

RUHR-UNIVERSITÄT BOCHUM

**Fakultät für Bau- und
Umweltingenieurwissenschaften**

Lehrstuhl für Siedlungswasserwirtschaft
und Umwelttechnik

Prof. Dr.-Ing. habil. Marc Wichern



Abschlussbericht

Untersuchungen zur bedarfsorientierten
Kanalreinigung unter Nutzung betrieblicher Synergien

Phase I & II

Bochum, Mai 2015

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. Marc Wichern

Stephan Berzio, M.Sc.

Dr.-Ing. Ruben Laurids Lange

Projektbeteiligter



IKT-Institut für Unterirdische Infrastruktur

Exterbruch 1
45886 Gelsenkirchen

Prof. Dr.-Ing. Bert Bosseler

Dipl.-Ing. (FH) Serdar Ulutaş, MBA

Dipl.-Ing. Marco Schlüter

Markus Treinen, M.Sc.

Auf der Basis des gemeinsam mit dem IKT erarbeiteten Forschungsantrags „Untersuchungen zur bedarfsorientierten Kanalreinigung unter Nutzung betrieblicher Synergien“ in der Version vom 31.03.2009 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 gemeinsame Forschungsarbeiten vereinbart. Der nachfolgende Bericht fasst die Ergebnisse der Ruhr-Universität Bochum und des IKT zusammen.

Kurzfassung

Eine turnusmäßige Kanalreinigung erzeugt allein in NRW jährlich Kosten von rund 50 Millionen Euro. Es stellt sich also die Frage, ob und in welchem Umfang eine Reinigung wirklich erforderlich ist. Aus diesem Grund wurde in Zusammenarbeit der Ruhr-Universität Bochum, Lehrstuhl für Siedlungswasserwirtschaft und Umwelttechnik (RUB) mit dem Institut für Unterirdische Infrastruktur (IKT) die Möglichkeit zur Einführung einer bedarfsorientierten Kanalreinigung untersucht. Gefördert wurde das Projekt durch das Ministerium für Klimaschutz, Umwelt, Landwirtschaft, Natur und Verbraucherschutz des Landes NRW und betreut durch das LANUV.

An einer Kanalteststrecke im Zulauf der Kläranlage Bochum-Ölbachtal (Ruhrverband) wurden Ablagerungsuntersuchungen sowie Laborversuche zur Entstehung von Schwefelwasserstoff und zur zeitlichen Verfestigung von Kanalablagerungen durchgeführt (RUB). Durch das IKT wurde der Kontakt zu Netzbetreibern und Produktherstellern gesucht. Durch die Einrichtung einer Betreiberhotline, durch den Erfahrungskreis Kanalbetrieb, in dem sich Netzbetreiber austauschen können und durch die Durchführung von Expertenworkshops wurde die Möglichkeit einer betrieblichen Umsetzung der bedarfsorientierten Kanalreinigung analysiert.

Die schon benannte Kanalteststrecke auf der Kläranlage Bochum-Ölbachtal umfasste drei jeweils zehn Meter lange Testrohre (DN 300), mit denen die Einflüsse von Durchfluss, Gefälle, Rauheit sowie von Hindernissen und schwankenden Abwasserzusammensetzungen auf Kanalablagerungen untersucht wurden. Dabei zeigte sich, dass sich nach ein bis drei Monaten eine Vergleichmäßigung von Ablagerungen im Kanal einstellt, weil Erosion von Ablagerungen und Sedimentation von Partikeln sich etwa die Waage halten. Hervorgerufen durch Biofilmwachstum kam es bei den Versuchen auch in glatten Kanalrohren zur Ablagerungsbildung. Im Mittel bildeten sich etwa 2,3 Liter Ablagerungen pro Meter Testrohr.

Dennoch ist es wichtig, die einzelnen Kanalabschnitte weiterhin regelmäßig zu inspizieren. Wie auch die praktischen Versuche zeigen, kann durch Hindernisse die hydraulische Leistungsfähigkeit innerhalb kürzester Zeit stark eingeschränkt werden. Gleichzeitig war bei den Versuchen zu beobachten, dass Niederschlagsereignisse nicht nur zu einer Verdünnung von Partikelfrachten führen können, sondern je nach Ort im Kanalnetz und Zeitpunkt der Messung auch größere Frachten anzutreffen sind. Die erhöhten Ablagerungen werden in diesen Fällen nach einiger Zeit in Trockenwettersituation wieder ausgespült. Im Fall von Hindernissen können Ablagerungen schnell zu einer Überlastung des Kanals führen. So

sollte bei der gesetzlich geforderten Überwachung der Kanalisation insbesondere das Auffinden derartiger Hindernisse und Störungen im Vordergrund stehen.

Die Einführung der bedarfsorientierten Kanalreinigung ist nicht für jeden Netzbetreiber sinnvoll. Berechnungen zeigen, dass gerade für kleine Kommunen mit Kanalnetzlängen deutlich unter 100 Kilometern durch die bedarfsorientierte Kanalreinigung kaum Kostenvorteile entstehen. Im Einzelfall können sich durch die Überwachung der Ablagerungen die Kosten sogar erhöhen. Allerdings sind die Entwicklungen im Bereich der Kanalinspektion durch z.B. LED-Technik und moderne Datenverarbeitung (GIS und Tablet-PCs) deutlich vorangeschritten, was den Verwaltungsaufwand in den nächsten Jahren deutlich reduzieren wird. Durch die Erfassung einzelner Problemstellen im Kanalnetz kann so im Laufe der Zeit ein angepasster Reinigungsplan erstellt werden.

Mit zunehmenden Alter der Ablagerungen kommt es im Regelfall zu einer Verfestigung der Ablagerungen. Zum Lösen dieser Ablagerungen waren verhältnismäßig geringe Schubspannungen von 0,5-2 N/m² bei Verfestigungen mit einem Alter bis zu 100 Tagen nötig. Je nach Abwasserzusammensetzung können diese gerade bei hohem Fettanteil im Abwasser jedoch auch größer ausfallen und müssen in diesen Fällen im Einzelfall betrachtet werden.

Es zeigte sich bei Laboruntersuchungen, dass die Bildung von Schwefelwasserstoff nur bedingt durch eine regelmäßige Kanalreinigung verhindert werden kann. Selbst nach einer gründlichen Reinigung konnten innerhalb weniger Tage sowohl im Abwasser (>2 mg/L) als auch in der Abluft (>10 ppm) relevante Mengen von Schwefelwasserstoff nachgewiesen werden.

Auf Basis der Untersuchungen scheint für sehr viele Einzugsgebiete eine Verlängerung von Reinigungsintervallen somit möglich, insbesondere dann, wenn keine baulichen Probleme in den Netzen vorliegen. In den Expertenworkshops zeigte sich, dass Netzbetreiber, die eine bedarfsorientierte Kanalreinigung auf Basis von Ergebnissen aus Ablagerungsinspektionen in einem wiederkehrenden Prozess planen und umsetzen, die neue Strategie häufig als betriebssicherer, rechtssicherer und auch wirtschaftlicher einschätzen. Eine bedarfsorientierte Kanalreinigung ist für Betreiber mit hoher Netzlänge zu empfehlen.

Inhaltsverzeichnis

KURZFASSUNG	3
INHALTSVERZEICHNIS	I
ABBILDUNGSVERZEICHNIS	VII
TABELLENVERZEICHNIS	XX
VERZEICHNIS DER ABKÜRZUNGEN UND DER SYMBOLE	XXIV
1 EINLEITUNG	1
2 VERANLASSUNG UND ZIELSTELLUNG	2
2.1 AUSGANGSSITUATION	2
2.2 RECHTLICHE GRUNDLAGEN FÜR DIE UNTERHALTUNG UND REINIGUNG VON KANÄLEN.....	2
2.2.1 <i>Allgemeines</i>	2
2.2.2 <i>Schlussfolgerungen für den Kanalbetrieb</i>	9
2.3 SITUATION IN DEN NORDRHEIN-WESTFÄLISCHEN KOMMUNEN	9
2.3.1 <i>Umsetzung der Reinigungsaufgabe</i>	9
2.3.2 <i>Zukünftige Herausforderungen</i>	13
2.4 PROBLEMSTELLUNG	13
3 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
3.3.1 <i>Transportarten</i>	18
3.3.2 <i>Schubspannung</i>	21
3.4 KANALABLAGERUNGEN.....	24
3.4.1 <i>Ablagerungsarten</i>	25
3.4.2 <i>Alterung von Kanalablagerungen</i>	28
3.5 AUSWIRKUNGEN VON KANALABLAGERUNGEN.....	31
3.6 SCHWEFELWASSERSTOFFBILDUNG IN DER KANALISATION.....	32
3.6.1 <i>Eigenschaften von Schwefelwasserstoff</i>	32
3.6.2 <i>Prozess der Schwefelwasserstoffbildung</i>	34
3.7 VORGEHENSWEISE UND ARBEITSPLAN	40
4 STAND DER TECHNIK.....	42
4.1 RECHTLICHE UND TECHNISCHE ANFORDERUNGEN	42
4.2 REINIGUNGSSTRATEGIEN.....	43
4.3 INSPEKTIONSMETHODEN.....	44
4.3.1 <i>TV-Inspektion mittels Fahrwagenkamera</i>	44
4.3.2 <i>Schachtkamera</i>	46
4.3.3 <i>Kanalspiegelung</i>	48

