimentschicht.

Diese Entwicklung schlägt sich auch im in Kapitel 5.1.3 geschilderten Verlauf der Ablagerungsmengen nieder. Zu Beginn schwanken die Ablagerungsmengen noch sehr stark, da die einzelnen Ablagerungssinseln aus Faserstoffen jeweils große Volumen darstellen und Anlagerung oder Erosion solcher Faserstoffhaufen relativ große Einflüsse auf die gesamte Ablagerungsmenge haben. Nach etwa 1-2 Wochen vergleichmäßigte sich der Zuwachs der Ablagerungen, da die maßgebenden

Prozesse nun die Anlagerung und die Sedimentation von mineralischen und organischen Feststoffen sind.

Während der Versuchsreihen zeichnete sich ab, dass die Ablagerungsbildung mit zunehmender Versuchsdauer langsamer erfolgt, jedoch wurden bisher nicht genug lange Versuchsreihen durchgeführt, um verlässliche Aussagen treffen zu können, ob sich in Abhängigkeit von Gefälle, äquivalenter Sandrauheit und Abfluss irgendwann ein Gleichgewichtszustand einstellt.

Auffällig war, dass es bereits innerhalb der ersten Tage nach einer Komplettreinigung der Rohre zu Ablagerungszuständen kommt, bei denen an vereinzelt Stellen durch Akkumulation von Feststoffen Ablagerungshöhen erreicht werden, die bis zu 50 % der Querschnittshöhe erreichen und in der Praxis eine sofortige Reinigung der betroffenen Haltung erfordern würden. In den Versuchen zeigte sich jedoch, dass es Ablagerungsspitzen von kurzer Dauer waren. Innerhalb kurzer Zeit staute sich das Abwasser hinter den großen Ablagerungen auf und durch den erhöhten Wasserdruck wurden die Ablagerungen aufgelöst oder durch das Versuchsrohr und hinaus geschoben.

Neben hohen Ablagerungen kann es kurze Zeit (innerhalb von 1-2 Tagen) nach einer Reinigung auch schon wieder zu messbaren Schwefelwasserstoffkonzentrationen kommen. Dies ist höchstwahrscheinlich darauf zurückzuführen, dass die Ansiedlung von Desulfurikanten sehr schnell erfolgt. Dass sich das H_2S bereits im Abwasser befindet und erst im Versuchsrohr ausstrippt, ist eher unwahrscheinlich, da das Abwasser, bevor es in das Versuchsrohr gepumpt wird, über einen Feinrechen fließt und unter diesen turbulenten Bedingungen der größte Teil des evtl. vorhanden Schwefelwasserstoffs in die Atmosphäre entweicht.

Die Versuche zum Erosionswiderstand von Kanalablagerungen deuteten darauf hin, dass der Aufwand zum Lösen von Ablagerungen mit zunehmender Sedimentationsdauer ansteigt. Die beobachteten Größenordnungen der Erosionsschubspannungen waren sehr gering.

6 Betriebsorientierte Untersuchungen

6.1 Praxisbezug

Die betriebsorientierten Untersuchungen wurden unmittelbar an den Praxisanforderungen der Netzbetreiber ausgerichtet. Zur Identifizierung von Themenschwerpunkten für die Ermittlung betrieblicher Synergien wurden zunächst als Teil des Arbeitspakets 7 (AP 7) ein „Info-Tag Kanalreinigung – für Netzbetreiber mit eigenen Reinigungsfahrzeugen und eigenem Personal“ und ein „Info-Tag Kanalreinigung – für Netzbetreiber, die Reinigungsarbeiten beauftragen“ veranstaltet.

Für beide Betreibergruppen zeigten sich in der Umsetzung einer bedarfsorientierten Kanalreinigung ähnliche offene Fragestellungen, so mit Blick auf die Durchführung der Inspektion, die Bewertung der Ablagerungssituation, die Einsatzplanung sowie die eigentliche Ausführung der Kanalreinigung. Zur weiteren Bearbeitung dieser Schwerpunkt-Fragen wurde ausgehend von den über 50 Teilnehmern der Info-Tage der Erfahrungskreis Kanalbetrieb gegründet, an dem über 100 Netzbetreiber mitwirken (AP 5).

Im Einzelnen wurden die folgenden betriebsorientierten Untersuchungen durchgeführt:

- Prozessanalyse und Optimierungspotenziale (vgl. AP 7)
- Analyse typischer Schwachstellen im Kanalnetz, Hotline (vgl. AP 4)
- Materialien für die Förderung des Strategiewechsels (vgl. AP 8)

6.2 Prozessanalyse und Optimierungspotenziale

6.2.1 Prozessmodell

Als Grundlage für die Prozessanalyse wurde das im Forschungsprojekt „Bedarfsorientierte Kanalreinigung - Zustands-, Prozess- und Wirkungsanalyse -“ entwickelte Prozessmodell verwendet (Bild 6.1).

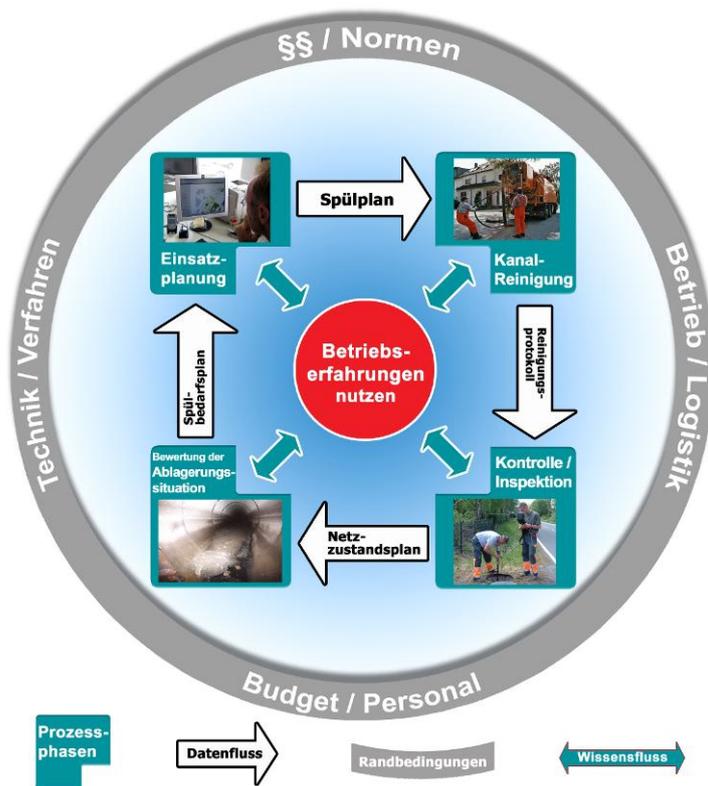


Bild 6.1: Prozessmodell für die Umsetzung der bedarfsorientierten Kanalreinigung (Orth et al., 2008)

Das Prozessmodell unterteilt die bedarfsorientierte Kanalreinigung in vier charakteristische Prozessphasen:

- Kontrolle und Inspektion
- Bewertung der Ablagerungssituation
- Einsatzplanung
- Kanalreinigung

Bei der Kontrolle und Inspektion werden die Ablagerungsdaten vom Betriebspersonal erfasst. Dazu können unterschiedliche Betriebsprozesse wie die Reinigung und Schachtinspektion genutzt werden. Alternativ dazu kann die Ablagerungserkennung mit einem Inspektionsteam durchgeführt werden, das fortlaufend ausschließlich die Ablagerungssituation im Kanalnetz untersucht. Diese Betriebsdaten können in einem Netzzustandsplan dokumentiert werden. Dieser kann außer den Ablagerungsdaten auch bspw. den baulichen Zustand, das Abwassersystem und -aufkommen sowie die kritischen Abflussgeschwindigkeiten enthalten.

Zur Bewertung der Ablagerungssituation können die gesammelten Ablagerungsdaten herangezogen und im Hinblick auf das Störfall- und Belästigungspotenzial beurteilt werden. Überdies können weitere Einflussfaktoren wie der Kanalzustand, die Reinigungsergebnisse sowie die Störfallmeldungen bei der Ablagerungsbewertung mitberücksichtigt werden. Aufbauend auf die Bewertung der Ablagerungssituation werden die Reinigungsintervalle in Abhängigkeit des Schadens- und Belästigungspotenzials festgelegt. Diese Bewertungsdaten können in einem Spülbedarfsplan zusammengefasst werden.

Bei der **Einsatzplanung** werden die ausgewerteten Ablagerungsdaten und die festgelegten Spülintervalle aus dem Spülbedarfsplan genutzt, um die Kanalreinigungsarbeiten zu organisieren. Ein weiterer Aspekt bei der Einsatzplanung ist, dass aktuelle Ereignisse wie Störfälle mitberücksichtigt werden. Im Ergebnis kann die Einsatzplanung im Spülplan zusammengefasst werden.

Aufbauend auf den Spülplan wird ein Reinigungsauftrag erstellt, um die Durchführung der **Kanalreinigung** zu veranlassen. Die Kanalreinigungsarbeiten können dabei je nach Betriebsstruktur entweder mit eigenem Personal und eigenen Fahrzeugen oder aber auch mit einem privaten Dienstleister durchgeführt werden. Die Quittierung der Arbeiten und besondere Vorkommnisse können mittels Reinigungsprotokoll oder mobilem Datenerfassungsgerät dokumentiert werden. Zudem können weitere wesentliche Einflussfaktoren für die Spülplanerstellung wie die Anzahl der Reinigungszyklen in dem Reinigungsprotokoll dokumentiert werden.

Darüber hinaus sind bei der Umsetzung der bedarfsorientierten Kanalreinigung die äußeren Randbedingungen zu berücksichtigen. Diese werden beeinflusst von den rechtlichen Rahmenbedingungen, dem Budget und der jeweiligen Betriebsstruktur des Netzbetreibers.

Nachfolgend werden die Ergebnisse aus der Prozessanalyse der o. a. vier charakteristischen Teilphasen dargestellt und entsprechende Optimierungspotenziale abgeleitet.

6.2.2 Inspektion und Kontrolle

6.2.2.1 Ist-Aufnahme und Analyse

Die „Inspektion und Kontrolle“ ist ein wesentlicher Bestandteil der bedarfsorientierten Kanalreinigung. Die Ablagerungsdaten werden dabei i. d. R. mittels Auswertungsbogen vor der Durchführung der Kanalreinigung erhoben.

Andere Abwasserbetriebe nutzen die wiederkehrende Schachtinspektion, um auch die Ablagerungssituation zu erkennen und zu dokumentieren. Dabei kann neben der reinen Sichtprüfung des Schachtes (Inaugenscheinnahme) zur Ablagerungserkennung auch ein Kanalspiegel oder eine Schachtkamera eingesetzt werden.

Auf den Einsatz von TV-Kameras allein zur Ablagerungserkennung wird aus Kostengründen in der Regel verzichtet. Die „sehende Düse“, eine Reinigungsdüse mit integrierter Kamera, findet ebenfalls kaum Anwendung.

Unabhängig von der Inspektionsmethode können die Daten unterschiedlich dokumentiert werden, z. B. mittels Papierprotokoll oder digital mittels mobiler Datenerfassungsgeräte, wie Laptops und Tablet-PC.

Im Rahmen des Workshops „Bedarfsorientierter Spülplan“ (Spülbedarfsplan) stellten die eingeladenen Abwasserbetriebe unterschiedliche Methoden bzw. Werkzeuge zur Erkennung und Dokumentation von Ablagerungen vor (Bild 6.2, oben). Folgende Fragestellungen wurden in diesem Workshop vertieft:

- Wie werden Ablagerungen festgestellt?
- Welche Werkzeuge können unterstützen?
- Welche Ablagerungsdaten sind erforderlich?





Bild 6.2: Workshop-Eindrücke „Inspektion und Kontrolle“: Kanalspiegel im Einsatz (oben, links); Schachtkamera im Einsatz (oben, rechts); Handling der Schachtkamera (unten, links); Kamerabedienung zur Beurteilung der Ablagerungssituation (unten, rechts).

Funktion, Kosten und Aufwand der verschiedenen Vorgehensweisen und Inspektionsmethoden (Inaugenscheinnahme, Kanalspiegel und Schachtkamera) wurden erläutert und intensiv diskutiert. Darüber hinaus hatten die Workshop-Teilnehmer die Möglichkeit, verschiedene Inspektionsmethoden selber auszuprobieren und so weitere Erfahrungen und Informationen zur Einsatzfähigkeit und zum Handling zu gewinnen (Bild 6.2, unten).

Bild 6.3 stellt einen Auszug aus einem praxiserprobten Dokumentationsschema zur Ablagerungserkennung dar, das im Rahmen des Workshops exemplarisch vorgestellt wurde. Die Ablagerungssituation wird hier mittels Inaugenscheinnahme des Schachtgerinnes erfasst und die Ablagerungsdaten werden gemeinsam mit den Ergebnissen der Schachtinspektion in einem einheitlichen Protokoll erfasst.

- Die Praxiserfahrungen zeigen, dass übliche Methoden zur Ablagerungserkennung wie die Schachtkamera, der Kanalspiegel und die Inaugenscheinnahme geeignet sind, die Ablagerungssituation ausreichend genau zu erfassen. Die Auswahl der Methode hängt dann davon ab, wie mit (noch) vertretbarem Sach- und Personalaufwand in der Praxis möglichst aussagekräftige Ergebnisse erzielt werden können.
- Die Aussagekraft der eingesetzten Inspektionsmethoden ist sehr unterschiedlich. Durch einfache Inaugenscheinnahme kann das Gerinne bereits auf Ablagerungen beurteilt werden. Der Einsatz von Kanalspiegeln und Schachtkameras empfiehlt sich, wenn auch die Ablagerungssituation in der Kanalhaltung erfasst werden soll. Bei größeren Kanaldurchmessern kann hierzu alternativ auch ein Schachteinstieg mit (teilweiser) Begehung der Kanalhaltung (Inaugenscheinnahme) durchgeführt werden.
- Derzeit wird die Ablagerungssituation sehr oft durch das Betriebspersonal nur subjektiv eingeschätzt und uneinheitlich dokumentiert. Bisher fehlt eine Orientierung zur sachgerechten Aufnahme von Ablagerungsdaten.
- Im Rahmen der Dokumentation von Ablagerungen wird zurzeit meist die Ablagerungshöhe erfasst. Darüber hinaus empfiehlt es sich u. a. auch die Ablagerungskonsistenz, den baulichen Zustand und Störfälle aufzunehmen.
- Eine standardisierte Datenaufnahme mittels Protokoll oder mobilem Datenerfassungsgerät kann die Datenerfassung beschleunigen und Fehlerquellen minimieren. So sollte der Verschmutzungsgrad in maximal drei Klassen (z. B. gering, mittel und viel) differenziert werden, um eine praktikable Einnormung durch das Betriebspersonal zu gestatten.
- Dokumentationsfehler können auch entstehen, wenn z. B. nah beieinander liegende Abwasserschächte nur fehlerhaft den Plandaten zugeordnet werden. Zur eindeutigen Identifikation der Abwasserschächte können Schachterkennungssysteme wie Transponder, Barcodes oder Schilder eine Unterstützung bieten.
- Die Einführung und Konzeptentwicklung zur bedarfsorientierten Kanalreinigung sollte in enger Zusammenarbeit mit dem Betriebspersonal durchgeführt werden. Zur Erreichung einer effizienten Reinigungsstrategie und umfassenden Kenntnissen über die Kanalnetze müssen die Ziele und Auswirkungen offen zwischen Betreiber und Betriebspersonal kommuniziert werden.

- Um Synergiepotenziale zu erschließen, sollte die Ablagerungsinspektion in bestehende Betriebsprozesse wie Kanalreinigung, Schachtinspektionen oder Schmutzfängerleerung eingebunden werden. So können die freiwerdenden Personalkapazitäten auch zur Bildung von Inspektionsteams genutzt werden.