4.3.4	<i>Begehung</i>	50
4.3.5	<i>Inaugenscheinnahme des Schachtgerinnes</i>	50
4.3.6	<i>Sehende Düsen</i>	51
4.4	HOCHDRUCKSPÜLVERFAHREN.....	52
4.4.1	<i>Verfahrensablauf</i>	52
4.4.2	<i>Druck und Durchfluss</i>	53
4.4.3	<i>Spülstrahlleistungsdichte</i>	57
4.4.4	<i>Saugleistung Vakuum</i>	58
4.4.5	<i>Lärmemissionen</i>	60
4.5	EDV- UND SCHACHTERKENNUNGSSYSTEME.....	61
5	PRAKTISCHE VERSUCHE	65
5.1	KANALTESTSTRECKE.....	65
5.1.1	<i>Material und Methoden</i>	66
5.1.1.1	Aufstellungsort der Versuchsanlage.....	66
5.1.1.2	Abwasserzusammensetzung.....	67
5.1.1.3	Rohrleitung.....	68
5.1.1.4	Förderung des Abwassers.....	73
5.1.1.5	Messgrößen.....	80
5.1.1.6	Wiederinbetriebnahme.....	83
5.1.1.7	Alterung und Verschleiß.....	84
5.1.1.8	Betrieb einer Versuchsanlage in den Wintermonaten.....	85
5.1.2	<i>Versuchsprogramm in Phase I</i>	86
5.1.3	<i>Versuchsprogramm in Phase II</i>	87
5.2	AUSWERTUNG UND ERGEBNISSE.....	94
5.2.1	<i>Verlauf der Ablagerungsbildung</i>	96
5.2.2	<i>Einfluss von Gefälle, äquivalenter Sandrauheit und Durchfluss auf die Ablagerungsbildung</i>	100
5.2.3	<i>Einflussfaktor Rauheit und Durchfluss</i>	103
5.2.4	<i>Zusammenfassung für den Faktor Rauheit</i>	106
5.2.5	<i>Zusammenfassung für den Faktor Abfluss und Abwasserzusammensetzung</i>	108
5.2.6	<i>Ablagerungsbildung durch Hindernisse</i>	113
5.2.7	<i>Saisonale Veränderung der Ablagerungscharakteristik</i>	116
5.2.8	<i>Einfluss von Niederschlägen auf die Versuchsergebnisse</i>	119
5.3	IDENTIFIKATION VON EINFLUSSFAKTOREN AUF DIE ABLAGERUNGSBILDUNG UND BEWERTUNG DER EINZELNEN EINFLÜSSE.....	126
5.3.1	<i>Beurteilung der erfassten Einflussfaktoren</i>	129
5.3.2	<i>Ausblick für weitere praktische Forschungsvorhaben</i>	131
5.4	EROSIONSVERSUCHE.....	131
5.4.1	<i>Material und Methoden</i>	132
5.4.1.1	Verwendetes Material.....	132
5.4.1.2	Kalibrierung.....	134
5.4.2	<i>Auswertung und Ergebnisse</i>	137
5.5	SCHWEFELWASSERSTOFFFROHR.....	141

5.5.1	<i>Material und Methoden</i>	141
5.5.2	<i>Auswertung und Ergebnisse der Phase I</i>	143
5.6	UNTERSUCHUNGEN ZUR SCHWEFELWASSERSTOFFBILDUNG IN PHASE II	146
5.6.1	<i>Material und Methoden</i>	146
5.6.1.1	Beschreibung der Batchversuche	146
5.6.1.2	Verwendete Impfschlämme und Substrat	148
5.6.2	<i>Material und Methoden H₂S-Versuchsrohrs</i>	149
5.6.2.1	H ₂ S-Messung in der Gasphase	152
5.6.2.2	Messung in der Wasserphase	154
5.6.3	<i>Versuchsplan der H₂S-Teststrecke</i>	155
5.6.4	<i>Statische Modelle</i>	155
5.6.5	<i>Ergebnisse und Datenauswertung</i>	160
5.6.5.1	Zusammensetzung des verwendeten Abwassers	160
5.6.5.2	Ergebnisse der Batchversuche	161
5.6.5.3	Gegenüberstellung der Ergebnisse der Batchversuche mit den statischen Modellen	164
5.6.5.4	Betriebsprobleme mit dem H ₂ S-Testrohr	168
5.6.5.5	Versuchsergebnisse	170
5.6.5.6	Dauer bis zur Entstehung von Schwefelwasserstoff im Versuchsrohr	174
5.6.5.7	Bewertung der Wandschubspannung und der Fließgeschwindigkeiten	175
5.7	ZUSAMMENFASSUNG DER PRAKTISCHEN UNTERSUCHUNGEN	176
6	BETRIEBSORIENTIERTE UNTERSUCHUNGEN	178
6.1	ZIELE UND VORGEHENSWEISE	178
6.2	INSPEKTION UND KONTROLLE	184
6.2.1	<i>Ist-Analyse</i>	184
6.2.2	<i>Umsetzungsschwerpunkte</i>	189
6.2.3	<i>Fallbeispiel 1: Technische Betriebe Velbert</i>	191
6.2.4	<i>Fallbeispiel 2: Stadt Gladbeck</i>	193
6.2.5	<i>Fallbeispiel 3: Stadt Herne</i>	195
6.2.6	<i>Protokollentwicklung</i>	197
6.2.6.1	Ablagerungshöhe/-menge	197
6.2.6.2	Fließ- und Strömungsverhalten	198
6.2.6.3	Ablagerungskonsistenz	199
6.2.6.4	Geruch	200
6.2.6.5	Kanalzustand und -material	200
6.2.6.6	Anzahl der Reinigungsgänge	201
6.2.6.7	Störfall-/Schadensvermerk	202
6.2.6.8	Muster-Protokoll Kanalreinigung	202
6.3	BEWERTUNG DER ABLAGERUNGSSITUATION	205
6.3.1	<i>Ist-Analyse</i>	205
6.3.2	<i>Umsetzungsempfehlung</i>	208
6.4	EINSATZPLANUNG	211
6.4.1	<i>Ist-Analyse</i>	211
6.4.2	<i>Umsetzungsschwerpunkte</i>	216

6.4.3	<i>Marktübersicht EDV-Systeme</i>	216
6.4.3.1	Vorgehensweise	216
6.4.3.2	Marktübersicht.....	218
6.4.4	<i>Anschaffung eines EDV-Systems</i>	221
6.4.5	<i>Kostenstruktur</i>	224
6.4.5.1	Fallbeispiel: Kasselwasser.....	224
6.4.5.2	Fallbeispiel: Stadt Mainz	224
6.4.5.3	Technische Betriebe Velbert	225
6.4.5.4	Stadt Bottrop.....	225
6.5	KANALREINIGUNG	225
6.5.1	<i>Ist- Analyse</i>	225
6.5.2	<i>Umsetzungsschwerpunkte</i>	230
6.5.3	<i>Prüfprogramm für HD-Spülfahrzeuge</i>	230
6.5.3.1	Überblick	230
6.5.3.2	Prüfung: Druck- und Durchflussmessung	231
6.5.3.2.1	Versuchsaufbau und -anforderungen	231
6.5.3.2.2	Durchflussmessung	232
6.5.3.2.3	Druckmessung.....	234
6.5.3.3	Prüfung: Spülstrahlleistungsdichte.....	236
6.5.3.4	Spülstrahlleistungsdichte, Parameterstudie	239
6.5.3.4.1	Parameterstudie	239
6.5.3.4.2	Durchfluss	240
6.5.3.4.3	Anzahl der Düseneinsätze.....	241
6.5.3.4.4	Durchmesser der Düseneinsätze	242
6.5.3.4.5	Abstrahlwinkel der Düseneinsätze.....	243
6.5.3.5	Prüfung: Vakuumpumpe	245
6.5.3.5.1	Grundsätzlicher Prüfaufbau	245
6.5.3.5.2	Vorprüfungen.....	246
6.5.3.5.3	Optimierungspotenzial	247
6.5.3.5.4	Weiterentwicklung Prüfaufbau	248
6.5.3.5.5	Prüfungen	249
6.5.3.5.6	Ergebnisse.....	250
6.5.3.6	Prüfung: Lärm.....	252
6.5.3.6.1	Vorprüfungen.....	252
6.5.3.6.2	Optimierungspotenzial	253
6.5.3.6.3	Prüfaufbau	254
6.5.3.6.4	Durchführung.....	255
6.5.3.6.5	Ergebnisse und Auswertung	257
6.6	ANALYSE TYPISCHER SCHWACHSTELLEN IM KANALNETZ (STÖRFALL-ANALYSE)	259
6.6.1	<i>Ist-Analyse</i>	259
6.6.2	<i>Umsetzungsschwerpunkte</i>	262
6.6.2.1	Technische Betriebe Velbert	263
6.6.2.2	Stadt Bottrop.....	263
6.6.2.3	KasselWasser.....	264
6.6.2.4	Stadt Herne	264
6.6.2.5	Münchner Stadtentwässerung.....	264

6.6.2.6	Stadt Stuttgart.....	265
6.6.3	Ablaufschema Störfälle.....	266
6.6.4	Störfallkatalog.....	267
7	MATERIALIEN FÜR DEN WECHSEL ZUR BEDARFSGERECHTEN KANALREINIGUNG.....	276
7.1	MODULARER MAßNAHMENPLAN.....	276
7.1.1	<i>Organisation – Entwicklung.....</i>	<i>277</i>
7.1.1.1	Prozesse beschreiben.....	277
7.1.1.2	Kostenbetrachtung.....	277
7.1.1.3	Entscheidungsvorbereitung.....	278
7.1.1.4	Abstimmung mit Überwachungsbehörden.....	278
7.1.1.5	Ablauforganisation anpassen.....	278
7.1.1.6	Aufgaben und Stellen definieren.....	278
7.1.1.7	Kommunikation der neuen Betriebsstrategie.....	279
7.1.2	<i>Sachmittel / Dritte – Beschaffung.....</i>	<i>279</i>
7.1.2.1	Fahrzeug-Check.....	279
7.1.2.2	Instrumente zur Ablagerungsbewertung.....	279
7.1.2.3	Mobile Datenerfassungsgeräte.....	280
7.1.2.4	Spülplanungstools / EDV-Systeme.....	280
7.1.2.5	Störfall- und Beschwerdebearbeitung.....	280
7.1.3	<i>Personal – Weiterbildung.....</i>	<i>281</i>
7.1.3.1	Betriebspersonal: Überwachen und Bewerten.....	281
7.1.3.2	Sachbearbeiter: Spül- und Einsatzplanung / EDV-Systeme.....	281
7.1.3.3	Betriebsmanager: Kommunikation, Vermittlung, Ziele/Aufgaben, Prozesse.....	282
7.2	ARBEITSHILFEN.....	282
8	ERSCHLIEßBARE EINSARPOTENZIALE.....	285
8.1	DATENGRUNDLAGE.....	285
8.2	ARBEITSHILFE – EINSARPOTENZIALE.....	286
8.3	BERECHNUNGSBEISPIELE.....	289
9	ZUSAMMENFASSUNG UND AUSBLICK.....	292
	LITERATURVERZEICHNIS.....	299
	ANHANG K – KOSTENBERECHNUNGSBEISPIELE.....	310
K 1	BERECHNUNGSANNAHMEN.....	310
K 2	BETREIBERPROFIL – IV-50.....	310
K 3	BETREIBERPROFIL III-200.....	316
K 4	BETREIBERPROFIL II-400.....	323
K 5	BETREIBERPROFIL I-1000.....	329
	ANHANG A – ARBEITSHILFEN.....	336
A 1	PROTOKOLL KANALREINIGUNG.....	336
A 2	RISIKOMATRIX.....	338
A 3	MARKTÜBERSICHT SCHACHTKAMERAS.....	339

A 4	MARKTÜBERSICHT BETRIEBSFÜHRUNGSSYSTEME	340
A 5	MARKTÜBERSICHT KANALINFORMATIONSSYSTEME.....	341
A 6	ABLAUFSHEMA-ANSCHAFFUNG EDV-SYSTEM.....	342
A 7	DATENAUFNAHME-FOMULAR-STÖRFALL	343
A 8	ABLAUFSHEMA STÖRFALL- UND BESCHWERDEMANAGEMENT.....	344
A 9	STÖRFALLKATALOG	345
A 10	MODULARER MAßNAHMENPLAN	360
A 11	MAßNAHMENPLAN.....	361
A 12	EINSPARPOTENTIALE-BETREIBERPROFILE	363

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1:	Organisation der Reinigungsarbeiten in Abhängigkeit von der Kanalnetzlänge (Orth et al., 2008)	10
Abbildung 2:	Durchschnittliche Reinigungskosten pro Kanalmeter gemäß einer Umfrage des Instituts für Unterirdische Infrastruktur (IKT) bei 15 Netzbetreibern.....	12
Abbildung 3:	Konzentrationsprofile in Rohrleitungen in Abhängigkeit von der mittleren Strömungsgeschwindigkeit nach Führböter (in Sander, 1989).....	20
Abbildung 4:	Vertikale Schubspannungsverteilung bei Freispiegelabfluss (nach Yalin, 1977).....	23
Abbildung 5:	Schematisch Schichtung im Abwasserkanal (nach Gebhard, 2009)	26
Abbildung 6:	Typischer Querschnitt eines mit Ablagerungen behafteten Mischwasserkanals (Crabtree, 1989).....	27
Abbildung 7:	Struktur und Verhalten von Feststoffen (nach Artières, 1988)	30
Abbildung 8:	Entwicklung der Ablagerungshöhen im Kanalabschnitt Spinnerstraße (Dette et al., 1996)	31
Abbildung 9:	Einfluss des pH-Wertes auf das Dissoziationsgleichgewicht von Schwefelwasserstoff bei 20°C (Lohse, 1986).....	37
Abbildung 10:	Stoffumsatz in Abwasserkanälen (DWA, 2010).....	38
Abbildung 11:	Struktur des Arbeitsprogramms.....	41
Abbildung 12:	Darstellung der TV-Inspektion (Falk et al. 2000)	45
Abbildung 13:	TV-Inspektionskamerawagen (Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung, 2011)	45
Abbildung 14:	Schachtkamerasystem mit mobilem Bedienteil; Beispiel (Volprecht, 2006)	46
Abbildung 15:	Schematische Darstellung der Kanalspiegelung (Orth et al. 2008).	49
Abbildung 16:	Kanalspiegelung mit Lichtquelle am Beobachterschacht	49

Abbildung 17: Inaugenscheinnahme des Schachtgerinnes (Begleitung der Kanalreinigungsarbeiten der TBV, 2014; Begleitung der Kanalreinigungsarbeiten der Stadt Gladbeck, 2014).....	51
Abbildung 18: Sehende Düse (KEG, 2014)	51
Abbildung 19: Sehende Nordseedüse (P&W, 2014)	51
Abbildung 20: Schematische Darstellung zum HD-Spülverfahren (Schlüter, 2004).	53
Abbildung 21: Geschwindigkeitsprofil laminarer und turbulenter Strömungen (Wielenberg, 1996).....	55
Abbildung 22: Druckverlustdiagramm, Beispiel, aus (Firmeninformationen ELAFLEX, 2014)	56
Abbildung 23: Unterströmung eines Feststoffteilchens (DIN 19523).....	59
Abbildung 24: Geoinformationssystem GIS (Bosseler, 2006)	61
Abbildung 25: MDE-Gerät (Bosseler, 2006).....	62
Abbildung 26: Transponder.....	63
Abbildung 27: Barcode.....	63
Abbildung 28: Schild	64
Abbildung 29: Markierungstopfen	64
Abbildung 30: Ablagerungs- und Niederschlagshöhen (Messstelle Bochum-2, Messungen im Rahmen des MUNLV-Projektes „Zustands-, Prozess und Wirkungsanalyse zur Entwicklung einer bedarfsorientierten Reinigungsstrategie für Kanalnetze)	66
Abbildung 31: Plexiglasrohr während der Montage.....	69
Abbildung 32: Verteilung der Rohrmaterialien im Gesamtnetz Deutschlands (nach Berger und Falk, 2011)	70
Abbildung 33: Plexiglasrohr mit Ausschnitten im Scheitel.....	72
Abbildung 34: Unterkonstruktion für die Versuchsrohre (links: Vertikale Stützen mit höhenverstellbaren Querstreben; rechts: Horizontale Träger als Auflage für die Versuchsrohre).....	73
Abbildung 35: Funktionsskizze des verwendeten Verteilerrohrs	74