Objektive Datenaufnahme mit Schachtbezug erforderlich!

6.2.3 Bewertung der Ablagerungssituation

6.2.3.1 Ist-Aufnahme und Analyse

In der Teilphase „Bewertung der Ablagerungssituation“ werden i. d. R. die mittels Papierprotokollen erfassten Ablagerungsdaten händisch in ein Tabellenkalkulationsprogramm wie MS Excel, eine Datenbank z. B. erstellt in MS Access oder ein anderes EDV-System eingegeben. Andere Netzbetreiber übermitteln die mit mobilen Datenerfassungsgeräten dokumentierten Ablagerungsdaten automatisiert an ein EDV-System. Anschließend wird die erfasste Ablagerungssituation im Hinblick auf das Schadens- und Belästigungspotenzial beurteilt und ein Reinigungsintervall für die Kanalhaltung festgelegt.

Im Rahmen des Workshops „Bedarfsorientierter Spülplan“ (Spülbedarfsplan) (Bild 6.4) stellten die eingeladenen Abwasserbetriebe verschiedene Vorgehensweisen zur Bewertung der Ablagerungssituation vor.

Folgende offenen Fragestellungen wurden in diesem Workshop diskutiert:

- Wie wird das Reinigungsintervall festgelegt?
- Wie können die Ablagerungen bewertet werden?
- Welche Einflussfaktoren sind zu berücksichtigen?

Praxiserfahrungen zeigen, dass die Bewertung der Ablagerungssituation zurzeit weitgehend auf Basis der Ablagerungshöhe und -menge vorgenommen wird. Sofern die Ablagerungen in Verschmutzungsklassen eingeteilt werden, z. B. gering, mittel und viel, variieren die hieraus abzuleitenden Maßnahmen nach rein subjektiven Erwägungen erheblich. I. d. R. stehen kaum Erfahrungswerte und gesichertes Wissen über die tatsächlich erforderlichen Reinigungsintervalle zur Verfügung. Entsprechend folgern einige Netzbetreiber für die Ablagerungssituation gering - Intervall wird erhöht, mittel – Intervall wird beibehalten und viel - Intervall wird reduziert. Andere Netzbetreiber legen wiederum fest, dass eine Reinigung der Kanä-

le lediglich bei den Verschmutzungsklassen „mittel“ und „viel“, oder sogar nur im Fall „viel“ durchgeführt wird. Gelegentlich wird auch die Anzahl der notwendigen Reinigungszyklen als alleinige Grundlage zur Bestimmung von Reinigungsintervallen herangezogen.

Im Rahmen des Workshops wurde intensiv diskutiert, welche weiteren Einflussfaktoren, neben Ablagerungshöhe und -menge, zur Bewertung der Ablagerungssituation herangezogen werden können. Im Einzelnen wurden folgende bedeutende Einflussfaktoren genannt:

- Ablagerungshöhe und -menge
- Ablagerungsart
- Historie der Verschmutzungsentwicklung (Verschmutzungsgrad)
- Anzahl der Reinigungszyklen
- Kanalzustand und Rohrmaterial
- Entwässerungssystem
- Störfälle, z. B. Veränderung der hydraulischen Verhältnisse
- Niederschlagshöhen (Remobilisierung?)





Bild 6.4: Workshop-Eindrücke „Bewertung der Ablagerungssituation“: Präsentation Netzbetreiber (oben, links); Auditorium (oben, rechts); Moderierte Diskussion (unten, links); Sammlung von Einflussfaktoren (unten, rechts).

Die tatsächliche Bedeutung der vorgenannten Einflussfaktoren ist im Rahmen von Laborversuchen und weiteren Praxiserhebungen noch zu hinterfragen.

6.2.3.2 Ergebnisse und Empfehlungen

Im Ergebnis lassen sich folgende Hinweise und Empfehlungen zur Bewertung und Umsetzung des Teilprozesses „Bewertung der Ablagerungssituation“ zusammenfassen:

- Praxiserfahrungen zeigen, dass die Netzbetreiber selten Ablagerungsdaten erheben. Bei den Netzbetreibern, die Ablagerungsdaten erfassen, wird die Bewertung der Ablagerungssituation zumeist auf Basis der Ablagerungshöhe und -menge vorgenommen. Die dann erforderlichen Maßnahmen werden von den Netzbetreibern allerdings unterschiedlich bewertet, so kann z. B. die Wahl des Reinigungsintervalls bei ähnlicher Ablagerungssituation erkennbar voneinander abweichen.
- Weitere Einflussfaktoren für die Bewertung der Ablagerungssituation, wie z. B. Ablagerungsart und -konsistenz, werden in der Praxis kaum mitberücksichtigt, weil deren Wirkung selten bekannt ist. Hier besteht Verbesserungsbedarf. So kann ein einheitliches Bewertungsschema helfen, alle maßgeblichen Einflussfaktoren in geeigneter Weise in die Bewertung der Ablagerungssituation einzubeziehen.
- Die identifizierten Störfälle sollten zur Intervallfestlegung der Kanalhaltungen ebenfalls bewertet werden. Beispielsweise können einige Hindernisse, wie ein herabgestürzter Schmutzfänger, nach der Beseitigung als einmalig-

ges Ereignis gewertet werden. Andere Störfälle, wie Wurzeleinwuchs und/oder Verstopfungen können zu weitergehenden Maßnahmen oder kürzeren Reinigungsintervallen führen.

- Um auf der sicheren Seite zu sein, bietet es sich an, die Reinigungsintervalle zunächst vergleichsweise niedrig anzusetzen und bei störungsfreiem Betrieb schrittweise zu erhöhen, ggf. bis zur nächsten Ablagerungsbewertung.

Bewertungsschema „Ablagerung - Einflussfaktoren - Reinigungsbedarf“
zur Intervallanpassung erforderlich!

6.2.4 Einsatzplanung

6.2.4.1 Ist-Aufnahme und Analyse

In der Teilphase „Einsatzplanung“ wird vom Verwaltungspersonal aufbauend auf die Ablagerungsbewertung und Intervallfestlegung ein Spülplan erstellt. Der Spülplan beinhaltet die Reinigungszeiträume für Netzabschnitte im Kanalnetz. Darüber hinaus können aktuelle Ereignisse wie die Beseitigung von Störfällen bei der Planung berücksichtigt werden.

Für die Spülplanerstellung kann sowohl ein Tabellenkalkulationsprogramm wie MS Excel, eine selbst erstellte Datenbank z. B. in MS Access oder ein anderes EDV-System genutzt werden.

Im Rahmen des Workshops „Betriebsführungssysteme und Kanaldatenbanken“ stellten die eingeladenen Netzbetreiber ihre Vorgehensweise im Hinblick auf das eingesetzte EDV-System zur Einsatzplanung vor. Folgende Fragestellungen wurden in diesem Workshop vertieft:

- Was können EDV-Systeme leisten?
- Wie viel Zeitaufwand ist angemessen?
- Was ist bei der Anschaffung zu berücksichtigen?

Der Workshop bot eine Plattform für den intensiven Erfahrungsaustausch von Abwasserbetrieben. Ziel war es, aus Fehlern zu lernen und Best-Practice-Beispiele zu finden. Jeder Teilnehmer hatte die Möglichkeit, die Erfahrungen anderer Kommunen kennenzulernen und diese in kleinen Gesprächsrunden zu diskutieren (Bild 6.5).



Bild 6.5: Workshop-Eindrücke „Einsatzplanung“: Netzbetreiber stellen Vorgehensweise vor (links); Intensive Diskussion (rechts)

Im Folgenden werden exemplarisch die Vorgehensweisen von Netzbetreibern im Hinblick auf die Anschaffung eines EDV-Systems und die Einsatzplanung der Kanalreinigungsarbeiten mit einem EDV-System dargestellt.

Fallbeispiel 1: Anschaffung eines EDV-Systems (Müller et al., 2011)

Im Rahmen des Workshops stellte ein Netzbetreiber die Vorgehensweise bei der Anschaffung eines EDV-Systems vor (Bild 6.6). Die selbst erstellte Datenbank wurde durch ein spezielles EDV-System ersetzt, um auch Anforderungen an ein integriertes und ganzheitliches Datenmanagement sowie die Einbindung von Transpondern und mobilen Datenerfassungsgeräten in das Gesamtkonzept zu unterstützen.

Der Anschaffungsprozess für das EDV-System umfasste mehrere Iterationsschritte. Dabei wurden in der Anschaffungsphase unterschiedliche EDV-Systeme über einen längeren Zeitraum nacheinander getestet, um deren Wirksamkeit sowie Aufwand und Nutzen vergleichen zu können. Im Einzelnen wurde in folgenden Schritten vorgegangen (Müller et al., 2011):

- Festlegung der Projektziele
- Erstellung eines Leistungskataloges
- Ausschreibung/ Preisanfrage
- Angebotsauswertung
- Präsentation von drei Produkten (engere Auswahl)
- Test der Software mit Echtdateien des Netzbetreibers

- Bietergespräche/ Vertragsverhandlungen
- Vertragserstellung und Auftragserteilung
- Datenaufbereitung für Import
- Bereitstellung der IT-Infrastruktur
- Softwareinstallation
- Datenimport
- Übergabe
- Schulung

Mit der Anschaffung des EDV-Systems werden nach Aussage des Netzbetreibers unterschiedliche Ziele verfolgt, wie die Optimierung des Personal- und Maschineneinsatzes und ein zielorientiertes Arbeiten durch einheitliche Dokumentation der durchgeführten Tätigkeiten.

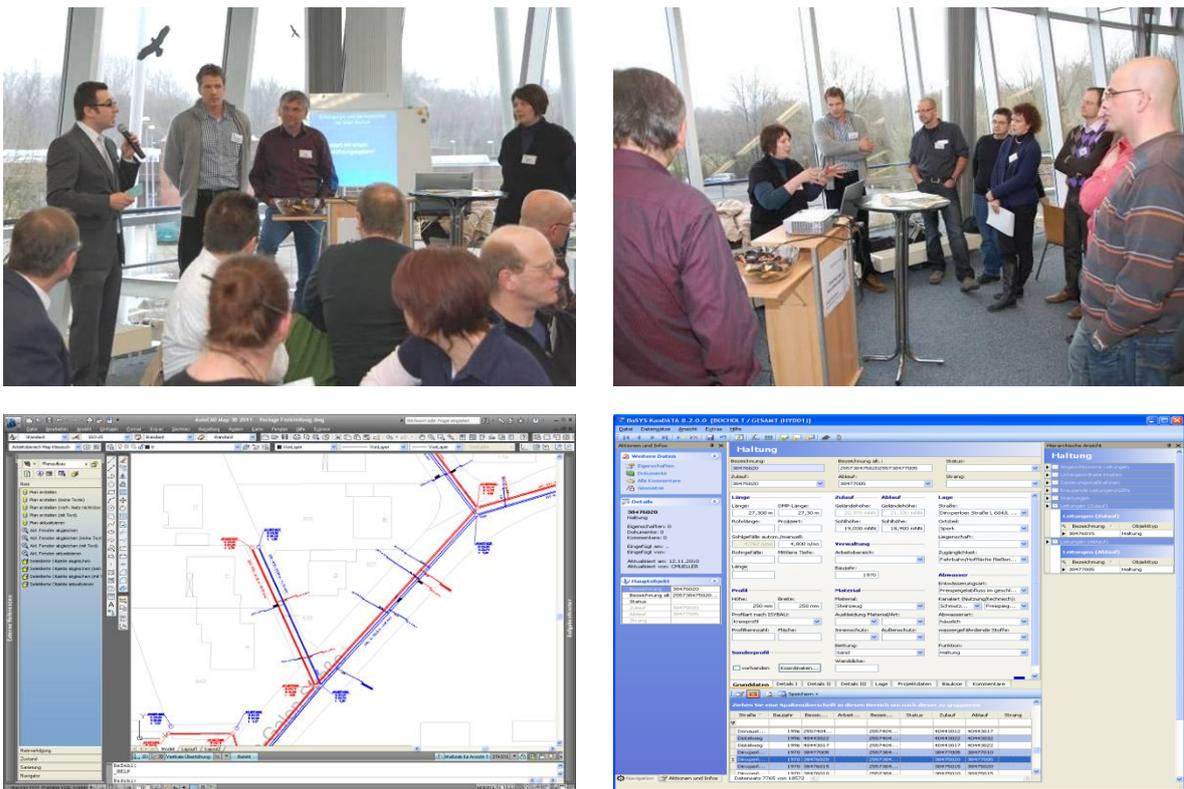


Bild 6.6: Workshop „Betriebsführungssysteme und Kanaldatenbanken“: Netzbetreiber stellen ihr Konzept zur Diskussion (oben, links); Gesprächsrunde (oben, rechts); Screenshots EDV-System (unten) (Müller et al., 2011).

Erste Erfahrungen mit dem EDV-System zeigen, dass nach zunächst zeitintensiver Einführungsphase der Verwaltungsaufwand für die Einsatzplanung deutlich reduziert werden konnte.

Fallbeispiel 2: Einsatzplanung mit einem EDV-System (Lampe und Barner, 2011)

Bei einem weiteren Netzbetreiber wird ein Betriebsführungssystem für die Einsatzplanung eingesetzt (vgl. Bild 6.7 und Bild 6.8). Hierbei werden in der Verwaltung mit der Betriebsführungssoftware die Reinigungsabschnitte festgelegt und die Ergebnisse in Papierform an das Reinigungspersonal übergeben. Das Reinigungspersonal nutzt diese Angaben zur Erstellung eines eigenen Tourenplans am Fahrzeug-Laptop. Im Rahmen der Kanalreinigung werden vom Reinigungspersonal auch der Zustand der Schachtbauwerke, der Verschmutzungsgrad der Kanalhaltung und weitere Besonderheiten erfasst. Nach Abschluss der Reinigungsarbeiten werden die neu erfassten Daten vom Fahrzeug-Laptop auf das zentrale EDV-System übertragen. Dabei wird systemseitig die Plausibilität der Daten bereits geprüft. Durch die zentrale Datenhaltung werden Informationsverluste und/oder Doppelarbeiten bei Einsatz mehrerer Fahrzeuge vermieden. Die übertragenen Daten werden darüber hinaus genutzt, um die künftigen Reinigungsaufträge mit ggf. neuen Intervallen zu generieren. Intervalländerungen können wiederum durch die dann beauftragten Mitarbeiter bestätigt oder widerrufen werden.

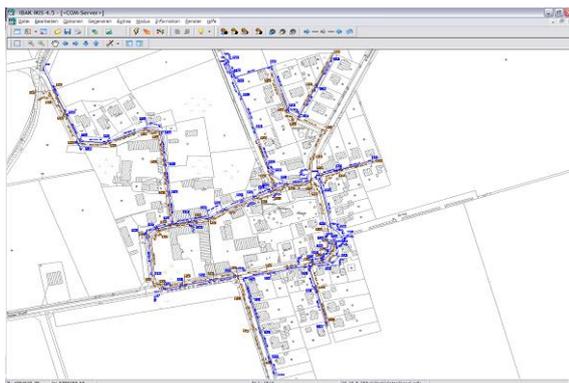


Bild 6.7: Plandarstellung im EDV-System (Lampe und Barner, 2011)

Auftr.Nr.	Letzte Ausführung	Auftragsbeschreibung	Status	Auftragsart	Intervall	Auftragsart	Planungsvorschlag für	Datum	Fälligkeit
216	04.08.2011	Kanal SF 4	0	23	Wartung	2	Jahres	01.08.2011	01.08.2011
216	04.08.2011	Kanal SF 1	0	23	Wartung	2	Jahres	01.08.2011	01.08.2011
208	04.08.2011	Kanal SF 2	0	23	Wartung	2	Jahres	01.08.2011	01.08.2011
192	04.08.2011	Kanal SF 3	0	23	Wartung	2	Jahres	01.08.2011	01.08.2011
192	04.08.2011	Kanal SF 7	0	23	Wartung	2	Jahres	01.08.2011	01.08.2011
192	04.08.2011	Kanal SF 8	0	23	Wartung	2	Jahres	01.08.2011	01.08.2011
192	04.08.2011	Kanal SF 5	0	23	Wartung	2	Jahres	01.08.2011	01.08.2011
192	04.08.2011	Kanal SF 6	0	23	Wartung	2	Jahres	01.08.2011	01.08.2011
192	04.08.2011	Kanal SF 9	0	23	Wartung	2	Jahres	01.08.2011	01.08.2011
192	04.08.2011	Kanal SF 10	0	23	Wartung	2	Jahres	01.08.2011	01.08.2011
192	04.08.2011	Kanal SF 11	0	23	Wartung	2	Jahres	01.08.2011	01.08.2011
192	04.08.2011	Kanal SF 12	0	23	Wartung	2	Jahres	01.08.2011	01.08.2011
192	04.08.2011	Kanal SF 13	0	23	Wartung	2	Jahres	01.08.2011	01.08.2011
192	04.08.2011	Kanal SF 14	0	23	Wartung	2	Jahres	01.08.2011	01.08.2011
192	04.08.2011	Kanal SF 15	0	23	Wartung	2	Jahres	01.08.2011	01.08.2011
192	04.08.2011	Kanal SF 16	0	23	Wartung	2	Jahres	01.08.2011	01.08.2011
192	04.08.2011	Kanal SF 17	0	23	Wartung	2	Jahres	01.08.2011	01.08.2011
192	04.08.2011	Kanal SF 18	0	23	Wartung	2	Jahres	01.08.2011	01.08.2011
192	04.08.2011	Kanal SF 19	0	23	Wartung	2	Jahres	01.08.2011	01.08.2011
192	04.08.2011	Kanal SF 20	0	23	Wartung	2	Jahres	01.08.2011	01.08.2011
192	04.08.2011	Kanal SF 21	0	23	Wartung	2	Jahres	01.08.2011	01.08.2011
192	04.08.2011	Kanal SF 22	0	23	Wartung	2	Jahres	01.08.2011	01.08.2011
192	04.08.2011	Kanal SF 23	0	23	Wartung	2	Jahres	01.08.2011	01.08.2011
192	04.08.2011	Kanal SF 24	0	23	Wartung	2	Jahres	01.08.2011	01.08.2011
192	04.08.2011	Kanal SF 25	0	23	Wartung	2	Jahres	01.08.2011	01.08.2011
192	04.08.2011	Kanal SF 26	0	23	Wartung	2	Jahres	01.08.2011	01.08.2011
192	04.08.2011	Kanal SF 27	0	23	Wartung	2	Jahres	01.08.2011	01.08.2011
192	04.08.2011	Kanal SF 28	0	23	Wartung	2	Jahres	01.08.2011	01.08.2011
192	04.08.2011	Kanal SF 29	0	23	Wartung	2	Jahres	01.08.2011	01.08.2011
192	04.08.2011	Kanal SF 30	0	23	Wartung	2	Jahres	01.08.2011	01.08.2011
192	04.08.2011	Kanal SF 31	0	23	Wartung	2	Jahres	01.08.2011	01.08.2011
192	04.08.2011	Kanal SF 32	0	23	Wartung	2	Jahres	01.08.2011	01.08.2011
192	04.08.2011	Kanal SF 33	0	23	Wartung	2	Jahres	01.08.2011	01.08.2011
192	04.08.2011	Kanal SF 34	0	23	Wartung	2	Jahres	01.08.2011	01.08.2011
192	04.08.2011	Kanal SF 35	0	23	Wartung	2	Jahres	01.08.2011	01.08.2011
192	04.08.2011	Kanal SF 36	0	23	Wartung	2	Jahres	01.08.2011	01.08.2011
192	04.08.2011	Kanal SF 37	0	23	Wartung	2	Jahres	01.08.2011	01.08.2011
192	04.08.2011	Kanal SF 38	0	23	Wartung	2	Jahres	01.08.2011	01.08.2011
192	04.08.2011	Kanal SF 39	0	23	Wartung	2	Jahres	01.08.2011	01.08.2011
192	04.08.2011	Kanal SF 40	0	23	Wartung	2	Jahres	01.08.2011	01.08.2011
192	04.08.2011	Kanal SF 41	0	23	Wartung	2	Jahres	01.08.2011	01.08.2011
192	04.08.2011	Kanal SF 42	0	23	Wartung	2	Jahres	01.08.2011	01.08.2011
192	04.08.2011	Kanal SF 43	0	23	Wartung	2	Jahres	01.08.2011	01.08.2011
192	04.08.2011	Kanal SF 44	0	23	Wartung	2	Jahres	01.08.2011	01.08.2011
192	04.08.2011	Kanal SF 45	0	23	Wartung	2	Jahres	01.08.2011	01.08.2011
192	04.08.2011	Kanal SF 46	0	23	Wartung	2	Jahres	01.08.2011	01.08.2011
192	04.08.2011	Kanal SF 47	0	23	Wartung	2	Jahres	01.08.2011	01.08.2011
192	04.08.2011	Kanal SF 48	0	23	Wartung	2	Jahres	01.08.2011	01.08.2011
192	04.08.2011	Kanal SF 49	0	23	Wartung	2	Jahres	01.08.2011	01.08.2011
192	04.08.2011	Kanal SF 50	0	23	Wartung	2	Jahres	01.08.2011	01.08.2011
192	04.08.2011	Kanal SF 51	0	23	Wartung	2	Jahres	01.08.2011	01.08.2011
192	04.08.2011	Kanal SF 52	0	23	Wartung	2	Jahres	01.08.2011	01.08.2011
192	04.08.2011	Kanal SF 53	0	23	Wartung	2	Jahres	01.08.2011	01.08.2011
192	04.08.2011	Kanal SF 54	0	23	Wartung	2	Jahres	01.08.2011	01.08.2011
192	04.08.2011	Kanal SF 55	0	23	Wartung	2	Jahres	01.08.2011	01.08.2011
192	04.08.2011	Kanal SF 56	0	23	Wartung	2	Jahres	01.08.2011	01.08.2011
192	04.08.2011	Kanal SF 57	0	23	Wartung	2	Jahres	01.08.2011	01.08.2011
192	04.08.2011	Kanal SF 58	0	23	Wartung	2	Jahres	01.08.2011	01.08.2011
192	04.08.2011	Kanal SF 59	0	23	Wartung	2	Jahres	01.08.2011	01.08.2011
192	04.08.2011	Kanal SF 60	0	23	Wartung	2	Jahres	01.08.2011	01.08.2011
192	04.08.2011	Kanal SF 61	0	23	Wartung	2	Jahres	01.08.2011	01.08.2011
192	04.08.2011	Kanal SF 62	0	23	Wartung	2	Jahres	01.08.2011	01.08.2011
192	04.08.2011	Kanal SF 63	0	23	Wartung	2	Jahres	01.08.2011	01.08.2011
192	04.08.2011	Kanal SF 64	0	23	Wartung	2	Jahres	01.08.2011	01.08.2011
192	04.08.2011	Kanal SF 65	0	23	Wartung	2	Jahres	01.08.2011	01.08.2011
192	04.08.2011	Kanal SF 66	0	23	Wartung	2	Jahres	01.08.2011	01.08.2011
192	04.08.2011	Kanal SF 67	0	23	Wartung	2	Jahres	01.08.2011	01.08.2011
192	04.08.2011	Kanal SF 68	0	23	Wartung	2	Jahres	01.08.2011	01.08.2011
192	04.08.2011	Kanal SF 69	0	23	Wartung	2	Jahres	01.08.2011	01.08.2011
192	04.08.2011	Kanal SF 70	0	23	Wartung	2	Jahres	01.08.2011	01.08.2011
192	04.08.2011	Kanal SF 71	0	23	Wartung	2	Jahres	01.08.2011	01.08.2011
192	04.08.2011	Kanal SF 72	0	23	Wartung	2	Jahres	01.08.2011	01.08.2011
192	04.08.2011	Kanal SF 73	0	23	Wartung	2	Jahres	01.08.2011	01.08.2011
192	04.08.2011	Kanal SF 74	0	23	Wartung	2	Jahres	01.08.2011	01.08.2011
192	04.08.2011	Kanal SF 75	0	23	Wartung	2	Jahres	01.08.2011	01.08.2011
192	04.08.2011	Kanal SF 76	0	23	Wartung	2	Jahres	01.08.2011	01.08.2011
192	04.08.2011	Kanal SF 77	0	23	Wartung	2	Jahres	01.08.2011	01.08.2011
192	04.08.2011	Kanal SF 78	0	23	Wartung	2	Jahres	01.08.2011	01.08.2011
192	04.08.2011	Kanal SF 79	0	23	Wartung	2	Jahres	01.08.2011	01.08.2011
192	04.08.2011	Kanal SF 80	0	23	Wartung	2	Jahres	01.08.2011	01.08.2011
192	04.08.2011	Kanal SF 81	0	23	Wartung	2	Jahres	01.08.2011	01.08.2011
192	04.08.2011	Kanal SF 82	0	23	Wartung	2	Jahres	01.08.2011	01.08.2011
192	04.08.2011	Kanal SF 83	0	23	Wartung	2	Jahres	01.08.2011	01.08.2011
192	04.08.2011	Kanal SF 84	0	23	Wartung	2	Jahres	01.08.2011	01.08.2011
192	04.08.2011	Kanal SF 85	0	23	Wartung	2	Jahres	01.08.2011	01.08.2011
192	04.08.2011	Kanal SF 86	0	23	Wartung	2	Jahres	01.08.2011	01.08.2011
192	04.08.2011	Kanal SF 87	0	23	Wartung	2	Jahres	01.08.2011	01.08.2011
192	04.08.2011	Kanal SF 88	0	23	Wartung	2	Jahres	01.08.2011	01.08.2011
192	04.08.2011	Kanal SF 89	0	23	Wartung	2	Jahres	01.08.2011	01.08.2011
192	04.08.2011	Kanal SF 90	0	23	Wartung	2	Jahres	01.08.2011	01.08.2011
192	04.08.2011	Kanal SF 91	0	23	Wartung	2	Jahres	01.08.2011	01.08.2011
192	04.08.2011	Kanal SF 92	0	23	Wartung	2	Jahres	01.08.2011	01.08.2011
192	04.08.2011	Kanal SF 93	0	23	Wartung	2	Jahres	01.08.2011	01.08.2011
192	04.08.2011	Kanal SF 94	0	23	Wartung	2	Jahres	01.08.2011	01.08.2011
192	04.08.2011	Kanal SF 95	0	23	Wartung	2	Jahres	01.08.2011	01.08.2011
192	04.08.2011	Kanal SF 96	0	23	Wartung	2	Jahres	01.08.2011	01.08.2011
192	04.08.2011	Kanal SF 97	0	23	Wartung	2	Jahres	01.08.2011	01.08.2011
192	04.08.2011	Kanal SF 98	0	23	Wartung	2	Jahres	01.08.2011	01.08.2011
192	04.08.2011	Kanal SF 99	0	23	Wartung	2	Jahres	01.08.2011	01.08.2011
192	04.08.2011	Kanal SF 100	0	23	Wartung	2	Jahres	01.08.2011	01.08.2011

Bild 6.8: Datenliste im EDV-System (Lampe und Bar

- Praxiserfahrungen zeigen, dass sich bei Einsatz einer Kanaldatenbank mit Betriebsführungssystem vielfältige Optimierungs-, Synergie- und Einsparpotenziale erschließen lassen. So können bspw. schnelle Abfragen zum Kanalzustand gestartet und über Filterabfragen alle noch zu reinigenden Kanäle für die weitere Planung aufgezeigt werden. Darüber hinaus kann die Historie der Kanalablagerungen verfolgt und so die Kanalreinigung an einen evtl. wachsenden Bedarf zielgerecht angepasst werden.
- Vor der Anschaffung eines EDV-Systems sind die Ziele und die Anforderungen an die Software zu definieren. Auf dieser Grundlage lassen sich dann mehrere EDV-Systeme über einen längeren Zeitraum testen und hinsichtlich ihrer Leistungsfähigkeit vergleichen, so dass schließlich ein für den konkreten Einsatzfall geeignetes System ausgewählt werden kann.
- Die angebotenen EDV-Systeme erfordern grundsätzlich eine besondere Anpassung für die vorgesehene Anwendung des jeweiligen Betreibers. I. d. R. wird erst durch eine benutzerorientierte Ausgestaltung der Anwendungsoberfläche, z. B. durch Filterabfragen, die effiziente Nutzung möglich.
- Leistungsumfang und -grenzen der unterschiedlichen EDV-Systeme sind bei den meisten Kanalnetzbetreibern kaum bekannt. Dies betrifft auch die Kostenstruktur der Software-Pakete und den Hardware-Aufwand.
- Der Spülplan sollte bauwerkspezifische Informationen (Neubau, Bestand, sanierter Kanal) enthalten, um die schonende und effiziente Kanalreinigung planen zu können. So lassen sich bspw. Druck und Durchfluss der Reinigungsdüse in Abhängigkeit vom baulichen Zustand beschränken. Ebenso können besondere Vorkommnisse oder Störfälle, z. B. Ausblasungen von Geruchsverschlüssen, in die Einsatzplanung einfließen, um auch an ggf. kritischen Stellen im Kanalnetz die Betriebsparameter in geeigneter Weise anzupassen.

Entscheidungshilfe zur Auswahl von EDV-Systemen erforderlich!

6.2.5 Kanalreinigung

6.2.5.1 Ist-Aufnahme und Analyse

In der Teilphase „Kanalreinigung“ werden die Kanalreinigungsarbeiten nach Spülplan mit eigenen Fahrzeugen und eigenem Personal oder durch private Dienstleister durchgeführt. Vorgaben und Randbedingungen für die Reinigungspraxis ergeben sich z. B. aus dem Arbeitsblatt ATV-DVWK-M 197 (ATV-DVWK, 2004) oder der DIN 19523 (DIN, 2008). Bspw. fordert das Arbeitsblatt ATV-DVWK-M 197 einen Druck unmittelbar an der Düse von 80-100 bar und die DIN 19523 die Einhaltung der Spülstrahlleistungsdichte von $330 \pm 15 \text{ W/mm}^2$ bei neuen Rohren. Allerdings kann gegenwärtig weder der Druck an der Düse noch die Einhaltung der Spülstrahlleistungsdichte am Reinigungsfahrzeug ohne Weiteres abgelesen bzw. überprüft werden. In der Folge ergeben sich vielfältige offene Fragestellungen im Hinblick auf die Durchführung von Kanalreinigungsarbeiten:

- Welcher Strahldruck an der Düse ist tatsächlich sinnvoll?
- Welche Grenzwerte sind einzuhalten?
- Welche Reinigungsparameter sind zu beachten?

Um die offenen Fragestellungen zu klären, wurde gemeinsam mit den Netzbetreibern das Leistungsprofil für Reinigungsfahrzeuge diskutiert. Im Ergebnis sollen geeignete Reinigungsparameter und Grenzwerte für die HD-Spülung festgelegt werden, um die Leistung der Reinigungsfahrzeuge nachvollziehbar überprüfen zu können. Drei Reinigungsfahrzeuge wurden bereits im Zuge des Projektes überprüft.

Messen: Druck- und Durchfluss

Bei dem Messprogramm wurde zunächst die Leistungsfähigkeit der Hochdruckpumpe in einer Freistrahlmessung ohne Düse überprüft. Als Richtwert kann hier die Herstellerangabe zur Leistungsfähigkeit der HD-Pumpe im Freistrahlbetrieb in Betracht gezogen werden (Bild 6.9). Darüber hinaus wurden der Druck am Fahrzeug und der Druck unmittelbar an der Düse gemessen (Bild 6.10).