Abbildung 36: Verteilerrohr mit Schiebern (im Vordergrund) und Vorlagebehälter (braune Rohre im Hintergrund)	75
Abbildung 37: Steuerung der Kanaltteststrecke über InTouch (Wonderware GmbH), Hauptfenster	76
Abbildung 38: Steuerung der Kanaltteststrecke über InTouch (Wonderware GmbH), Übersicht Verteilerrohr	76
Abbildung 39: Steuerung der Kanaltteststrecke über InTouch (Wonderware GmbH), Übersicht Testrohr1	77
Abbildung 40: Beispielhafte Annäherung von Ist- und Soll-Abfluss für unterschiedliche Annäherungsgeschwindigkeiten (ohne Messwerte).....	78
Abbildung 41: Abfluss bei konstantem Soll-Abfluss, leichte Abflussschwankungen bedingt durch Druckänderungen im Verteilerrohr (Schieber DN50), (Versuchsreihe 10, $Q=2$ L/s, $IS=1$ ‰, $kS=0,4$ mm, $\tau=0,3$ N/m ²)..	79
Abbildung 42: Schieberöffnung und Ist-Abfluss für einen sukzessive anwachsenden Soll-Abfluss (Schieber DN100) (Versuchsreihe 10, $IS=1$ ‰, $kS=0,4$ mm).....	79
Abbildung 43: Auszug aus dem Messprotokoll für die Ablagerungshöhen, die schwarzen Striche markieren die Messpunkte (Draufsicht)	82
Abbildung 44: Messschieber	82
Abbildung 45: Bild links: Größere Ablagerungen, welche bei Trockenwetter an der Entnahmestelle auftraten. Bild rechts: Entnommene Faserstücke aus der Pumpe.....	83
Abbildung 46: Die drei Abbildungen zeigen deutliche Abnutzungserscheinungen an den drei Plexiglasrohren. Links und Mitte: Risse im Material, welche zu Undichtigkeiten im System führten. Rechts: Haarrisse und Riefen im Material, wodurch die Ablagerungen nur schwer zu erkennen waren	85
Abbildung 47: Links: Sandpapier mit einer Körnung von 40. Rechts: Verfugte Natursteinfliese. Mit dem Maß einer einzelnen Fliese von etwa 22 x 22 x 4 mm. Das Fugenmaß schwankte zwischen ein bis fünf Millimeter.....	89

Abbildung 48: Oberflächenstruktur von a) Sandpapier mit einer Körnung von 40; b) Sediment aus der Versuchsanlage; c) verfugte Natursteinfliese.	90
Abbildung 49: Links: Ablagerungen am Rand des Versuchsrohrs nach ca. einem Tag ohne Beschickung. Rechts: Identische Stelle im Versuchsrohr einen Tag später. Die bisherige Sielhaut ist vollständig verschwunden.....	93
Abbildung 50: Ablagerungsbildung in einem glatten Plexiglasrohr nach einem Tag ($Q=2$ L/s $IS=1$ ‰, $k_S \approx 0,0015$ mm), von unten aufgenommen	94
Abbildung 51: Ablagerungen auf Sandpapier nach zwei Tagen ($Q=2$ L/s, $IS=1$ ‰, $k_S=0,4$ mm, $\tau=0,3$ N/m ²)	95
Abbildung 52: Ablagerungsbildung mit (links) und ohne (rechts) Sandpapier bei ansonsten gleichen Randbedingungen ($Q=2$ L/s, $IS=1$ ‰), Fließrichtung von unten nach oben.....	95
Abbildung 53: Ablagerungshöhen über die Rohrlänge, Auskleidung mit Sandpapier im Bereich von Meter 4 bis 6 ($Q=2$ L/s, $IS=1$ ‰, $k_S=0,4$ mm).....	96
Abbildung 54: Idealisierte Querschnittsfläche der Ablagerungen.....	97
Abbildung 55: Entwicklung der Menge aller Ablagerungen im Testrohr (Versuchsreihen 11, 13, 14, 16, 17 und 20, $Q=2$ L/s, $IS=1,0$ ‰, $k_S=0,4$ mm).....	98
Abbildung 56: Entwicklung der Menge aller Ablagerungen im Testrohr (Versuchsreihe 20, $Q=2$ L/s, $IS=1$ ‰, $k_S=0,4$ mm)	99
Abbildung 57: Tägliche Änderung der Menge aller Ablagerungen im Testrohr in Abhängigkeit der Versuchsdauer (Versuchsreihen 11, 13, 14, 16, 17 und 20, $Q=2$ L/s, $IS=1$ ‰, $k_S=0,4$ mm)	99
Abbildung 58: 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)	101
Abbildung 59: 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, $IS=1$ ‰)	102

- Abbildung 60: Entwicklung der Menge aller Ablagerungen im Testrohr bei unterschiedlichen Abflussmengen (Versuchsreihen 11, 13, 14, 16, 17, 19, 20, 22, 23, 25 und 31, IS=1 ‰, kS=0,4 mm) 102
- Abbildung 61: Entwicklung der Menge aller Ablagerungen im Testrohr bei unterschiedlichen Oberflächenstrukturen (Versuchsreihen 42-44, IS=1 ‰, Q= 2L/s) 103
- Abbildung 62: Entwicklung der Menge aller Ablagerungen im Testrohr bei unterschiedlichen Anfangsrauheiten und einem angepassten Q (Versuchsreihen 45-47, IS=1 ‰, Q=2L/s als Tagesgang von 0,7 bis 4 L/s) 104
- Abbildung 63: Ablagerungsmengenentwicklung durch unterschiedliche Beschickungsmengen (Versuchsreihe 33, 37, 43, 47 kS=0,635 mm, IS=1 ‰). Mit zunehmender Zuflussmenge in die Versuchsröhre nimmt auch die Ablagerungsmenge in den Röhren zu. 110
- Abbildung 64: Entstehung von Ablagerungen in Versuchsröhre 2 (k=0,4 mm) durch ein Hindernis bei Meter fünf (Versuchsreihe 49, IS=1 ‰, Q=2 L/s). Zu erkennen sind die erhöhten Ablagerungen vor dem Hindernis, während darauffolgend nahezu keine Ablagerungen vorhanden sind. Tag 20 zeigt die Ablagerungsmengen nach Entfernen des Hindernisses 114
- Abbildung 65: Ablagerungsmengen über den Versuchszeitraum von 28 Tagen in den drei Versuchsröhren (Versuchsreihe 49, IS=1 ‰, Q=2 L/s). An Tag 17 bzw. 18 wurden die Hindernisse aus den Versuchsröhren entfernt. Im Anschluss stellten sich ähnliche Ablagerungsmengen wie ohne ein Hindernis ein 115
- Abbildung 66: Links: Deutliches Biofilmwachstum Mitte Oktober sowie in Folge des Biofilm auch vermehrtes Auftreten von Ablagerungen. Rechts: Kaum Biofilmwachstum in den Wintermonaten. Im Vergleich zu den Sommermonaten ist nur ein dünner Sedimentfilm am Rand zu erkennen. 117
- Abbildung 67: Entwicklung der Menge aller Ablagerungen im Testrohr und Tageswerte der Zuflüsse zur Kläranlage Ölbachtal (Versuchsreihe 20, Q=2 L/s, IS=1 ‰, kS=0,4 mm) 120

Abbildung 68: 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, $IS=1$ ‰, $kS=0,4$ mm)	121
Abbildung 69: Versuchsrohr mit Anpassung im Schleifpapier.....	122
Abbildung 70: AFS- und CSB-Konzentrationen während eines Spülversuchs (Versuchsreihe 15, $Q=2$ L/s, $IS=2,5$ ‰, $kS=0,4$ mm)	124
Abbildung 71: Verlauf der Trübungsmessung während eines Spülversuchs (Versuchsreihe 15, $Q=2$ L/s, $IS=2,5$ ‰, $kS=0,4$ mm)	124
Abbildung 72: Erosionsschubspannung für verschiedene Kriterien (Versuchsreihen 11, 13, 14, 16, 17 und 20, $Q=2$ L/s, $IS=1$ ‰, $kS=0,4$ mm).....	125
Abbildung 73: Durch eine Baumaßnahme schichtenweise zugesetztes Steinzeugrohr.....	127
Abbildung 74: Schematische Funktionsskizze des eingesetzten Erosionsmessgerät (EROSIMESS) (Liem et al., 1997)	132
Abbildung 75: Plexiglasbehälter zur Messung des Erosionswiderstandes von Sedimenten.....	133
Abbildung 76: Kritische Schleppspannung Θ_c nach Gleichung (3.5) und dimensionslose Korngröße nach Gleichung (3.6) (Schröder und Zanke, 2003).....	134
Abbildung 77: Ergebnisse der Erosionsversuche mit Sand verschiedener Korngrößen	136
Abbildung 78: Ergebnisse der Kalibrierung.....	137
Abbildung 79: Drehzahl und TS-Konzentration bei einem Erosionsversuch mit überwiegend organischem Sediment.....	138
Abbildung 80: Sohlschubspannung und TS-Konzentration bei einem Erosionsversuch mit überwiegend organischem Sediment.....	138
Abbildung 81: Drehzahl und TS-Konzentration bei einem Erosionsversuch mit überwiegend mineralischen Sediment	139
Abbildung 82: Sohlschubspannung und TS-Konzentration bei einem Erosionsversuch mit überwiegend mineralischem Sediment	139