Bild 6.9: Überprüfung der HD-Pumpe im Freistrahlabetrieb

Bild 6.10: Druck- und Durchflussmessung im Düsenbetrieb

Diese Vorgehensweise wurde gewählt, um den Druckverlust an der Düse zu ermitteln. Die Ergebnisse wurden in folgenden Diagrammen zusammengefasst (Bild 6.11, Bild 6.12).

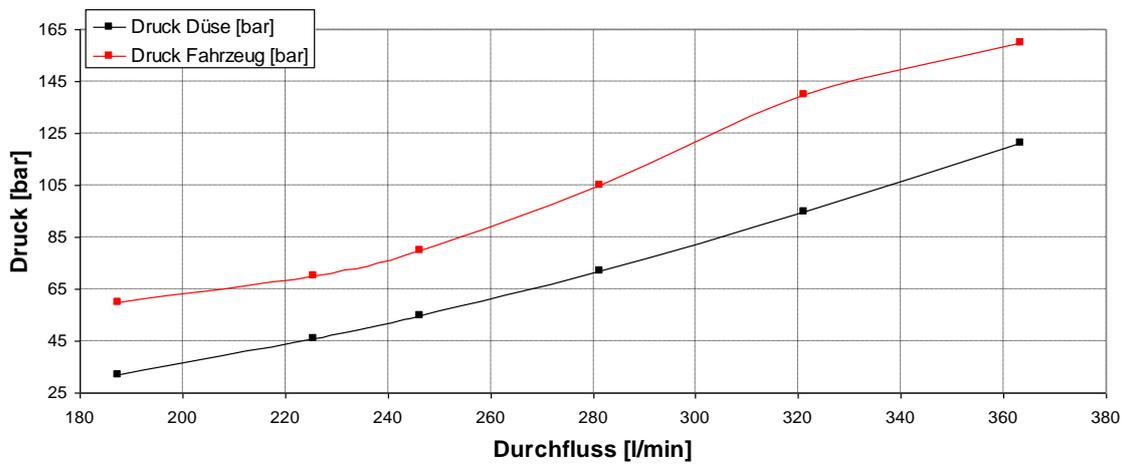


Bild 6.11: Druck am Fahrzeug und an der Düse für verschiedene Durchflüsse

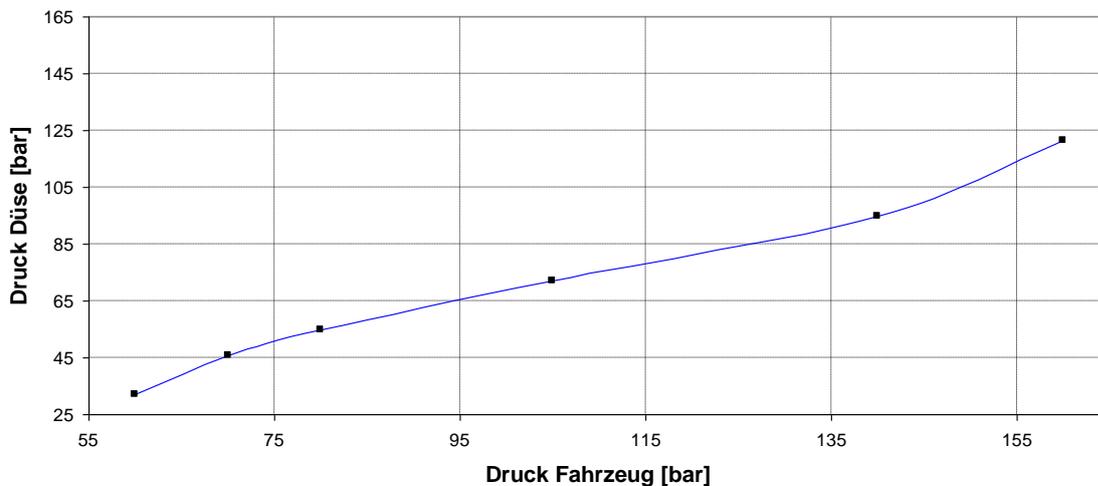


Bild 6.12: Düsenkennlinie für Fahrzeug (HD-Pumpe/ Schlauch), abgeleitet aus Bild 6.11

Darüber hinaus wurde der Druck und Durchfluss in Abhängigkeit der unterschiedlichen Druckstufen unmittelbar an der Düse gemessen, um mögliche Auffälligkeiten bzw. Schwankungen der Austrittsverluste zu identifizieren (Bild 6.13).

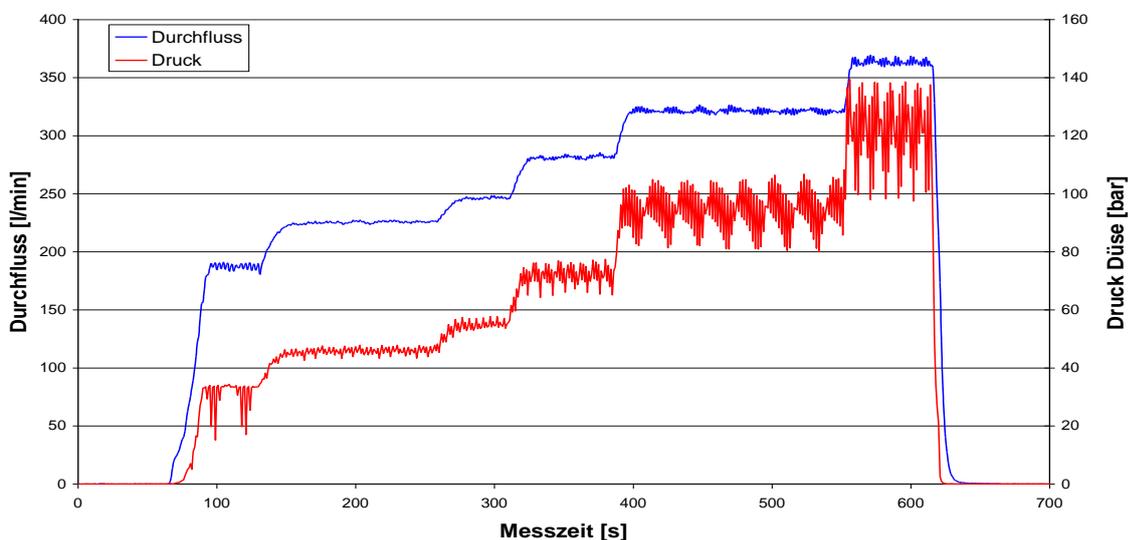


Bild 6.13: Druck- und Durchflussmessungen in Abhängigkeit der Messzeit

Saugen: Leistungs- und Vergleichstests der Vakuumpumpen

Bei den Saugprüfungen wurde die Saugleistungsfähigkeit von Vakuumpumpen bei allen drei Reinigungsfahrzeugen ermittelt, indem ein 90 Liter Behälter mit

Räumgut (Sand) bis zur Oberkante befüllt wurde. Nacheinander wurden die Behälter mit dem Räumgutinhalt durch die Fahrzeuge aus einer Tiefe von ca. 4,50 m mittels Vakuumpumpe komplett aufgesaugt (vgl. Bild 6.14). Hierbei wurde jeweils die Zeit für das Leersaugen des Behälters für jedes einzelne Reinigungsfahrzeug dokumentiert und im Nachgang miteinander verglichen (vgl. Bild 6.15).



Bild 6.14: Saugen des Räumgutes



Bild 6.15: Erfassung der Saugleistung

Die Zeitspanne für das Saugen der Räumgutmenge lag für die Reinigungsfahrzeuge zwischen 1:19 und 1:50 Minuten. Im Ergebnis der vergleichenden Saugpumpenprüfung für die verschiedenen Reinigungsfahrzeuge konnten keine auffälligen Unterschiede im Hinblick auf die Saugleistung festgestellt werden. Allerdings sind in der Praxis keine Grenzwerte für die Beurteilung bekannt.

Zur weiteren Konkretisierung der Leistungsüberprüfung für Fahrzeuge wurde im Rahmen des Forschungsprojektes ein Arbeitskreis „Fahrzeug-Check für Hochdruckspül- und Saugfahrzeuge“ gegründet. Folgende Nutzungskriterien wurden von den Netzbetreibern für die Überprüfung von Reinigungsfahrzeugen festgelegt:

- ✓ Spülleistung (Druck an der Düse, Durchfluss HD-Pumpe, Spülstrahlleistungsdichte)
- ✓ Saugleistung Vakuumpumpe
- ✓ Lärmemission
- ✓ Arbeitssicherheit (Verkehrssicherheit, Arbeitsschutz, Dienstanweisungen)
- ✓ Wirtschaftlichkeitsbetrachtung (Wartung, Reparatur, Restwertanalyse)

Darüber hinaus werden die Betriebsstoffe wie Kraftstoff- und Wasserverbrauch sowie die CO₂-Emission als sekundäre Bewertungskriterien mitberücksichtigt.

6.2.5.2 Ergebnisse und Empfehlungen

Im Ergebnis lassen sich folgende Hinweise und Empfehlungen zur Bewertung und Umsetzung des Teilprozesses „Kanalreinigung“ zusammenfassen:

- Praxiserfahrungen von Netzbetreibern zeigen, dass die Kanäle überwiegend unabhängig von den örtlichen Randbedingungen wie bspw. dem Kanalzustand (Neubau, Kanal im Bestand oder sanierte Kanäle) mit einem einheitlichen Druck und Durchfluss gereinigt werden. Entsprechend können der Druck an der Düse und der Durchfluss der Hochdruckpumpe einerseits zu aggressiv sein und Kanalschäden verursachen. Andererseits kann die Leistung zu schwach sein - mit der Folge unzureichender Reinigungsergebnisse.
- In der Praxis wird selten eine Überprüfung der Leistungsfähigkeit von Kanalreinigungsfahrzeugen durchgeführt. Darüber hinaus sind Richtwerte und einzuhaltenden Grenzwerte auf dem Fahrzeug nicht bekannt.
- Um Kanalschäden und unzureichende Reinigungsergebnisse zu vermeiden, sollte eine Leistungsüberprüfung der Kanalreinigungsfahrzeuge durchgeführt werden. Dabei sollte die Spülstrahlleistungsdichte ermittelt und mit den vor Ort ermittelbaren Leistungskennwerten wie HD-Pumpe, HD-Düse und Vakuumpumpe in Verbindung gebracht werden. Des Weiteren kann auch der Kraftstoff- und Wasserverbrauch erfasst werden.
- Vor der Kanalreinigung sollte die Ablagerungssituation dokumentiert werden, um eine Fortschreibung und Verfolgung der Ablagerungsentwicklung vornehmen zu können.
- Für das Bedienerpersonal bieten sich Schulungen zur Werkzeugauswahl (insbesondere Düsen) für unterschiedliche Ablagerungs- und Einsatzarten an. Darüber hinaus sollte Bedienerpersonal mit wenig Praxiserfahrung gezielt auf die Fahrzeugbedienung, -pflege und -wartung vorbereitet werden.

Richtwerte und Leistungsüberprüfungen für Reinigungsfahrzeuge erforderlich!

6.3 Analyse typischer Schwachstellen im Kanalnetz (Störfall-Analyse)

6.3.1 Ist-Aufnahme und Analyse

In der Praxis können verschiedene Störfälle auftreten, die die Funktionsfähigkeit der Kanalisationen in unterschiedlicher Weise beeinträchtigen, angefangen von kleinen Hindernissen bis hin zum vollständigen Verschluss des Kanals. Besondere Bedeutung erlangen Störfälle, wenn sie unmittelbar zu Beschwerden der Anschlussnehmer führen können, z. B. infolge Rückstau oder Geruchsbelästigungen.

Bisherige Praxiserfahrungen zeigen, dass i. d. R. keine Störfallstatistiken über Ort, Häufigkeit, Wirkung und Ursache der Störfälle geführt werden. Entsprechend liegt bisher auch keine Aussage über die besonders praxisrelevanten Störfallsituationen vor. Um einen ersten Überblick zu erhalten, wurde daher eine Betreiber-Hotline „Störfälle im Kanalbetrieb“ für Kanalnetzbetreiber eingerichtet. Ziel war es, die relevanten Problemsituationen zu erkennen und geeignete Lösungsansätze zu identifizieren.

Die Netzbetreiber wurden in den Workshops und Vor-Ort-Interviews sowie über den IKT - eNewsletter und weitere Veröffentlichungen über die Hotline informiert. Meldungen konnten per Telefon, E-Mail oder mit einem Störfall-Rückmeldebogen angezeigt werden. Folgende Störfall-Gruppen wurden erfasst:

- Verstopfungen im öffentlichen Bereich
- Verstopfungen im privaten Bereich
- Klappernde Kanaldeckel
- Geruchsbelästigung
- Rattenbefall
- Versackungen und Versenkungen
- Ausblasungen von Geruchsverschlüssen
- Sonstiges

Bisher wurden über 700 Störfälle von sieben Abwasserbetrieben bei der Betreiber-Hotline gemeldet. Bild 6.16 bis Bild 6.21 zeigen exemplarisch einige Fremdkörper, die bereits im Zuge einer turnusmäßigen Reinigung entdeckt wurden und zu Störfällen hätten führen können.



Bild 6.16: Eisenstange (Ostmann, 2011)



Bild 6.17: KG-Rohre (Ostmann, 2011)

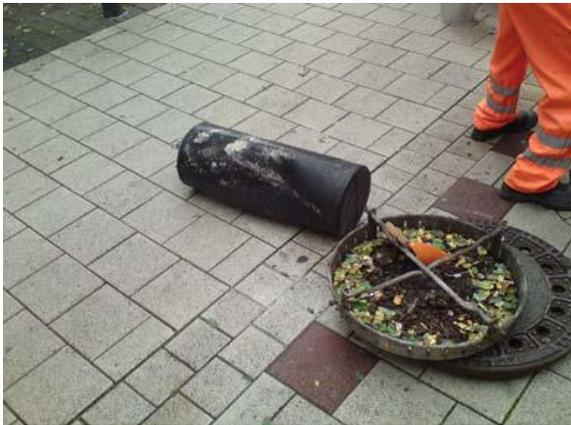


Bild 6.18: Absperrblase (Ostmann, 2011)



Bild 6.19: Holzbalken (Ostmann, 2011)



Bild 6.20: Steine aus dem Kanal



Bild 6.21: Loses Bruchstück

Im Nachgang wurde eine Analyse durchgeführt, um die Ursachen für die Fremdkörpereinbringung zu identifizieren. Dabei wurde festgestellt, dass es sich um Bauschutt aus Arbeiten an Straßen und Kanälen handelte.

Erste Auswertungen der Störfalldatenerhebung zeigen, dass bei den gemeldeten Störfällen die Verstopfung im öffentlichen Bereich den höchsten Anteil mit 27 % aufweist (Bild 6.22). Die zweit- bzw. dritthöchste Quote bei den Nennungen erreichen die Verstopfung im privaten Bereich und der klappernde Kanaldeckel mit jeweils 20 %. Diese drei Problemsituationen decken in der Praxis bisher nahezu 70 % des gesamten Störfallaufkommens ab.

Weitere in der Praxis vorkommende Probleme im Kanalnetz sind Versackungen und Versenkungen, Geruchsbelästigungen, Rattenbefall sowie Ausblasungen von Geruchsverschlüssen. Allerdings kommen diese Störfälle in der Praxis eher selten vor. Zudem wurden alle anderen Einzelfallmeldungen wie Ölunfälle etc. in der Kategorie „Sonstiges“ zusammengefasst. Diese Störfallmeldungen treten sehr selten auf.