Abbildung 83: Sohlschubspannungen von überwiegend mineralischen Sedimenten in Abhängigkeit von der Sedimentationsdauer (als Grenzwert für die Erosion wurde eine TS-Konzentration von 0,1 gTS/L angenommen)	140
Abbildung 84: Prinzipskizze des Versuchsrohrs zur Schwefelwasserstoffbildung	142
Abbildung 85: Dauer bis Grenzwerte für von 5,9 mgH ₂ S/l (im Wasser) bzw. 1,5 ppmH ₂ S (in der Kanalluft) überschritten werden in Abhängigkeit von der Temperatur (Phase I)	144
Abbildung 86: Verlauf von Schwefelwasserstoff, AFS und Temperatur über die Versuchsdauer	145
Abbildung 87: Verlauf der H ₂ S- und CSB-Konzentrationen	146
Abbildung 88: Links: Schematische Darstellung eines angeschlossenen Batchversuchs mit kontinuierlicher Druckaufzeichnung nach DIN EN ISO 11734 (Gasvolumenmessung mittels Gasdruckgerät) (VDI 4630, (2012)). Rechts: Kugelhahn mit Adapter für die Probenahme; Drucksonde zur Datenaufzeichnung, Probenflasche (in der Abbildung 250 ml), Schraubverschluss mit Gummidichtung	148
Abbildung 89: Schematische Darstellung des Versuchsrohrs mit einer Länge von 5 m und einem Durchmesser von DN 75. Die Onlinemesstechnik befindet sich am Ende der Versuchseinstellung.....	151
Abbildung 90: Verwendeter Gaslogger zur Onlineaufzeichnung der Schwefelwasserstoffkonzentration in der Abluft AppTek (A1-CBISS, 2011)	152
Abbildung 91: Schema einer elektrochemischen Messsonde	153
Abbildung 92: Prinzip der elektrochemischen Messung von H ₂ S (nach Jessel, 2001)	154
Abbildung 93: Henry-Konstante in Abhängigkeit von der Temperatur nach Svardal (1991) und Ries (1993)	158
Abbildung 94: Gasentwicklung von drei unterschiedlichen Impfschlämmen sowie der Blindprobe. Zusätzlich ist der Zeitpunkt des Abbruchkriteriums mit einem Quadrat gekennzeichnet.....	162
Abbildung 95: Anpassung der Sondenergebnisse durch Trendbereinigung	169

- Abbildung 96: Teil 1 von Durchlauf 5. Innerhalb eines Tages ist H₂S im Abwasser messbar. 170
- Abbildung 97: Gegenüberstellung von H₂S in Wasser und Abluft. An allen Messtagen kommt es zunächst zu einer Konzentrationsspitze im Abwasser. Darauffolgend tritt eine längere Plateauphase in der Abluft auf. 171
- Abbildung 98: Schwefelwasserstoffkonzentration im Ablauf in Abhängigkeit von CSB-Konzentration und dem Durchfluss..... 172
- Abbildung 99: H₂S-Konzentration in Abwasser und Abluft in Abhängigkeit zum Durchfluss. Mit zunehmenden Durchfluss steigt die Konzentration des H₂S in der Abluft und sinkt im Abwasser..... 173
- Abbildung 100: Links: Blick in das Versuchsrohr zum Ende der Versuchsreihe 3 mit Ansammlung von Ablagerungen. Rechts: Draufsicht auf die entstandenen Ablagerungen, mineralisches Sediment in der Mitte des Rohres und Sielhaut an den Rändern. 176
- Abbildung 101: Prozessmodell für die Umsetzung der bedarfsorientierten Kanalreinigung (Zustands-, Prozess- und Wirkungsanalyse zur Entwicklung einer bedarfsorientierten Reinigungsstrategie für Kanalnetze, 2008)..... 178
- Abbildung 102: Betreiber-Interview (links) und Startveranstaltung (Info-Tag) mit Priorisierung von Themenschwerpunkten durch die Teilnehmer (rechts)..... 180
- Abbildung 103: Experten-Workshops: Ergebnispräsentation (links) und Prozessanalyse in Gruppenarbeit und Diskussion (rechts)..... 181
- Abbildung 104: Projektphasen (I-Ist-Analyse, II – Umsetzungsphase): Handlungsschwerpunkte 182
- Abbildung 105: 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). 186
- Abbildung 106: Schema für die Dokumentation der Ablagerungserkennung, Auszug (Späth, 2011) 187
- Abbildung 107: Onlinebefragung Ablagerungskontrolle (Treinen, 2014a)..... 188

Abbildung 108: Inaugenscheinnahme des Schachtgerinnes (van Laak, 2014a)	192
Abbildung 109: Ablagerungskontrolle mit Kanalspiegel (van Laak, 2014a)	192
Abbildung 110: Mobile Datenerfassung in Gladbeck (van Laak, 2014b).....	194
Abbildung 111: Schmutzfängerreinigung mit Freistrahl und Saugschlauch (van Laak, 2014b)	194
Abbildung 112: Vorstrahlende Düse für Einsatz bei starken Verschmutzungen und Verstopfungen (van Laak, 2014c)	196
Abbildung 113: Altrohrscherben durch Baumaßnahme (van Laak, 2014c).....	196
Abbildung 114: Bildbeispiel zur Bewertung der Ablagerungshöhe.....	198
Abbildung 115: Bildbeispiele zur Bewertung des Fließ- und Strömungsverhaltens	199
Abbildung 116: Grobe Bewertung des Haltungszustands mit dem Kanalspiegel	201
Abbildung 117: Aufzeichnung der Reinigungsdaten am Spülfahrzeug	201
Abbildung 118: Direkt erkennbare typische Schäden an Abwasserschächten: brüchiger Schachtkörper(links oben), undichter Schachtkörper (rechts oben), schadhaftes Bankett (links unten), defekte Steigeisen (rechts unten).....	202
Abbildung 119: Protokoll Kanalreinigung	204
Abbildung 120: Muster-Protokoll, Rückseite	205
Abbildung 121: Workshop-Eindrücke „Bewertung der Ablagerungssituation“: Präsentation durch Netzbetreiber (oben, links); Auditorium (oben, rechts); Moderierte Diskussion (unten, links); Sammlung von Einflussfaktoren (unten, rechts).....	207
Abbildung 122: Ablagerungsbewertung, schematische Risikobetrachtung, grün-Intervalllängerung, blau – Intervallbeibehaltung, rot – Intervallverkürzung.....	209
Abbildung 123: Workshop-Eindrücke „Einsatzplanung“: Netzbetreiber stellen Vorgehensweise vor (links); Intensive Diskussion (rechts)	211
Abbildung 124: Workshop „Betriebsführungssysteme und Kanaldatenbanken“: Netzbetreiber stellen ihr Konzept zur Diskussion (oben, links); Gesprächsrunde (oben, rechts); Screenshots EDV-System (unten) (Müller, 2011).....	213

Abbildung 125: Plandarstellung im EDV-System (Lampe, 2011).....	214
Abbildung 126: Datenliste im EDV-System (Lampe, 2011).....	214
Abbildung 127: Einsatz EDV-Unterstützung (Treinen, 2014a)	215
Abbildung 128: Marktübersicht Betriebsführungssysteme	218
Abbildung 129: Marktübersicht Kanalinformationssysteme.....	220
Abbildung 130: Ausschreibung von EDV-Systemen, Vorgehensweise, aus (Hebel, 2014).....	222
Abbildung 131: Arbeitshilfe – Ablaufschema „Anschaffung eines EDV-Systems“ 223	
Abbildung 132: Überprüfung der HD-Pumpe im Freistrahlbetrieb; „Fahrzeug- Check“.....	226
Abbildung 133: Druck- und Durchflussmessung im Düsenbetrieb, „Fahrzeug- Check“.....	226
Abbildung 134: Druck am Fahrzeug und an der Düse für verschiedene Durchflüsse 227	
Abbildung 135: Düsenkennlinie für Fahrzeug (HD-Pumpe/ Schlauch).....	227
Abbildung 136: Druck- und Durchflussmessungen in Abhängigkeit der Messzeit 228	
Abbildung 137: Saugen des Räumgutes, „Fahrzeug-Check“	228
Abbildung 138: Erfassen der Saugleistung, „Fahrzeug-Check“	228
Abbildung 139: Versuchsaufbau Druck- und Durchflussmessung: (1) Hochdruckspülschlauch; (2) Magnetisch-induktives Durchflussmessgerät; (3) Digitaler Drucksensor; (4) Mess- und Steuerstand.....	231
Abbildung 140: Freistrahл während der Durchflussmessung.....	232
Abbildung 141: Durchflussmesswerte im Soll-Ist-Vergleich	233
Abbildung 142: Relative Abweichung des Pumpendurchflusses vom Soll-Wert	234
Abbildung 143: Gegenüberstellung Fahrzeug- und Düsendruck.....	235
Abbildung 144: Relative Druckverluste in Bezug auf den Fahrzeugdruck.....	236
Abbildung 145: Anzahl der Düseneinsätze	237