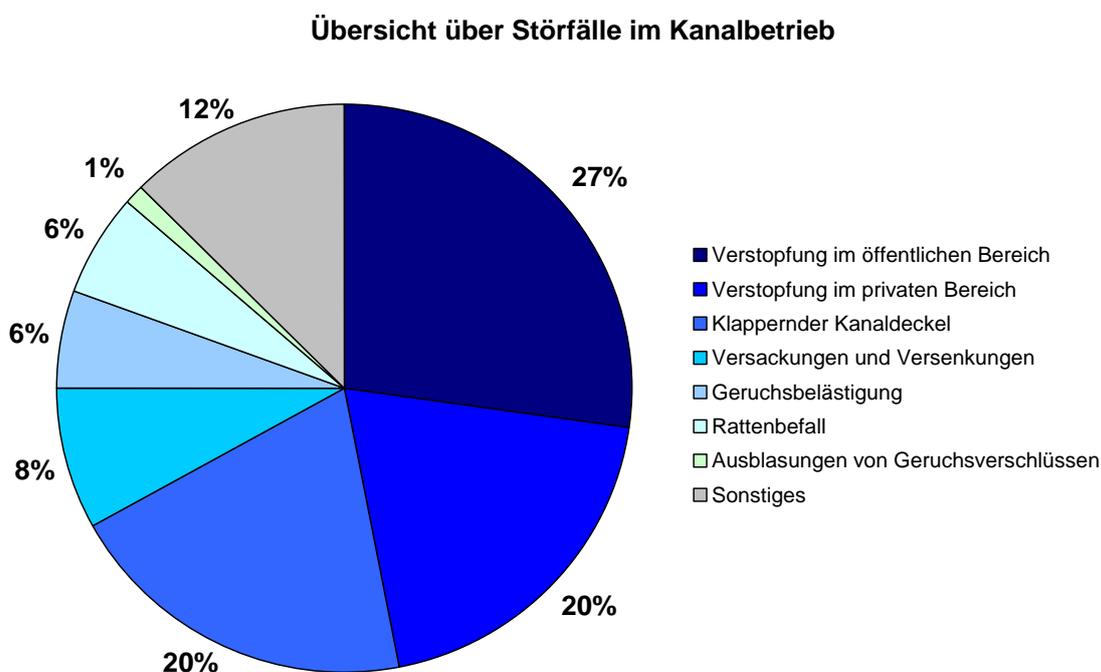


Bild 6.22: Übersicht über Störfälle im Kanalbetrieb

Gespräche mit Netzbetreibern zur Ursachenanalyse zeigen, dass einer Störfallentstehung zumeist ein besonderes Ereignis bzw. eine besondere Abweichung von den Plandaten der Bemessung vorangeht. Dies betrifft Aufbau und Geometrie des Abwasserkanals, wie z. B. Querschnittsverengungen und Gegengefälle, oder ungeplante Einleitungen bzw. die Einbringung oder das Eindringen von Fremdkörpern wie Bauschutt oder Wurzeln.

6.3.2 Ergebnisse und Empfehlungen

Im Ergebnis lassen sich folgende Hinweise und Empfehlungen zur „Analyse typischer Schwachstellen im Kanalnetz“ zusammenfassen:

- In der Praxis wird bisher zumeist keine Protokollierung und Dokumentation der Störfälle durchgeführt. Die Netzbetreiber, die eine Störfallmeldung dokumentieren, nehmen selten die möglichen Ursachen für den Störfall auf. Auch dann werden meist nur grobe Kategorien wie „Verstopfung im öffentlichen Bereich“ protokolliert. Entsprechend lassen sich Schwachstellen im Kanalnetz kaum oder gar nicht identifizieren, sodass dies auch in der Reinigungsplanung zunächst unberücksichtigt bleibt.
- Mit einem Störfallkataster können Schwachstellen im Kanalnetz identifiziert und Gegenmaßnahmen eingeleitet werden. Um ein Störfallkataster aufzubauen, sollten die Störfälle im Kanalbetrieb im Hinblick auf Ort, Häufigkeit und Wirkung lückenlos dokumentiert werden. Ist eine komplette Dokumentation nicht möglich, empfiehlt sich zumindest die Dokumentation von auffälligen Störfallmeldungen.
- Bei der Analyse empfiehlt sich eine Unterscheidung zwischen einmaligen und wiederkehrenden Störfällen. Ein einmaliger Störfall, z. B. ein gestürzter Schmutzfänger, ist nach Beseitigung für die weitere Einsatzplanung vernachlässigbar. Im Gegensatz dazu sollten bei einem wiederkehrenden Störfall, wie Verstopfungen bei Gegengefälle oder Wurzeleinwuchs, die betroffenen Bereiche langfristig beobachtet und die Reinigungsintervalle ggf. verkürzt werden. Vorzugsweise sollten diese Schwachstellen grundsätzlich beseitigt werden, z. B. durch entsprechende Sanierungsmaßnahmen.
- Bei Baumaßnahmen, insbesondere Straßenbaumaßnahmen, sollte grundsätzlich eine Nachkontrolle der anliegenden Kanalabschnitte erfolgen, um Störfälle zu erkennen.
- Die Datenerhebung zeigte eine erhöhte Anzahl von Störfallmeldungen „klappernder Kanaldeckel“. Als Gegenmaßnahme wird i. d. R. das Einlegen eines Antiklapperrings gewählt. Bei wiederkehrendem Störfall ist allerdings zumeist eine Schachtkopfsanierung erforderlich. Auch hier lassen sich möglicherweise Synergieeffekte mit Blick auf den Personaleinsatz erschließen.

Unterstützung bei der Erstellung von Störfallkatastern erforderlich!

6.4 Materialien für die Förderung des Wechsels zur bedarfsorientierten Kanalreinigung

Die bisherigen Erfahrungen bei Netzbetreibern zeigen, dass besonders in der Phase der Einführung und Konzeptentwicklung zur bedarfsorientierten Kanalreinigung umfassende Aufklärung und Kommunikation zu leisten ist. Dies betrifft insbesondere die möglichen Auswirkungen auf die künftige Personalplanung. Im Projekt wurden entsprechende Materialien für die Umsetzung des Wechsels zur bedarfsorientierten Kanalreinigung erstellt (AP 8).

Alle Materialien zur Unterstützung bei der Umsetzung einer effizienten bedarfsorientierten Kanalreinigungsstrategie können von den Netzbetreibern auf der Internetplattform www.ikt.de/kanalreinigung heruntergeladen werden. Die Sammlung beinhaltet Präsentationen, Schaubilder und Protokollvorlagen. Bild 6.23 zeigt einen Screenshot der Homepage und auf Bild 6.24 wird beispielhaft ein Muster-Protokoll für die Kommunikationsarbeit zur Förderung des Wechsels zur bedarfsorientierten Kanalreinigung dargestellt.

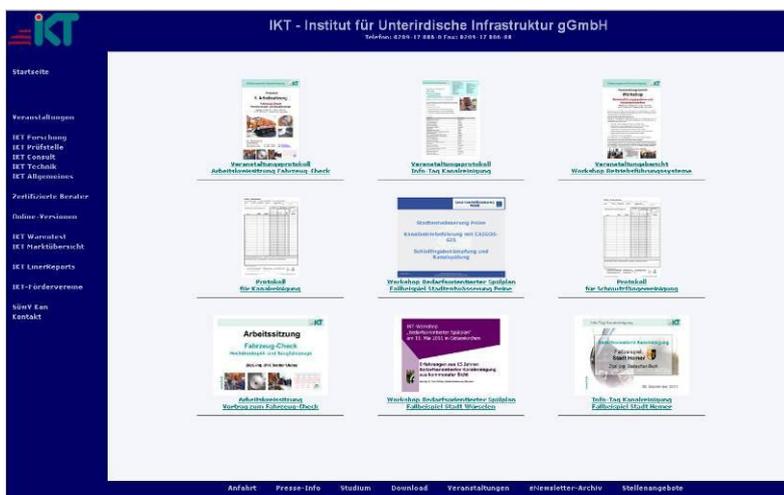


Bild 6.23: Blick auf die Homepage „Kanalreinigung“

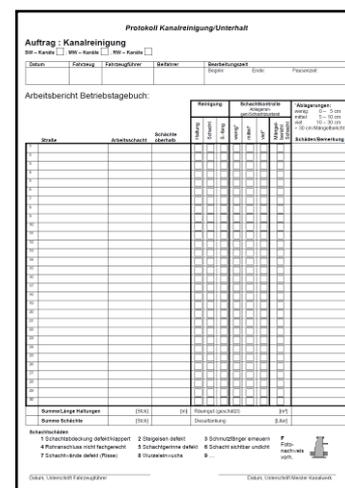


Bild 6.24: Muster-Protokoll

Präsentationen können z. B. genutzt werden, um die Einsatzmöglichkeiten diverser Werkzeuge zur Umsetzung einer bedarfsorientierten Kanalreinigung zu veranschaulichen und gemeinsame Entscheidungen mit dem Betriebspersonal zu treffen und so die Akzeptanz von Umsetzungsmaßnahmen zu erhöhen. Die Protokollvorlagen helfen insbesondere bei der Einführung und sollten mit dem Betriebspersonal gemeinsam entsprechend den örtlichen Gegebenheiten weiterentwickelt werden.

7 Empfehlungen für die Reinigungspraxis

Im Rahmen dieses Forschungsprojektes wurden zwei verschiedene Strategien verfolgt, um Empfehlungen für die Reinigungspraxis zu erarbeiten und Optimierungspotentiale aufzuzeigen. Ein Fokus lag auf den betrieblichen Abläufen und damit verbundenen möglichen Synergieeffekten. Die Erfahrungen engagierter Netzbetreiber konnten dazu beitragen, detaillierte Informationen über gängige Abläufe und Probleme in Verbindung mit der Reinigungsorganisation und -durchführung zu gewinnen und unterschiedliche Lösungsansätze hinsichtlich verschiedener Aspekte zu bewerten (Kapitel 6). Darüber hinaus wurden praktische Versuche zur Ablagerungsbildung in Kanälen durchgeführt, die Rückschlüsse auf erforderliche Reinigungsintervalle ermöglichen sollen. Durch die Zusammenführung der betrieblichen und technischen Ergebnisse werden Handlungsempfehlungen entwickelt, die die Betreiber von Kanalnetzen dabei unterstützen sollen, eine solide Datenbasis als Grundlage effizienter Reinigungsstrategien aufzubauen und bestehende Strukturen unter Nutzung technischer Hilfsmittel (PDA, GIS etc.) zu optimieren.

Ein Überblick über bisher erarbeitete Empfehlungen für die Umsetzung der bedarfsorientierten Kanalreinigung ist nachfolgend dargestellt.

7.1 Prozessanalyse und Optimierungspotenziale

Inspektion und Kontrolle

- Übliche Inspektionsmethoden (bspw. Schachtkamera, Kanalspiegel oder Inaugenscheinnahme) bieten sich zur Ablagerungserkennung an. Die Auswahl der Methode hängt davon ab, wie mit (noch) vertretbarem Sach- und Personalaufwand in der Praxis möglichst aussagekräftige Ergebnisse erzielt werden können.
- Der Einsatz von Kanalspiegeln und Schachtkameras ist empfehlenswert, wenn auch die Ablagerungssituation in der Kanalhaltung erfasst werden soll. Die Inaugenscheinnahme kann insbesondere bei Netzbetreibern mit niedrigem Budget eine Anwendung finden, da keine besonderen Geräte erforderlich sind.
- Die Ablagerungssituation sollte durch das Betriebspersonal in objektiver und einheitlicher Form erfasst werden. Hierzu bietet sich eine standardisierte Datenaufnahme mittels Protokoll oder mobilem Datenerfassungsgerät an. Darüber hinaus sollte bspw. der Verschmutzungsgrad in maximal drei

Klassen (z. B. gering, mittel und hoch) differenziert werden, um eine praktikable Einordnung durch das Betriebspersonal zu gestatten.

- Zur Bestimmung geeigneter Reinigungsintervalle sollten nach Erfahrungen der Netzbetreiber neben der Ablagerungshöhe auch weitergehende Informationen herangezogen werden, wie die Ablagerungskonsistenz, der bauliche Zustand des Kanals und evtl. Störfälle.
- Zur eindeutigen Identifikation der Abwasserschächte können Schachterkennungssysteme wie Transponder, Barcodes oder Schilder eingesetzt werden. Dokumentationsfehler, z. B. die Verwechslung nah beieinander liegender Abwasserschächte, werden somit vermieden.
- Um Synergiepotenziale zu erschließen, sollte die Ablagerungsinspektion in bestehende Betriebsprozesse wie Kanalreinigung, Schachtinspektionen oder Schmutzfängerleerung eingebunden werden. Freiwerdende Personalkapazitäten in der Kanalreinigung können dann bspw. zur Bildung von Inspektionsteams genutzt werden.

Bewertung der Ablagerungssituation

- Zur Bewertung der Ablagerungssituation, wie z. B. Ablagerungsart und -konsistenz, sind in der Praxis geeignete Hilfsmittel, bspw. ein einheitliches Bewertungsschema „Ablagerung - Einflussfaktoren - Reinigungsbedarf“, zu nutzen.
- Störfälle sollten bei der Bestimmung von Reinigungsintervallen Berücksichtigung finden. So können manche Hindernisse nach der Beseitigung als einmaliges Ereignis gewertet werden, z. B. ein herabgestürzter Schmutzfänger. Andere Störfälle erfordern weitergehende Maßnahmen oder kürzere Reinigungsintervalle, z. B. Wurzeleinwuchs und/oder Verstopfungen.
- Um Störfälle, die auf zu seltene Reinigung zurückzuführen sind, zu vermeiden, bietet es sich an, die Reinigungsintervalle zunächst vergleichsweise niedrig anzusetzen und bei störungsfreiem Betrieb schrittweise zu erhöhen, ggf. bis zur nächsten Ablagerungsbewertung.
- Messungen der Ablagerungshöhen zeigen, dass diese, bedingt durch verschiedenste Einflüsse, starken Schwankungen unterliegen. Deshalb ist es empfehlenswert, den vorliegenden Reinigungsbedarf nicht aufgrund einer einzelnen Inspektion zu bestimmen. Vielmehr sollten regelmäßige Inspektionen durchgeführt werden, so dass Kenntnisse über einen haltungsspezi-

fischen mittleren Ablagerungszustand und die Geschwindigkeit der Ablagerungsbildung gewonnen werden können.

- Der Zeitpunkt einer Inspektion sollte bei der Bewertung der Ablagerungssituation berücksichtigt werden. So kann es einen großen Unterschied machen, ob die Inspektion unmittelbar nach einem starken Regenereignis oder aber nach drei Wochen Trockenheit erfolgt.

Einsatzplanung

- Der Einsatz einer Kanaldatenbank mit Betriebsführungssystem kann helfen, vielfältige Optimierungs-, Synergie- und Einsparpotenziale zu erschließen. Vor der Anschaffung eines EDV-Systems empfiehlt es sich, die Ziele und daraus abzuleitenden Anforderungen an die Software genau zu definieren. Darüber hinaus können ggf. mehrere EDV-Systeme im Vorfeld über einen längeren Zeitraum unter örtlichen Praxisbedingungen getestet und hinsichtlich ihrer Leistungsfähigkeit verglichen werden.
- Der Spülplan sollte bauwerkspezifische Informationen (Neubau, Bestand, sanierter Kanal) berücksichtigen, um eine schonende und effiziente Kanalreinigung planen zu können. So sollten bspw. der Druck und Durchfluss der Reinigungsdüse in Abhängigkeit des baulichen Zustandes begrenzt werden. Ebenso sollten Kenntnisse über frühere Vorkommnisse oder Störfälle, z. B. Ausblasungen von Geruchsverschlüssen, in die Einsatzplanung einfließen. Ggf. sind an kritischen Stellen im Kanalnetz die Betriebsparameter entsprechend anzupassen.
- Informationen über Gefälle, Material und Zustand der Rohre liegen den meisten Netzbetreibern vor und es bietet sich an, diese für eine bessere Abschätzung des Reinigungsbedarfs zu nutzen. Für konkrete Aussagen über die Zusammenhänge müssen jedoch noch weitere Versuche durchgeführt werden. Dies würde im Falle einer Bewilligung in der Phase II des Forschungsprojektes erfolgen. Nach derzeitigem Stand lassen sich anhand der vorhandenen Informationen Schubspannungen für die einzelnen Halungen eines Kanalnetzes berechnen. Neben der Schubspannung beeinflussen weitere Einflussfaktoren, insbesondere die niederschlagsbedingten Schwankungen der Abwasserzusammensetzung, die Entstehung von Ablagerungsschwerpunkten, deren zuverlässige Vorhersage Grundlage für die Planung von Reinigungsintervallen ist. Dieser Sachverhalt ist weiter zu untersuchen.