Abbildung 146: Düsenlehre mit Stahlstiften	237
Abbildung 147: Düsenlehre-Messnadel	237
Abbildung 148: Messung des Abstrahlwinkels	237
Abbildung 149: Spülstrahlleistungsdichte (IKT-Düse), Beispiel-Messung	240
Abbildung 150: Spülstrahlleistungsdichte und Durchfluss, Parametervariation..	241
Abbildung 151: Spülstrahlleistungsdichte in Abhängigkeit der Anzahl der Düseneinsätze, Beispiel IKT-Düse.....	242
Abbildung 152: Spülstrahlleistungsdichte in Abhängigkeit des Düsendurchmessers 243	
Abbildung 153: Spülstrahlleistungsdichte in Abhängigkeit des Abstrahlw. der Düseneinsätze	244
Abbildung 154: Prüfaufbau Saugleistungsmessung.....	246
Abbildung 155: Messprotokollierung	246
Abbildung 156: Versuchsaufbau Staudrucksonde	246
Abbildung 157: Anschluss für Wasserzugabe.....	248
Abbildung 158: Prüfeinrichtung mit 2m Kunststoffrohr	248
Abbildung 159: Verbindung mit Saugschlauch.....	249
Abbildung 160: Prüfung der Vakuumpumpe, Beruhigungsstrecke 4m.....	250
Abbildung 161: Prüfung der Vakuumpumpe, Beruhigungsstrecke 5m.....	250
Abbildung 162: Lärmmessung	252
Abbildung 163: Halbkugelmessverfahren gemäß DIN 3744	254
Abbildung 164: Halbkugelmessverfahren (Aufsicht) gemäß DIN 3744	254
Abbildung 165: Halbkugelmessverfahren (Ansicht) gemäß DIN 3744	254
Abbildung 166: Anordnung der Messpunkte (An- und Aufsicht).....	256
Abbildung 167: Fahrzeug 1, Messpunkt 1	256
Abbildung 168: Fahrzeug 2, Messpunkt 2.....	256
Abbildung 169: Vergleich Messverfahren	258
Abbildung 170: Vergleich Messverfahren Fahrzeug 1, Messpunkt 1	258
Abbildung 171: Eisenstange (Ostmann, 2011).....	260

Abbildung 172: KG-Rohre (Ostmann, 2011)	260
Abbildung 173: Absperrblase (Ostmann, 2011)	260
Abbildung 174: Holzbalken (Ostmann, 2011).....	260
Abbildung 175: Steine aus dem Kanal	260
Abbildung 176: Loses Bruchstück.....	260
Abbildung 177: Übersicht über Störfälle im Kanalbetrieb.....	261
Abbildung 178: Beschwerdemanagement der Stadtentwässerung Stuttgart	266
Abbildung 179: Störfallerfassungsbogen der Stadtentwässerung Stuttgart	266
Abbildung 180: Anlegen eines Reinigungsauftrags im Beschwerdemanagementsystem	266
Abbildung 181: Dokumentationsmöglichkeiten im Beschwerdemodul	266
Abbildung 182: Ablaufschema Störfall- und Beschwerdemanagement.....	266
Abbildung 183: Detaillierter Störfallmeldebogen für Verstopfungen im öffentlichen Bereich	268
Abbildung 184: Störfälle im öffentlichen Bereich-Kategorisierung.....	268
Abbildung 185: Wurzeleinwuchs (Backnang, 2014).....	269
Abbildung 186: Rückstau (Vordereifel, 2014).....	269
Abbildung 187: Bauschutt (Backnang, 2014).....	270
Abbildung 188: Gestürzter Schmutzfänger (Gladbeck, 2014).....	270
Abbildung 189: Baulicher Mangel (Rendsburg, 2014).....	271
Abbildung 190: Einragende Stützen (Vordereifel, 2014)	271
Abbildung 191: Geringes Sohlgefälle (Vordereifel, 2014)	272
Abbildung 192: Betonreste, Papier (Herne, 2014)	272
Abbildung 193: Geringer Abfluss (Velbert, 2014).....	273
Abbildung 194: Klappernder Kanaldeckel (Gladbeck, 2014).....	273
Abbildung 195: Geruchsbelästigung (IKT, 2000)	274
Abbildung 196: Rattenbefall (IKT, 2014)	274
Abbildung 197: Versackung/ Muffenversatz (Backnang, 2014).....	275

Abbildung 198: Aerosolbildung (Herne, 2014)	275
Abbildung 199: Modularer Maßnahmenplan, Beispielhafte Umsetzung.....	277
Abbildung 200: Internetpräsenz „Kanalreinigung“, Download-Plattform.....	283
Abbildung 201: Arbeitshilfe, Kostenbetrachtung	287

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1:	Beispiele gesetzlicher und technischer Regelungen für den Abwasserbereich (nach Dettmar, 2005)	4
Tabelle 2:	Umfang, Art und Häufigkeit der Überwachung von Entwässerungseinrichtungen (Auszug aus der Selbstüberwachungsverordnung Abwasser - SÜwVO Abw NRW, 2013)	6
Tabelle 3:	Durchzuführende Betriebs- und Unterhaltungsmaßnahmen (Auszug nach Ministerium für Umwelt, Raumordnung und Landwirtschaft NRW, 1995)	7
Tabelle 4:	Inspektions- und Reinigungshäufigkeiten nach Arbeitsblatt DWA-A 147 (DWA, 2005)	8
Tabelle 5:	Tagesleistungen und Leistungskosten der Hochdruckreinigung in Abhängigkeit vom Kanaldurchmesser (nach Geib et al., 2007).....	11
Tabelle 6:	Herkunft und Art typischer Feststoffe in der Mischkanalisation (verändert nach Gebhard, 2009)	16
Tabelle 7:	Median- und Mittelwerte gemessener Konzentrationen der abfiltrierbaren Stoffe (AFS) und des Chemischen Sauerstoffbedarfs (CSB) für Zentraleuropa (nach Brombach, Fuchs 2003)	17
Tabelle 8:	Kritische Sedimentationsschubspannungen τ_{cS} für abgelagerungsfreien Transport und kritische Erosionsschubspannungen τ_{cR} (vgl. Frehmann, 2003).....	24
Tabelle 9:	Klassifizierung von Ablagerungen (nach Crabtree, 1989)	26
Tabelle 10:	Eigenschaften der verschiedenen Ablagerungskategorien (nach Crabtree, 1989)	28
Tabelle 11:	Auswirkungen von Kanalablagerungen (nach Schönherr, 2003)	32
Tabelle 12:	Anhaltswerte für die Wahrnehmung und Wirkung von H ₂ S in Abhängigkeit von der Konzentration (verändert nach Harting, 2006)	34
Tabelle 13:	Prozesse des Schwefelkreislaufes im anaeroben Abwasser (verändert nach Weismann und Lohse, 2007).....	35
Tabelle 14:	Marktübersicht Schachtkameras	48

Tabelle 15: Auslösewerte nach der Lärm- und Vibrations-Arbeitsschutz Verordnung (LärmVibrationsArbSchV) (Momber, 1993).....	60
Tabelle 16: Vergleich der Abwasserkonzentrationen im Kanalnetz und im Kläranlagenzulauf	68
Tabelle 17: Äquivalente Sandrauheit k_S für Rohre (Auswahl aus Schröder und Zanke, 2003; Schneider, 2001)	71
Tabelle 18: Zusammenstellung der erfassten Messgrößen	81
Tabelle 19: Stand der Versuchsreihen nach Phase I (März bis November 2011)	87
Tabelle 20: Definition der Ausgangsparameter in Phase II (entspricht Versuchsreihe 27 / 34)	88
Tabelle 21: Analyseparameter der Strukturanalyse	91
Tabelle 22: Versuchsplan der Phase II	92
Tabelle 23: Überblick über verschiedene Oberflächenprofile. Die ersten drei Aufnahmen stellen die Versuchsmaterialien dar. Zusätzlich sind drei Originalproben des IKTs untersucht worden.	106
Tabelle 24: Übersicht über die aus den Ablagerungshöhen berechneten mittleren Geschwindigkeiten und deren Standardabweichung	111
Tabelle 25: Zulaufdaten zur Kläranlage Bochum-Ölbachtal über den Versuchszeitraum von Phase II.....	113
Tabelle 26: Einflüsse auf die Ablagerungsbildung aus den praktischen Versuchen (DN 300).....	130
Tabelle 27: Zusammenstellung der erfassten Parameter	143
Tabelle 28: Trockenrückstand (TR) und organischer Trockenrückstand (oTR) des Impfschlammes und des eingesetzten Substrats der Batchversuche	149
Tabelle 29: Auflistung der durchgeführten Batchversuche mit variierender Impfschlammzugabe	149
Tabelle 30: Unterschiede im Versuchsaufbau zwischen Phase I und II.....	150
Tabelle 31: Versuchsbeschreibende Parameter und Auflistung der verwendeten Messsonden	151

Tabelle 32: Elektronenfluss der Elektronen (nach INDISCI.de, 2014)	153
Tabelle 33: Übersicht der durchgeführten H ₂ S-Rohr-Versuche mit entsprechend variierten Parametern.....	155
Tabelle 34: Übersicht der statischen Modelle mit jeweiliger Berechnungsgrundlage	156
Tabelle 35: Theoretische Biogasausbeute beim Abbau verschiedener Stoffgruppen (Lübken et al., 2010).....	157
Tabelle 36: Auflistung der Henry-Konstanten	158
Tabelle 37: Substrateigenschaften in Form einer Labor- und einer Elementaranalyse des in den Batchversuchen verwendeten Abwassers.....	161
Tabelle 38: Biogasmengen sowie Ertragsraten aus den vorausgehend beschriebenen Batchversuchen	163
Tabelle 39: H ₂ S-Produktionsraten der Batchversuche in Wasser und Gasphase	164
Tabelle 40: Durchschnittliche Produktionsraten aus Gas- und Wasserphase aller Versuchsreihen in Bezug auf den verwendeten Impfschlamm.....	164
Tabelle 41: Anteile der Gase am Biogaspotential des verwendeten Abwassers für die Batch-Versuche nach Boyle et al. (1977)	165
Tabelle 42: Übersicht der Ergebnisse der Batchversuche mit Gegenüberstellung zu den statischen Modellen.....	167
Tabelle 43: Vergleich von Literaturkennwerten mit den Ergebnissen der Batchversuche	168
Tabelle 44: Entstehung relevanter Mengen von H ₂ S in der Abluft und im Abwasser. Bei allen Durchläufen lag das entstandene H ₂ S im Wasser unter dem Schwellenwert.....	174
Tabelle 45: Berechnung der Geschwindigkeiten v [m/s] und mittleren Schubspannungen τ [N/m ²] der Durchläufe 3, 4 und 5.....	175
Tabelle 46: Teilnehmer an Veranstaltungen im Erfahrungskreis Kanalbetrieb	179
Tabelle 47: Begleitung der Umsetzung, Themenschwerpunkte.....	183
Tabelle 48: Herstellerbefragung, Themenschwerpunkte.....	183

Tabelle 49: Daten zum Kanalnetz und Kanalbetrieb, Technische Betriebe Velbert	191
Tabelle 50: Daten zum Kanalnetz und Kanalbetrieb, Stadt Gladbeck.....	193
Tabelle 51: Daten zum Kanalnetz und Kanalbetrieb, Stadt Herne	195
Tabelle 52: Intervallverlängerung, Zeitlicher Verlauf, Erfahrungsbeispiel	210
Tabelle 53: Durchflussmessung.....	233
Tabelle 54: Druckmessung Fahrzeug	235
Tabelle 55: Fahrzeugdaten	237
Tabelle 56: Messung von Düsendruck und Durchfluss	238
Tabelle 57: Spülstrahlleistungsdichte von Fahrzeug 1	239
Tabelle 58: Durchfluss in Abhängigkeit der Drehzahl, Beispiel.....	240
Tabelle 59: Versuchsergebnisse Volumenstrommessung	247
Tabelle 60: Strömungsgeschwindigkeiten der Fahrzeuge in m/s.....	251
Tabelle 61: Ergebnisse des Volumenstromes in m ³ /h.....	251
Tabelle 62: Ergebnisse der Lärmmessung	257
Tabelle 63: Störfallkatalog	269
Tabelle 64: Überblick Materialsammlung	283
Tabelle 65: Kostenträgerstruktur.....	288
Tabelle 66: Betreiberprofile.....	289
Tabelle 67: Kostenberechnungsbeispiele, Einsparpotenziale	290

Verzeichnis der Abkürzungen und der Symbole

Abkürzung	Beschreibung	Einheit
AB	Ablagerungen	
AbwV	Abwasserverordnung	-
AFS	abfiltrierbare Stoffe	mg/L
A_i	Querschnittsfläche der Ablagerungen am Messpunkt i	m^2
AP	Arbeitspaket	-
ATV	Abwassertechnische Vereinigung	-
BFS	Betriebsführungssystem	-
BP	Blindprobe	-
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 / mg/L
HD	Hochdruck	-
h_i	Ablagerungshöhe am Messpunkt i	m

HS ⁻	Hydrogensulfid	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	-
oTR	organischer Trockenrückstand	%TR
p	Druck	bar
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	-
S_{2^-}	Sulfid	mg/L
SH	Sielhaut	-
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	-
SüwVO Abw	Selbstüberwachungsverordnung Abwasser	-
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
SED	Sediment	
τ	Schubspannung	N/m^2
τ_0	Grenzflächen- oder Randschubspannung	N/m^2
τ_c	kritische Randschubspannung	N/m^2

T_{cS}	kritische Sedimentationsschubspannung	N/m ²
T_{cR}	kritische Erosionsschubspannung	N/m ²
T_{lam}	der laminare Teil der Schubspannung	N/m ²
TR	Trockenrückstand	g/kg
T_{turb}	der turbulente Teil der Schubspannung	N/m ²
$\Theta_{c,Shields}$	kritische Schleppspannung nach Shields	N/m ²
VDI	Verein Deutscher Ingenieure	-

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 6.1). Ergänzende Untersuchungen im Labormaßstab befassten sich mit der Schwefelwasserstoffbildung (Kapitel 5.54) und dem Erosionswiderstand von Ablagerungen (Kapitel 6.4). 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 Zielstellung

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) 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 Abwasserverordnung (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 ist in Tabelle 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 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) von der Selbstüberwachungsverordnung Abwasser (SüwVO Abw) abgelöst Runderlass „Anforderungen an den Betrieb und die Unterhaltung von Kanalisationsnetzen“
Kommunen	Entwässerungssatzungen
Technische Vereinigungen und Institute (bspw. DWA oder DIN)	Arbeitsblatt DWA-A 199– Dienst- und Betriebsanweisung für das Personal von Abwasseranlagen 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 Abwasser –SüwVO Abw NRW, 2013).

Tabelle 2: Umfang, Art und Häufigkeit der Überwachung von Entwässerungseinrichtungen (Auszug aus der Selbstüberwachungsverordnung Abwasser - SÜwVO Abw NRW, 2013)

Einrichtungen	Prüfung	Art der Prüfung	Häufigkeit
Kanäle (einschl. der Einbindungen der Anschlusskanäle)	Feststellung von Ablagerungen	optische Kontrolle bzw. Inaugenscheinnahme, Begehung	nach Einsatz- bzw. Spülplan; sonst alle 2 Jahre
	erstmalige Erfassung des Zustandes	Kanalfernsehuntersuchung oder Begehung	
	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 Steigeisen soweit am Schachtkörper, Undichtigkeiten, Fremdwasserzufluss, Ablagerungen	Inaugenscheinnahme	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 SÜwVO Abw NRW wurde am 17. Oktober 2013 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 SÜwVO Abw auf Zustand und Funktionsfähigkeit zu überwachen und hierfür eine Anweisung für die Selbstüberwachung gemäß § 4 aufzustellen. Die Anlage 1 der SÜwVO Abw 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 zusammengestellt.

Tabelle 3: Durchzuführende Betriebs- und Unterhaltungsmaßnahmen (Auszug nach Ministerium für Umwelt, Raumordnung und Landwirtschaft NRW, 1995)

Einrichtungen	Ergebnis der Prüfung nach § 2 SÜwVO Abw	Maßnahmen	Durchführung
Kanäle (einschl. der Einbindungen der Anschlusskanäle)	Ablagerungen mit einer Höhe von mehr als 15 % der Profilhöhe (geschätzt) bis DN 1000	Reinigung	nach Reinigungsplan sonst innerhalb von 3 Monaten
		Reinigung	6 Monaten
Regenüberläufe	Verstopfung der Drossel	Reinigung	unverzüglich

Ergänzend zur SÜwVO Abw ist der Runderlass des Ministeriums für Umwelt, Raumordnung und Landwirtschaft des Landes Nordrhein-Westfalen vom 03.01.1995. Dieser hat weiterhin Bestand, verweist aber inhaltlich auf die SÜwV Kan, (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 SÜwVO Abw erforderlich sind (Tabelle 3).

Die Selbstüberwachungsverordnung Abwasser stellt in Verbindung mit dem Rund-erlass „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 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 Be- gehung: Normalfall: 0,05-0,2/Jahr Sonderfall: 0,5/Jahr Schachtinspektion ohne Be- gehung: 0,5-1,0/Jahr	01,-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

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 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 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 Reinigungsleistungen

setzen, während alle großen Städte die Kanalreinigung selbst durchführen (Abbildung 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.