- Ablagerungen können sich mit zunehmendem Alter und unter ungünstigen Umständen verfestigen. Dieser Umstand sollte bei der Planung von Reinigungsintervallen berücksichtigt werden. Es kann folglich sinnvoll sein, auch Kanäle, die zu einer geringeren Ablagerungsbildung tendieren und somit über viele Jahre keine Reinigung erfordern, gelegentlich zu reinigen, um so hartnäckigen Verfestigungen vorzubeugen.

Kanalreinigung

- Vor der Kanalreinigung sollte die Ablagerungssituation dokumentiert werden, um eine Fortschreibung und Überprüfung der Ablagerungsentwicklung vornehmen zu können.
- Die Kanäle sollten in Abhängigkeit von den örtlichen Randbedingungen wie bspw. dem Kanalzustand (Neubau, Kanal im Bestand oder sanierte Kanäle) mit einem variablen und an die Situation angepassten Druck und Durchfluss gereinigt werden. In Folge dessen wird einerseits vermieden, dass Druck und Durchfluss an der Düse zu aggressiv sind und Kanalschäden verursachen. Andererseits muss die Leistung ausreichen, um akzeptable Reinigungsergebnisse zu erzielen. Voraussetzung ist eine vorherige Leistungsüberprüfung der Kanalreinigungsfahrzeuge, bei der u. a. die erzielbaren Spülstrahlleistungsdichten für die jeweils eingesetzten Kombinationen aus HD-Pumpe und HD-Düsen ermittelt werden. Darüber hinaus lassen sich auch Leistungskennwerte der Vakuumpumpe sowie der Kraftstoff- und Wasserverbrauch erfassen.
- Für das Personal sind Schulungen zur Werkzeugauswahl (insbesondere Düsen) für unterschiedliche Ablagerungs- und Einsatzarten empfehlenswert. Neueinsteiger mit wenig Praxiserfahrungen sollten gezielt auf die Fahrzeugbedienung, -pflege und -wartung vorbereitet werden.
- Eine Kanalreinigung kann zwar als kurzfristige Maßnahme wirksam bei Problemen mit Kanalgeruch sein. Langfristig sind jedoch andere Lösungen im Hinblick auf die Schwefelwasserstoffproblematik notwendig, da die Wirkung einer Kanalreinigung bereits nach wenigen Tagen nachlässt. Sinnvoll sind bspw. die Behebung baulicher Mängel sowie die Vermeidung sauerstoffarmer Verhältnisse im Abwasser.

7.2 Analyse typischer Schwachstellen im Kanalnetz

- Störfallmeldungen sollten protokolliert und zur Ursachenfindung weiterverfolgt werden. Schwachstellen im Kanalnetz lassen sich so identifizieren und bei der Reinigungsplanung berücksichtigen.
- In der weitergehenden Analyse empfiehlt es sich, zwischen einmaligen und wiederkehrenden Störfällen zu unterscheiden. Während einmalige Störfälle, z. B. ein gestürzter Schmutzfänger, nach Beseitigung nicht mehr in der Einsatzplanung berücksichtigt werden müssen, sind Bereiche mit wiederkehrenden Störfällen, wie z. B. Verstopfungen und Wurzeleinwuchs, langfristig zu beobachten und die Reinigungsintervalle ggf. zu verkürzen.
- Für die Dokumentation der Störfälle bietet sich der Aufbau eines Störfallkatalogs an. Hierzu sollten die Störfälle im Kanalbetrieb im Hinblick auf Ort, Häufigkeit und Wirkung kontinuierlich dokumentiert werden.
- Bei Baumaßnahmen, insbesondere Straßenbaumaßnahmen, sollte grundsätzlich eine Nachkontrolle der anliegenden Kanalabschnitte erfolgen, um Störfälle aus Fehleinleitungen zu erkennen.
- Sofern der Personaleinsatz für die Reinigung reduziert werden kann, empfiehlt sich ein verstärkter Einsatz der frei gewordenen Personalressourcen für andere Aufgaben, bspw. Reparaturmaßnahmen an Schächten etc.

7.3 Materialien für die Förderung des Wechsels zur bedarfsorientierten Kanalreinigung

- Die Einführung und Konzeptentwicklung zur bedarfsorientierten Kanalreinigung sollte in enger Zusammenarbeit mit dem Betriebspersonal durchgeführt werden. Zur Erreichung einer effizienten Reinigungsstrategie und umfassenden Kenntnissen über die Kanalnetze müssen die Ziele und Auswirkungen offen zwischen Betreiber und Betriebspersonal kommuniziert werden.
- Die Akzeptanz von Umsetzungsmaßnahmen der bedarfsorientierten Kanalreinigung kann dadurch erhöht werden, dass bspw. Entscheidungen über Anschaffung bzw. Auswahl von Werkzeugen gemeinsam mit dem Betriebspersonal vorbereitet oder sogar gemeinsam getroffen werden.

8 Zusammenfassung

Angesichts des steigenden Kostendrucks auf die Kommunen und der hohen Kosten, die Kanalnetzbetreibern durch regelmäßige Reinigungsmaßnahmen entstehen, ist das Interesse an der Einführung bedarfsorientierter Reinigungsstrategien bei den Netzbetreibern groß. Die Vielzahl der verschiedenen Möglichkeiten zur Umsetzung sowie die Sorge um den störungsfreien Funktionserhalt der Kanalisation sind jedoch Gründe dafür, dass nur wenige Kanalnetzbetreiber bedarfsorientierte Reinigungsstrategien einsetzen.

Da bisher nur wenige Erkenntnisse über die Auswirkungen veränderter Reinigungsstrategien auf die Ablagerungssituation im Kanalnetz vorliegen, wurden verschiedene praktische Versuche durchgeführt. Ziel war es, die Prozesse der Ablagerungsbildung, insbesondere die Geschwindigkeit, mit der Ablagerungen anwachsen, näher zu untersuchen. Daraus sind Rückschlüsse auf sinnvolle Reinigungsintervalle zu ziehen. Zu diesem Zweck wurde auf der vom Ruhrverband betriebenen Kläranlage Ölbachtal in Bochum eine Kanalteststrecke (3 Rohre mit je 10 m Länge und 300 mm Durchmesser) errichtet, die es ermöglicht, unter realitätsnahen Bedingungen die Bildung, das Wachstum und die Erosion von Kanalablagernungen zu beobachten. Zusätzlich wurden Versuche im Labormaßstab durchgeführt, in denen die Erosion von Sedimenten sowie Einflüsse auf die Schwefelwasserstoffbildung untersucht wurden.

Im Rahmen der von März bis November 2011 andauernden Untersuchungen an der Kanalteststrecke wurde festgestellt, dass es bereits nach wenigen Tagen in einem Kanalrohr zu erheblichen Ablagerungshöhen kommen kann, die nach SüwV Kan eine Reinigung erfordern würden. Da punktuelle Ablagerungshöhen zeitlich auch bei konstanten Durchflüssen stark schwankten, waren derartige Spitzen in der Regel nur von kurzer Dauer. Die absolute Menge an Ablagerungen in den Versuchsrohren stieg bei Versuchen mit einem Gefälle von $I=1\text{ ‰}$, einer äquivalenten Sandrauheit von $k=0,4\text{ mm}$ und einem Durchfluss von $Q=2\text{ L/s}$ innerhalb der ersten 30 Tage im Mittel langsam auf ca. $2,3\text{ L/m}$ an. Dabei wurde beobachtet, dass die tägliche Zunahme der Ablagerungsmenge mit zunehmender Versuchsdauer abnahm. Bei der längsten durchgeführten Versuchsreihe mit einer Versuchsdauer von 5 Monaten wurde nach etwa 70 Tagen ein Maximum der Ablagerungsmenge erreicht. Anschließend wechselten sich Phasen mit Zunahme und Abnahme der Ablagerungsmenge ab, so dass von einem Gleichgewichtszustand gesprochen werden kann. Die Ablagerungsdynamik wird jedoch sehr stark durch

Niederschläge beeinflusst. Auch wenn bei Regen bereits gebildete Ablagerungen erodiert und aus dem Kanalnetz ausgetragen werden, führt Niederschlag durch den vermehrten Feststoffeintrag in das Kanalnetz oftmals tendenziell zu einer Erhöhung der Ablagerungen im Kanalnetz, welche dann bei Trockenwetter (unter Voraussetzung einer ausreichenden Transportkapazität) langsam wieder abgetragen werden. Bei Versuchen an der Kanalteststrecke sollte eine ungewollte Beeinflussung der Ablagerungsbildung in der Kanalteststrecke in Folge von Niederschlag, wie in Kapitel 5.1.3.5 beschrieben, vermindert werden. Dazu bietet sich bei der Untersuchung der Ablagerungsbildung im Trockenwetterfall eine diskontinuierliche Beschickung der Kanalteststrecke an, damit die Konzentrationsspitzen des Mischwasserabflusses nicht in die Versuchsrohre gelangen. Wird der Regenwetterfall untersucht, ist eine proportional zum Abfluss im Entnahmekanal gesteuerte Beschickung der Kanalteststrecke notwendig.

Die Versuche an der Kanalteststrecke belegen die These, dass der Erosionswiderstand von Sedimenten mit steigender Sedimentationsdauer steigt. Die aus den Versuchen an der Kanalteststrecke gewonnenen Werte waren mit rund 0,2 bis 0,8 N/m² allesamt sehr gering. Um die Datengrundlage durch Laboruntersuchungen weiter auszubauen, wurden Erosionsmessgeräte angefertigt und kalibriert. Erste Versuche mit unterschiedlichen Sedimenten und verschiedenen Sedimentationsdauern bestätigten den oben genannten Einfluss der Ablagerungsdauer auf die Verfestigung der untersuchten Kanalschlämme. Das Ausmaß der Verfestigung war in den Versuchen jedoch sehr gering und die Werte unterlagen großen Schwankungen. Eine lineare Approximation der Messwerte ergab einen Anstieg von anfangs 0,5 N/m² auf rund 2 N/m² nach 100 Tagen. Da die meisten Messwerte jedoch unterhalb von 1 N/m² lagen, sollten die untersuchten mineralischen Sedimente (ohne das Vorhandensein von ungewöhnlich großen Mengen von Fett oder Bindemitteln) auch nach mehreren Jahren nicht so verkrusten, dass sie durch eine Hochdruckreinigung nicht entfernt werden könnten.

Anhand eines mit Abwasser durchflossenen Versuchsrohrs konnte zudem gezeigt werden, dass bereits wenige Tage nach einer gründlichen Reinigung wieder Schwefelwasserstoffkonzentrationen sowohl im Abwasser als auch in der Luft gemessen werden können. Diese lagen im Bereich von 1-10 ppm und waren somit durchaus relevant für biogene Schwefelsäurekorrosion.

Die bisherigen praktischen Versuche lassen darauf schließen, dass die Entscheidung über eine Kanalreinigung nicht aufgrund einer Momentaufnahme des Ablagerungszustandes erfolgen sollte, da die Ablagerungsmengen bedingt durch Nie-

derschläge und andere Einflüsse starken Schwankungen unterliegen. Vielmehr sollten regelmäßige Inspektionen durchgeführt werden, die dabei helfen, den charakteristischen Zustand einer Kanalhaltung und deren Ablagerungen über längere Zeiträume zu bestimmen, so dass angepasste Reinigungsintervalle festgelegt werden können. Reinigungsintervalle dürfen nicht endlos groß gewählt werden, da (wenn auch langsam) die Festigkeit der Ablagerungen und somit der erforderliche Reinigungsaufwand steigt. Die Bildung von Schwefelwasserstoff spielt nach bisherigen Erkenntnissen für die Planung der Reinigungsintervalle eine untergeordnete Rolle, da der positive Effekt einer Reinigung im Hinblick auf die Schwefelwasserstoffproduktion nur wenige Tage Bestand hat.

Parallel zu den praktischen Versuchen wurden im Rahmen dieses Forschungsvorhabens zahlreiche Kontakte in Form von Workshops und Betreibergesprächen hergestellt, die es den Netzbetreibern ermöglichten, Ihre Erfahrungen im Zusammenhang mit den jeweiligen Reinigungsstrategien auszutauschen. So konnten umfangreiche Einblicke bezüglich der Randbedingungen und Anforderungen bei den verschiedenen Netzbetreibern gewonnen werden. Es zeichnet sich ab, dass es nicht eine universell auf sämtliche Netzbetreiber anwendbare optimale Strategie geben kann, sondern dass jeder Netzbetreiber die für seine Anforderungen passende Umsetzung finden muss. Um die Suche nach der optimalen Lösung zu vereinfachen, wurden Werkzeuge vorgestellt, die bei der Ein- und Durchführung einer bedarfsorientierten Kanalreinigung unterstützen. Spezialisierte EDV- bzw. GIS-Systeme spielen dabei eine besondere Rolle (vgl. Abschnitte 4.2, 6.2.4 und 7.1). Dazu zählen bspw. technische Hilfsmittel zur effizienten Schachterkennung und Ablagerungsbewertung sowie Software zur Erstellung von Spülplänen.

Für eine sorgfältige und genaue Erfassung von Netzzustandsdaten ist neben der geeigneten technischen Ausrüstung eine regelmäßige Schulung des eingesetzten Personals erforderlich. Nur mit einheitlichen Standards zur Ablagerungserkennung und -bewertung können objektive und vergleichbare Daten erhoben werden. Eine weitere Aufgabe von Schulungen besteht darin, dem Personal Hilfestellung bei der Auswahl geeigneter Betriebsparameter (Düsenart, Pumpendruck) unter Berücksichtigung des Kanalzustandes zu geben, um so eine effektive und gleichzeitig schonende Kanalreinigung zu gewährleisten.

Die Ergebnisse der Workshops und die erarbeiteten Arbeitshilfen werden interessierten Kanalnetzbetreibern auf der Internetseite des Instituts für Unterirdische Infrastruktur (www.ikt.de/kanalreinigung) zur Verfügung gestellt.

Literaturverzeichnis

- AöR Lünen (2007) Kanalspiegelung und Kanalfernsehinspektion. www.abwasser-luenen.de
- Arthur, S., Ashley, R. M. und Nalluri, C. (1996) Near bed solids transport in sewers. In: *Water Science & Technology*, Jg. 33, H. 9, S. 69–76.
- Artières, O. (1988) Bildung und Remobilisation von Ablagerungen in Mischkanalisationen. In: *Korrespondenz Abwasser*, Jg. 35, H. 10, S. 1026–1033
- Aschauer, R. und Mörth, O. (2001) KIS Info - Basisinformation zur Auswahl eines Kommunalen Informationssystems (KIS), Landesbaudirektion, geographische Informationssysteme (LBD-GIS), Land Steiermark (A)
- ATV (1990) Arbeitsblatt ATV-A 140 Regeln für den Kanalbetrieb. Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall e. V. (Hrsg.), Ges. zur Förderung der Abwassertechnik (GFA), Hennef
- ATV (1996) ATV-Handbuch: Bau und Betrieb der Kanalisation. 4. Auflage, Ernst und Sohn (Hrsg.)
- Bald, C. (2004) RFID in der Wertschöpfungskette von Konsumgütern. *Handel im Fokus* 56
- Banasiak, R., Verhoeven, R., de Sutter, R. und Tait, S. J. (2005) The erosion behaviour of biologically active sewer sediment deposits: Observations from a laboratory study. In: *Water Research*, Jg. 39, S. 5221–5231.
- Bares, V., Stransky, D. und Sykora, P. (2009) Sewer infiltration/inflow: long-term monitoring based on diurnal variation of pollutant mass flux. In: *Water Science & Technology*, Jg. 60, H. 1, S. 1–7
- Beck, S. (2007) Entwicklung einer bedarfsgerechten Reinigungsstrategie für eine mittelgroße Stadt in Nordrhein-Westfalen. Diplomarbeit, Lehrstuhl für Siedlungswasserwirtschaft und Umwelttechnik, Ruhr-Universität Bochum, unveröffentlicht
- Berger, C. und Falk, C. (2011) Zustand der Kanalisation. Ergebnisse der DWA-Umfrage 2009. In: *Korrespondenz Abwasser, Abfall*, Jg. 58, H. 1, S. 24–39
- Bertrand-Krajewski, J.-L. (2003) Sewer sediment management: some historical aspects of egg-shaped sewer and flushing tanks. In: *Water Science & Technology*, Jg. 47, H. 4, S. 109–122
- Bertrand-Krajewski, J.-L., Bardin, J.-P. und Gibello, C. (2006) Accumulation and flushing of sewer sediments: in situ experiments and modelling. Veranstaltung vom 30. - 31. August 2006, aus der Reihe "Abflusssteuerung - Schwallspülung - Gewässerschutz", Osnabrück
- Bertrand-Krajewski, J.-L., Bardin, J.-P., Gibello, C. und Laplace, D. (2003) Hydraulics of a sewer flushing gate. In: *Water Science & Technology*, Jg. 47, H. 4, S. 129–136

- Bielecki, R. und Schremmer, H. (1987) Biogene Schwefelsäure-Korrosion in teilgefüllten Abwasserkanälen, Mitteilungen des Leichtweiß Instituts für Wasserbau der Technischen Universität Braunschweig, Band 94
- Biggs, C. A., Prall, C., Tait, S. J. und Ashley, R. M. (2005) Investigating the effect of storm events on the particle size distribution in a combined sewer simulator. In: *Water Science & Technology*, Jg. 52, H. 3, S. 129–136
- Bill, R. (1999) *Grundlage der Geo-Informationssysteme*. Band 1, 4. Auflage, Wichmann
- Bodemann GmbH (2011) Firmeninformation der Bodemann GmbH Kommunal Service, Steinebach (A); unter www.bodemann.at
- Bosseler, B., Birkner, T., Sokoll, O. und Brüggemann, T. (2003) Umsetzung der Selbstüberwachungsverordnung Kanal (SüwV Kan) bei den kommunalen Netzbetreibern und Wasserverbänden in NRW. Langfassung. Herausgegeben von IKT und Ministerium für Umwelt und Naturschutz, Landwirtschaft und Verbraucherschutz des Landes Nordrhein-Westfalen (MUNLV)
- Bosseler, B. und Schlüter, M. (2004) Kanalreinigung - Düse, Drücke, Hochdruckstrahlen. Endbericht des IKT-Institut für Unterirdische Infrastruktur, Gelsenkirchen, im Auftrag des Ministeriums für Umwelt und Naturschutz, Landwirtschaft und Verbraucherschutz des Landes NRW
- Bosseler, B. und Puhl, R. (2006) Abwasserschächte - Überwachung, Prüfung und Sanierung. Endbericht des IKT-Institut für Unterirdische Infrastruktur, Gelsenkirchen, im Auftrag des Ministeriums für Umwelt und Naturschutz, Landwirtschaft und Verbraucherschutz des Landes NRW
- Brombach, H. und Fuchs, S. (2003) Datenpool gemessener Verschmutzungskonzentrationen in Misch- und Trennkanalisationen. In: *KA - Abwasser, Abfall*, Jg. 50, H. 4, S. 441–450
- Brombach, H., Michelbach, S. und Wöhrle, C. (1993) Feststoffe in der Mischwasserkanalisation. Sedimentation und Remobilisierung. In: *Korrespondenz Abwasser*, Jg. 40, H. 12, S. 1910–1926
- Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung (2011) *Arbeitshilfen - Abwasser*. www.arbeitshilfen-abwasser.de
- Bundesrepublik Deutschland (2004) Verordnung über Anforderungen an das Einleiten von Abwasser in Gewässer. *Abwasserverordnung - AbwV*
- Bundesrepublik Deutschland (2010) Gesetz zur Ordnung des Wasserhaushalts - *Wasserhaushaltsgesetz*. WHG
- Campisano, A., Creaco, E. und Modica, C. (2004) Experimental and numerical analysis of the scouring effects of flushing waves on sediment deposits. In: *Journal of Hydrology*, Jg. 299, S. 324–334
- Campisano, A., Creaco, E. und Modica, C. (2006) Experimental analysis of the Hydrass flushing gate and laboratory validation of flush propagation modeling. In: *Water Science & Technology*, Jg. 54, H. 6-7, S. 101–108

- Campisano, A., Creaco, E. und Modica, C. (2009) P controller calibration for the real time control of moveable weirs in (proportional) sewer channels. In: Water Science & Technology, Jg. 59, H. 11, S. 2237–2244
- Chebbo, G., Ashley, R. M. und Gromaire, M.-C. (2003) The nature and pollutant role of solids at the water–sediment interface in combined sewer networks. In: Water Science & Technology, Jg. 47, H. 4, S. 1–10
- Coburg, C. (2006) Technische und organisatorische Maßnahmen zur Steigerung der Effizienz bei der Instandhaltung von Kanalisationen. KA - Abwasser, Abfall (53) Nr.12
- Crabtree, R. W. (1989) Sediments in Sewers. In: Journal IWEM, Jg. 3, S. 569–578
- Detle, H.-H., Macke, E., Petersen, P. und Spingat, F. (1996) Ermittlung von Grenzwerten für eine Modellierung des Feststofftransports in Abwasserkanälen. In: Beichert, J., Hahn, H. H., Fuchs, S. (Hrsg.) Stoffaustrag aus Kanalisationen. Hydrologie bebauter Gebiete. DFG-Forschungsbericht, VCH Verlagsgesellschaft mbH, Weinheim, S. 59–76
- Dettmar, J. (2005) Beitrag zur Verbesserung der Reinigung von Abwasserkanälen.
- Dettmar, J., Schüßler, O. und Lorenzen, A. (2001) Anwendung selbsttätiger Schwallspülklappen in der Mischwasserkanalisation. In: KA - Abwasser, Abfall, Jg. 48, H. 11, S. 1556–1564
- Dettmar, J. und Stauer, P. (2005) Modelling of flushing waves for optimising cleaning operations. In: Water Science & Technology, Jg. 52, H. 5, S. 233–240
- Deutsches Institut für Normung (2005) DIN EN 14654-1: Management und Überwachung von Reinigungsmaßnahmen in Abwasserkanälen und -leitungen, Teil 1: Reinigung von Kanälen
- Deutsches Institut für Normung (2008a) DIN EN 752: Entwässerungssysteme außerhalb von Gebäuden
- Deutsches Institut für Normung (2008b) DIN 19523: Anforderungen und Prüfverfahren zur Ermittlung der Hochdruckstrahlbeständigkeit und -spülfestigkeit von Rohrleitungsteilen für Abwasserleitungen und -kanäle
- Dohmann, M. und Coburg, C. (2003) Optimierung der Betriebsabläufe von Kanalbetrieben. Kurzbericht der Rheinisch-Westfälischen Technischen Hochschule Aachen, im Auftrag des Ministeriums für Umwelt und Naturschutz, Landwirtschaft und Verbraucherschutz des Landes NRW
- DWA (1999) Merkblatt DWA-M 143 Teil 2: Sanierung von Entwässerungssystemen außerhalb von Gebäuden - Teil 2: Optische Inspektion. Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall e. V. (Hrsg.), Ges. zur Förderung der Abwassertechnik (GFA), Hennef
- DWA (2004) Merkblatt DWA-M 197 Ausschreibung von Kanalreinigungsleistungen mit dem Hochdruckspülverfahren. Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall e. V. (Hrsg.), Ges. zur Förderung der Abwassertechnik (GFA), Hennef

- DWA (2005a) Arbeitsblatt DWA-A 147 Betriebsaufwand für die Kanalisation - Betriebsaufgaben und Häufigkeiten. Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall e. V. (Hrsg.), Ges. zur Förderung der Abwassertechnik (GFA), Hennef
- DWA (2005b) Merkblatt DWA-M 174 Betriebsaufwand für die Kanalisation - Hinweise zum Personal-, Fahrzeug- und Gerätebedarf. Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall e. V. (Hrsg.), Ges. zur Förderung der Abwassertechnik (GFA), Hennef
- DWA (2006) Arbeitsblatt DWA-A 110 Hydraulische Dimensionierung und Leistungsnachweis von Abwasserleitungen und -kanälen. Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall e. V. (Hrsg.), Ges. zur Förderung der Abwassertechnik (GFA), Hennef
- FTK - Forschungsinstitut für Telekommunikation (2006) Informationen auf der Internetseite des Electronic Commerce Info Net, www.ecin.de
- Einstein, H. A. (1942) Formulas for the transportation of bed load. In: Transactions American Society of Civil Engineers, Jg. 107, H. Paper No. 2140, S. 561–577
- Envirosight, LCC (2011) QuickView Zoomkamera, www.envirosight.com
- Falk, C. Schlüter, M. und Meyer, P. (2000) Empfehlungen zur Kanalreinigung. Endbericht des IKT-Institut für Unterirdische Infrastruktur im Auftrag des Ministeriums für Umwelt und Naturschutz, Landwirtschaft und Verbraucherschutz des Landes NRW
- Frehmann, T. (2003) Untersuchung der Wirksamkeit von Stauraumkanälen mit unten liegender Entlastung zur Regenwasserbehandlung. Shaker Verlag, Aachen, Forum Siedlungswasserwirtschaft und Abfallwirtschaft Universität Essen, Band 21
- Friebe, D. (2011) Schwefelwasserstoff im Kanal - Entstehung und Auswirkungen. Projektarbeit, Lehrstuhl für Siedlungswasserwirtschaft und Umwelttechnik, Ruhr-Universität Bochum, unveröffentlicht
- Führböter, A. (1961) Über die Förderung von Sand-Wasser-Gemischen in Rohrleitungen. Hannover, Mitteilungen des Franzius-Instituts für Grund- und Wasserbau der Technischen Hochschule Hannover, Band 19
- Gebhard, V. (2009) Interaktionen bei der Modellierung von Stofftransport, Sedimenthaushalt und Abfluss in der Siedlungsentwässerung. Dissertation. Technische Universität Dresden, Institut für Siedlungs- und Industrierwasserwirtschaft, Dresden
- Geib, M., Wielenberg, M. und Heyer, M. (2007) Reinigung von Abwasserkanälen mit Hochdruckspülung. 3. Aufl.: Vulkan-Verlag, Essen, Schriftenreihe aus dem Institut für Rohrleitungsbau Oldenburg, Band 11
- Geiger, W. F. (1984) Mischwasserabfluss und dessen Beschaffenheit - Ein Beitrag zur Kanalnetzplanung. Technische Universität München, München, Berichte aus Wassergütewirtschaft und Gesundheitsingenieurwesen, Band 50

- Goormans, T., Engelen, D., Bouteligier, R., Willems, P. und Berlamont, J. (2009) Design of self-cleansing sanitary sewer systems with the use of flushing devices. In: *Water Science & Technology*, Jg. 60, H. 4, S. 901–908
- Greve, T. (2005) Transpondertechnologie bewährt sich in der Praxis. *bi Umwelt-Bau*
- Harting, K. (12/2006) Abwasserdruckleitungen - Möglichkeiten und Verfahren zur Reinigung. Kurzbericht des IKT – Institut für Unterirdische Infrastruktur, Gelsenkirchen
- IKT (2007), Protokoll der ersten Diskussionsrunde am 21. Juni 2007 zur vorliegenden Diplomarbeit „Entwicklung einer bedarfsgerechten Reinigungsstrategie für eine mittelgroße Stadt in NRW“, Hemer
- IBAK GmbH (2011) TV-Inspektionskamerawagen – Produktübersicht. www.ibak.de
- Iossifidis, V. (1986) Bedeutung der Kanalablagerungen und Stofftransportberechnung. In: Schmitt T.G., Hahn, H. H. (Hrsg.) *Schmutzfrachtberechnung für Kanalisationsnetze*, Karlsruhe, Schriftenreihe des ISWW Karlsruhe, Band 14
- Jesse, R. und Rosenbaum, O. (2000) *Barcode*. 1. Auflage, Verlag Technik
- Jung, P. (1998) *Kanalsanierung*. 1. Auflage, Vogel Verlag
- Kaltenhäuser, G. und Illing, M. (2003) *Neue Strategien in der Kanalreinigung*. IKT-Institut für Unterirdische Infrastruktur, eNewsletter unter www.ikt.de
- KEG Kanalreinigungstechnik GmbH (2010) *Produktkatalog*. Online verfügbar unter <http://www.keg-pipe.com/deutsch/katalog.asp>, zuletzt geprüft am 04.11.2010
- KEG Kanalreinigungstechnik GmbH (2011) *Übersicht der Produktgruppe: TV-Kameras / Inspektionsgeräte*. www.keg-pipe.com
- Kleijwegt, R. A. (1992) *On Sediment Transport in Circular Sewers with Non Cohesive Deposits*. Dissertation. Delft University of Technology, Faculty of Civil Engineering, Delft
- Lampe, T. und Barner, E. (2011) *Präsentation beim Workshop „Betriebsführungssysteme und Kanaldatenbanken“ vom 02. Februar 2011*, IKT-Institut für Unterirdische Infrastruktur, Gelsenkirchen
- Land Nordrhein-Westfalen (1995) *Verordnung zur Selbstüberwachung von Kanalisationen und Einleitungen von Abwasser aus Kanalisationen im Mischsystem und im Trennsystem*. Selbstüberwachungsverordnung Kanal - SÜwV Kan
- Land Nordrhein-Westfalen (2010) *Wassergesetz für das Land Nordrhein-Westfalen - Landeswassergesetz*. LWG, vom 31.03.2010, zuletzt geprüft am 22.10.2010
- Liem, R., Spork, V. und Köngeter, J. (1997) *Investigations on Erosional Processes of Cohesive Sediment using an In-Situ Measuring Device*. *International Journal of Sediment Research* 12, S. 437-445
- Lohse, M. (1986) *Schwefelverbindungen in Abwasserableitungsanlagen unter besonderer Berücksichtigung der biogenen Schwefelsäurekorrosion*. In:

- Veröffentli-chungen des Institutes für Siedlungswasserwirtschaft der Univer-sität Hannover, Heft 62
- Macke, E. (1982) Über den Feststofftransport bei niedrigen Konzentrationen in teilgefüllten Rohrleitungen. Dissertation. Technische Universität Carolo-Wilhelmina zu Braunschweig, Braunschweig
- Matsché, N. und Saracevic, E. (2007) Chemische und mikrobiologische Grundla-gen von Geruch und Korrosion in der Kanalisation. Wiener Mitteilungen, Band 205, S. 1-28
- MH-Vertrieb (2011) Firmeninformation der MH-Vertrieb, Detmold; unter www.mh-vertrieb.de
- Ministerium für Umwelt, Raumordnung und Landwirtschaft NRW (1995) Anforde-rungen an den Betrieb und die Unterhaltung von Kanalisationsnetzen. RdErl. d. Ministeriums für Umwelt, Raumordnung und Landwirtschaft vom 3. Januar 1995; Ministerialblatt für das Land Nordrhein-Westfalen, - Nr. 14, (IV B 6 - 031 002 0201)
- Müller, C., Wansing, P. und Vogt, H.-J. (2011) Präsentation beim Workshop „Be-triebsführungssysteme und Kanaldatenbanken“ vom 02. Februar 2011, IKT-Institut für Unterirdische Infrastruktur, Gelsenkirchen
- Nalluri, C. und Ghani, A. A. (1996) Design options for self-cleansing storm sewers. In: *Water Science & Technology*, Jg. 33, H. 9, S. 215–220
- Oberfinanzdirektion Niedersachsen - Bau und Liegenschaften (2009) Arbeitshilfen Abwasser. Herausgegeben von Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung und Bundesministerium der Verteidigung
- Oms, C., Gromaire, M.-C. und Chebbo, G. (2003) In situ observation of the water-sediment interface in combined sewers, using endoscopy. In: *Water Science & Technology*, Jg. 47, H. 4, S. 11–18
- Orth, H., Lange, R.-L., Pahl, A., Meßmann, S., Bosseler, B., Schlüter, M., Puhl, R., Beck, S., Gillar, M., Ulutas, S. und Volprecht, R. (2008) Zustands-, Prozess- und Wirkungsanalyse zur Entwicklung einer bedarfsorientierten Reinigungsstrategie für Kanalnetze. Forschungsbericht, MUNLV
- Orth, H., Lange, R.-L., Bosseler, B. und Schlüter, M. (2009) Zustands-, Prozess- und Wirkungsanalyse zur Entwicklung einer bedarfsorientierten Reinigungsstrategie für Kanalnetze
- Ostmann, R. (2005) Kanalreinigung in der Stadt Detmold - Verfahren zur Erfas-sung von Tätigkeiten in der Kanalisation. Vortrag. Gelsenkirchen
- Ostmann, R. (2011) Störfallmeldung bei der IKT-Betreiber-Hotline für Störfälle
- Pisano, W. C. (1996) Summary: United States "Sewer solids" settling characteriza-tion methods, results,uses and perspectives. In: *Water Science & Technology*, Jg. 33, H. 9, S. 109–115
- Prochnow, J. V., Spork, V., Jahnke, J. und Schwelm, C. (2001) Using Dissolved and Particulate Carbon for the Prediction. *Phys. Chem. Earth*, Jg. 26, H. 1, S. 53–58

- Puhl, R. (2006) Handbuch Schacht. IKT-Institut für Unterirdische Infrastruktur, Gelsenkirchen
- Reuber, J. (2004) Physikalische und numerische Simulation von Stauraumkanälen mit unten liegender Entlastung. Rheinisch-Westfälische Technische Hochschule Aachen, Aachen.
- Ristenpart, E. (1995) Feststoffe in der Mischwasserkanalisation. Vorkommen, Bewegung und Verschmutzungspotential: SuG-Verlagsgesellschaft, Hannover, Schriftenreihe für Stadtentwässerung und Gewässerschutz, Band 11
- Ristenpart, E. (1998) Solids transport by flushing of combined sewers. In: Water Science & Technology, Jg. 37, H. 1, S. 171–178
- Ristenpart, E. und Uhl, M. (1993) Dynamic behaviour of Sewer Sediments. In: Proceedings of the 6th Int. Conference of Urban Storm Drainage, Niagara Falls, S. 748–753
- Ritec GmbH (2011) Schachtkamera der Fa. Ritec, www.ritec-tv.de
- Sander, T. (1989) Ablagerungsprozess und Feststofftransport in Abwasserleitungen. Dissertation. Technische Universität Carolo-Wilhelmina zu Braunschweig, Braunschweig.
- Schaffner, J. (2010) Numerische Modellierung des Einflusses von Unterwasserständen auf die Effektivität von Spülwellen. In: Technische Universität Darmstadt (Hrsg.) DAWAKO - Darmstädter Wasserbauliches Kolloquium. Schwallspülung - Messungen in Abwasserkanälen und angeschlossenen Gewässern. Sammlung Abstracts, Darmstadt
- Schlüter, M. (2005) Handbuch Kanalreinigung: IKT - Institut für Unterirdische Infrastruktur, Gelsenkirchen
- Schneider, K.-J. (2001) Bautabellen für Ingenieure. 14. Auflage, Werner Verlag, Düsseldorf
- Schönherr, F. (2003) Kanalablagerungen und ihre Bedeutung für den Schmutzstoffaustrag aus Kanalisationen. Diplomarbeit. Universität Karlsruhe, Institut für Siedlungswasserwirtschaft, Karlsruhe
- Schröder, R. und Zanke, U. (2003) Technische Hydraulik - Kompendium für den Wasserbau. 2. Auflage, Springer Verlag, Berlin, Heidelberg
- Shields, A. (1936) Anwendung der Ähnlichkeitsmechanik und der Turbulenzforschung auf die Geschiebebewegung. Mitteilungen der Preußischen Versuchsanstalt für Wasserbau und Schiffsbau, Berlin, Heft 26
- Shirazi, R. H. S. M., Bouteligier, R., Willems, P. und Berlamont, J. (2008) Preliminary results of investigating proper location of flushing tanks in combined sewer networks for optimum effect. 11th International Conference of Urban Drainage, Edinburgh, Scotland
- Späth, K.-M. (2011) Präsentation beim Workshop „Bedarfsorientierter Spülplan“ vom 11. Mai 2011, IKT-Institut für Unterirdische Infrastruktur, Gelsenkirchen
- Stempfl, M. (2003) Anpassung und Installation eines Betriebsführungssystems für Kläranlagen, Auszug Diplomarbeit

- Staufer, P., Dettmar, J. und Pinnekamp, J. (2007) Improvement of water quality by sewer network flushing. In: Novatech, S. 1317–1324
- Staufer, P. (2009) Glatte Rohroberflächen - (k)ein Kriterium im Hinblick auf die Vermeidung von Ablagerungen, 23. Oldenburger Rohrleitungsforum 05.-06. Februar 2009, S. 216-230
- Stein, D. (1999) Instandhaltung von Kanalisationen. 3. Aufl.: Ernst, Berlin
- Tait, S. J., Rushforth, P. J. und Saul, A. J. (1998) A laboratory study of the erosion and transport of cohesive-like sediment mixtures in sewers. In: Water Science & Technology, Jg. 37, H. 1, S. 163–170
- TECTUS GmbH (2006) Protokoll der Besprechung mit Herrn Scheuermann (TECTUS GmbH)
- TECTUS GmbH (2011) Firmeninformation der TECTUS Transponder Technology GmbH, Moers; unter www.eleusis-plus.de
- Thistlethwayte, D. K. B. (1972) Sulfide in Abwasseranlagen - Ursachen, Auswirkungen, Gegenmaßnahmen, Beton-Verlag
- Türk, R. (2007) Protokoll der Besprechung mit Herrn Türk. Tiefbauamt Würselen
- Ulutaş, S. (2007) Bewertung von Schachterkennungssystemen zur Planung, Steuerung und Kontrolle von Kanalreinigungsarbeiten. Diplomarbeit, Lehrgebiet Siedlungswasserwirtschaft, Fachhochschule Bochum, unveröffentlicht
- Verbanck, M. A., Ashley, R. M. und Bachoc, A. (1994) International workshop on origin, occurrence and behaviour of sediments in sewer systems: summary of conclusions. In: Water Research, Jg. 28, H. 1, S. 187–194
- Volprecht, R. (2006) Inspektionsmethoden zur Ablagerungserkennung als Grundlage für eine bedarfsorientierte Reinigungsstrategie. Diplomarbeit, Lehrstuhl für Siedlungswasserwirtschaft und Umwelttechnik, Ruhr-Universität Bochum, unveröffentlicht
- Weismann, D. und Lohse, M. (2007) Sulfid-Praxishandbuch der Abwassertechnik, Biogene Korrosion, Geruch, Gefahr verhindern und Kosten beherrschen. M. Lohse (Hrsg.), Vulkan-Verlag, Essen
- Weyand, M. und Dohmann, M. (1988) Ablagerungsverhalten von großformatigen Stauraumkanälen. In: KA - Abwasser, Abfall, Jg. 35, H. 11, S. 1152–1157
- Williams, K. J., Tait, S. J. und Ashley, R. M. (2009) In-sewer sedimentation associated with active flow control. In: Water Science & Technology, Jg. 60, H. 1, S. 55–63
- Yalin, M. S. (1977) Mechanics of sediment transport. 2. ed.: Pergamon Press, Oxford, New York.

Anhang

Auftrag : Kanalreinigung

Kanalunterhaltung SW – Kanäle ; Kanalunterhaltung MW – Kanäle ; Kanalunterhaltung RW – Kanäle

Datum	Fahrzeug	Fahrzeugführer	Beifahrer	Bearbeitungszeit		
				Beginn:	Ende:	Pausenzeit:

Arbeitsbericht Betriebstagebuch:

StraÙe	Arbeits- schacht	Schächte oberhalb	Reinigung			Schachtkontrolle Ablagerungen/Schachtzustand			Ratten- befall	*Ablagerungen: wenig: 0 – 5 cm mittel: 5 – 10 cm viel: 10 – 30 cm > 30 cm Mängelbe- richt Schäden/ Bemerkung
			Haltung	Schacht	S-fang	wenig*	mittel*	viel*		
1			<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	
2			<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	
3			<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	
4			<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	
5			<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	
6			<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	
7			<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	
8			<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	
9			<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	
10			<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	
11			<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	
12			<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	
13			<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	
14			<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	
15			<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	
16			<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	
17			<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	
18			<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	
19			<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	
20			<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	
21			<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	
22			<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	
23			<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	
24			<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	
25			<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	
26			<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	
27			<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	

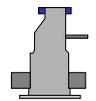
drucklose Schwallspülung: Einsatzdauer:.....[Std] (Straßen und Schächte sowie Schachtkontrollen oben eintragen und kennzeichnen)

Außerplanmäßige Arbeiten / Störungsbeseitigung / Verstopfung / Falscheinleiter gesichtet:

Schachtschäden/ Störungen

- 1 Schachtabdeckung defekt/klappert
- 2 Steigeisen defekt
- 3 Schmutzfänger erneuern
- 4 Rohranschluss nicht fachgerecht
- 5 Schachtgerinne defekt
- 6 Schacht sichtbar undicht
- 7 Schachtwände defekt (Risse)
- 8 Wurzeleinwuchs
- 9 ...

F
Foto-
nachweis
vorh.



Datum, Unterschrift Fahrzeugführer

Datum, Unterschrift Meister Kanalwerk

Auftrag : Reinigung Schmutzfänger

Kanalunterhaltung SW – Kanäle ; Kanalunterhaltung RW – Kanäle , Rinnen

Datum	Fahrzeug	Fahrzeugführer	Beifahrer	Bearbeitungszeit
				Beginn: Ende: Pausenzeit:

Arbeitsbericht Betriebstagebuch:

	Straße	Schacht	Reini- gung		Schachtkontrolle Ablagerungen/ Schachtzustand			Ratten- befall	*Ablagerungen: wenig: 0 – 5 cm mittel: 5 – 10 cm viel: 10 – 30 cm > 30 cm Mängelbericht	Schäden/Bemerkung
			S.-fang	Schacht	wenig*	mittel*	viel*			
1			<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>		
2			<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>		
3			<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>		
4			<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>		
5			<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>		
6			<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>		
7			<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>		
8			<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>		
9			<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>		
10			<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>		
11			<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>		
12			<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>		
13			<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>		
14			<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>		
15			<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>		
16			<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>		
17			<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>		
18			<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>		
19			<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>		
20			<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>		
21			<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>		

Summe Schmutzfänger pro Tag	[Stck]								
------------------------------------	--------	--	--	--	--	--	--	--	--

- Aco-Drän-Rinnen:** [Std] , geleistete Menge:
- Dehnungsfugen:** [Std] , geleistete Menge:
- Podestränder:** [Std] , geleistete Menge:

Außerplanmäßige Arbeiten / Störungsbeseitigung / Verstopfung / Falscheinleiter gesichtet:

Schachtschäden

- | | | |
|------------------------------------|-------------------------|----------------------------|
| 1 Schachtabdeckung defekt/klappert | 2 Steigeisen defekt | 3 Schmutzfänger erneuern |
| 4 Rohranschluss nicht fachgerecht | 5 Schachtgerinne defekt | 6 Schacht sichtbar undicht |
| 7 Schachtwände defekt (Risse) | 8 Wurzeleinwuchs | 9 ... |

F
Foto-
nachweis
vorh.



Datum, Unterschrift Fahrzeugführer

Datum, Unterschrift Meister Kanalwerk

Auftrag : Reinigung Straßenabläufe

RW – Straßeneinläufe/Brückenabläufe

Aco Drain Rinnen

Datum	Fahrzeug	Fahrzeugführer	Beifahrer	Bearbeitungszeit
				Beginn: Ende: Pausenzeit:

Arbeitsbericht Straßenabläufe:

	Straße	Anzahl gereinigter Straßenabläufe	Bemerkungen
1			
2			
3			
4			
5			
6			
7			
8			
9			
10			
11			
12			
13			
14			
15			
16			
17			
18			
19			
20			
21			
22			
23			
24			
25			
26			
27			
28			
29			
30			
	Summe Straßenabläufe	[Stck]	

Aco-Drän-Rinnen: [Std] , geleistete Menge:

Dehnungsfugen: [Std] , geleistete Menge:

Podestränder: [Std] , geleistete Menge:

Außerplanmäßige Arbeiten / Störungsbeseitigung:

Datum, Unterschrift Fahrzeugführer

Datum, Unterschrift Meister Kanalwerk

.....-Pumpwerk.....		Häufigkeit	Datum		Datum		Datum		Datum	
			in Ordnung		in Ordnung		in Ordnung		in Ordnung	
Kontrolle Wartung	Laufruhe, Leckage, Wellenabdichtung, Riemenspannung kontrolliert	wöchentlich	ja	nein	ja	nein	ja	nein	ja	nein
	Schieber Klappen, Antriebe auf Leckage kontrolliert	wöchentlich	ja	nein	ja	nein	ja	nein	ja	nein
	Ablagerungskontrolle im Saugraum & Einlaufbauwerk	monatlich	ja	nein	ja	nein	ja	nein	ja	nein
	Pumpensteuerung kontrolliert	monatlich	ja	nein	ja	nein	ja	nein	ja	nein
	Signal-Alarmierung getestet	jährlich	ja	nein	ja	nein	ja	nein	ja	nein
	Notstromaggregat überprüft/Probelauf	monatlich	ja	nein	ja	nein	ja	nein	ja	nein
	Rohrleitungen und Armaturen überprüft (Sichtkontrolle)	2 Wochen	ja	nein	ja	nein	ja	nein	ja	nein
	Be-Entlüftungseinrichtung, Frostwächter, Keller-entwässerungspumpe überprüft	2 Wochen	ja	nein	ja	nein	ja	nein	ja	nein
	Kontrolle Schmierung	monatlich	ja	nein	ja	nein	ja	nein	ja	nein
	Reinigung/Pflege Bauwerk und Außenanlagen	jährlich	ja	nein	ja	nein	ja	nein	ja	nein
	Betriebsstunden Pumpen	wöchentlich	P 1	P 2	P 1	P 2	P 1	P 2	P 1	P 2
		Unterschrift								
Ausgeführte Tätigkeiten Reparaturen/Störungen		Zeitaufwand in Std.								
Reparaturen										
Störfall/ Überlastung										
Zeitaufwand Reparaturen u. Störfälle in Std.										
Bestätigt Meister Kanalwerke:		Unterschrift								

RW-Rückhaltebecken		Häufigkeit	Datum	Datum	Datum	Datum
Kontrolle Wartung			in Ordnung	in Ordnung	in Ordnung	in Ordnung
			ja ☐ nein ☐			
			ja ☐ nein ☐			
			ja ☐ nein ☐			
			ja ☐ nein ☐			
			ja ☐ nein ☐			
			ja ☐ nein ☐			
			ja ☐ nein ☐			
			ja ☐ nein ☐			
			ja ☐ nein ☐			
Bemerkungen:						
		Unterschrift				
Ausgeführte Tätigkeiten: Kontrollen/Reinigungen/ Reparaturen/Störungen		Zeitaufwand in Std.				
Reparaturen						
Störfall/ Überlastung						
Zeitaufwand Reparaturen u. Störfälle in Std.						
Bestätigt Meister Kanalwerke: _____		Unterschrift				