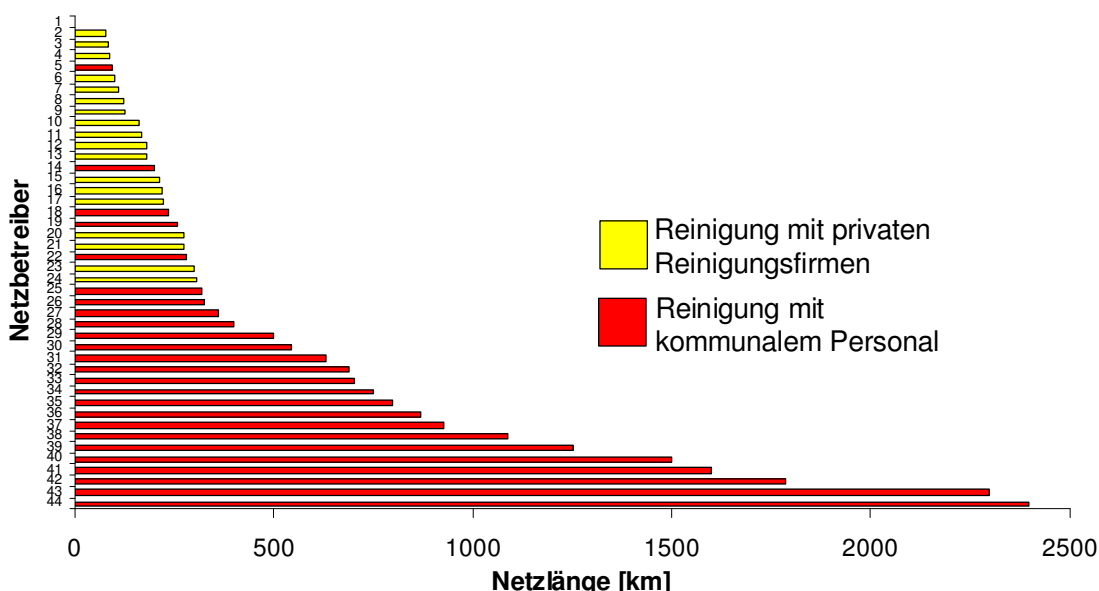


Abbildung 1: Organisation der Reinigungsarbeiten in Abhängigkeit von der Kanalnetzlänge (Orth et al., 2008)

Die Tatsache, dass viele Kommunen ihre Kanalnetze alle zwei Jahre oder häufiger reinigen, gründet unter anderem auf den Vorgaben der SÜwVO Abw, 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 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 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 (Abbildung 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.

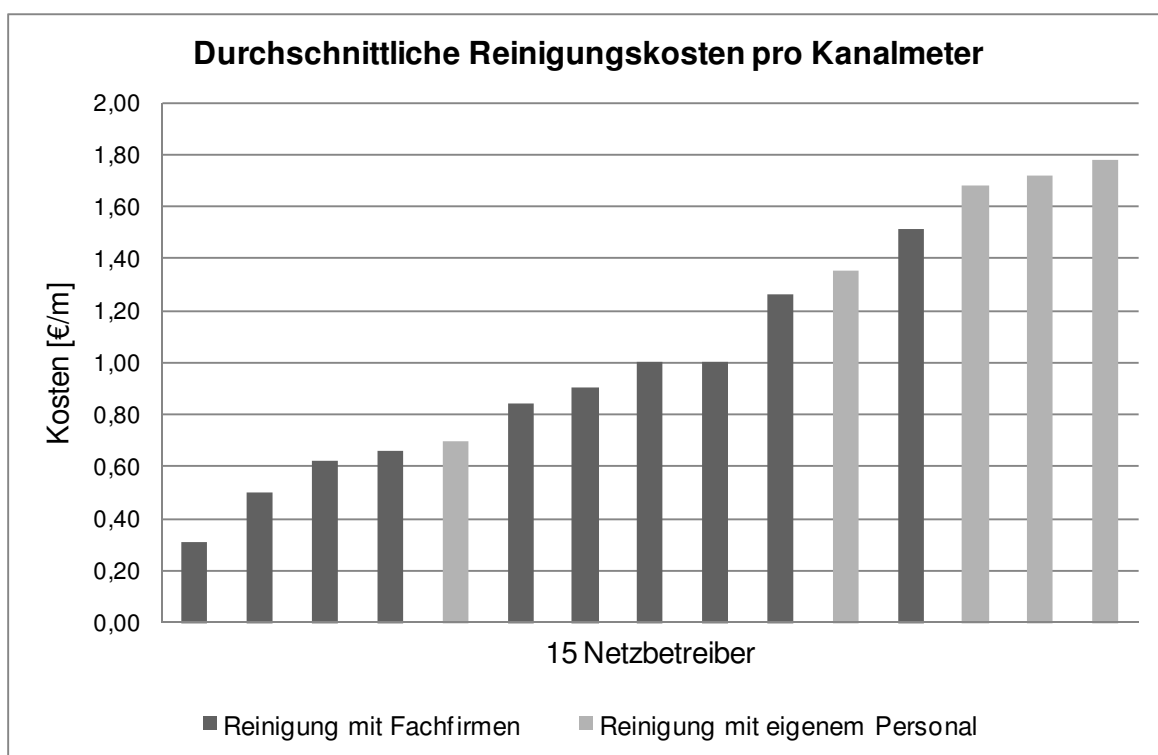


Abbildung 2: Durchschnittliche Reinigungskosten pro Kanalmeter gemäß einer Umfrage des Instituts für Unterirdische Infrastruktur (IKT) bei 15 Netzbetreibern

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 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 6.

Tabelle 6: 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 7 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 7: 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 7 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 Schwebelage 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 (Abbildung 13):

- 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 Abbildung 3 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

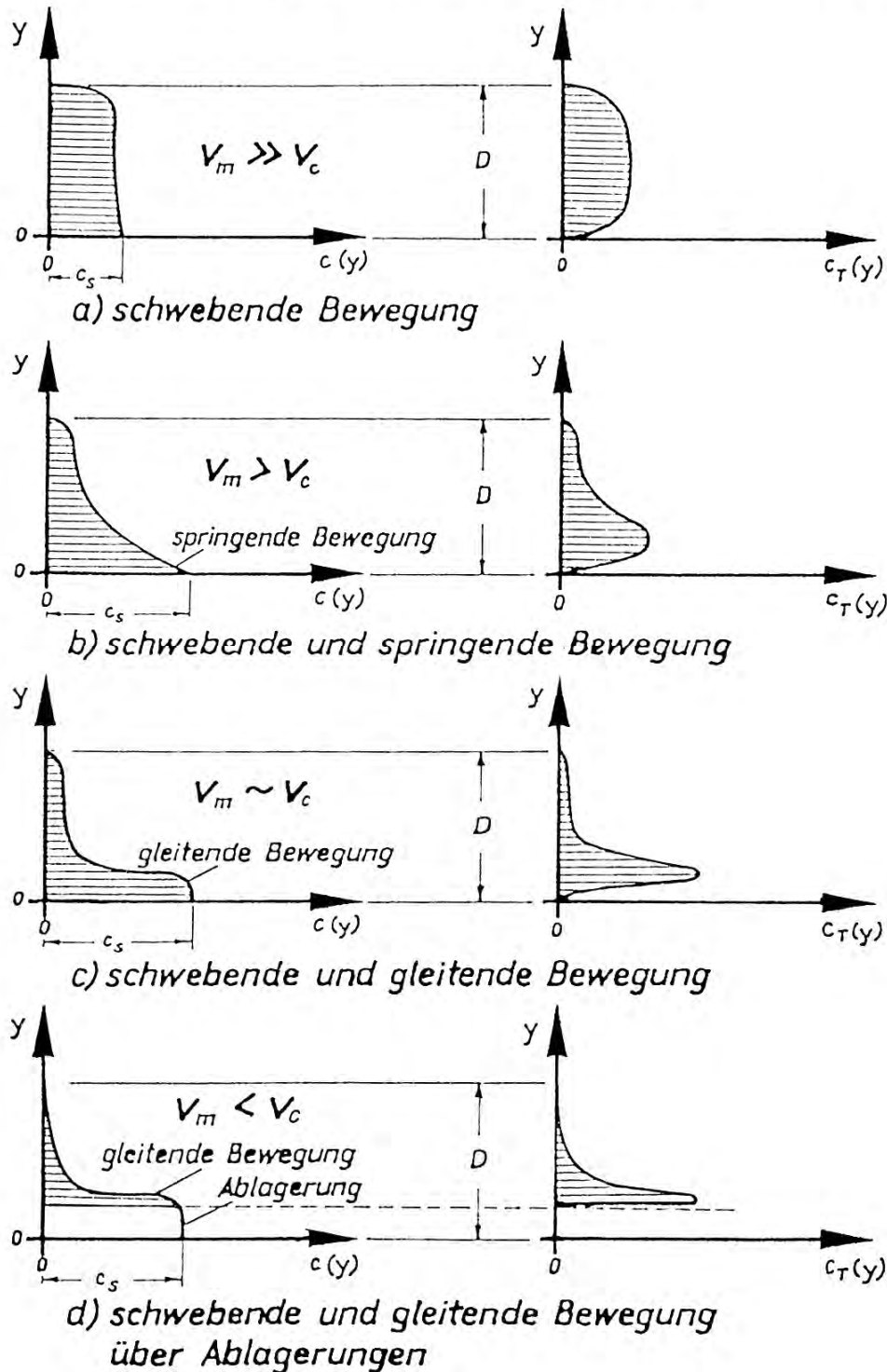


Abbildung 3: Konzentrationsprofile in Rohrleitungen in Abhängigkeit von der mittleren Strömungsgeschwindigkeit nach Führböter (in Sander, 1989)

Die Einteilung der Transportzustände nach Abbildung 3 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 Gerinnewand 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 hinzu. 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. Abbildung 4 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

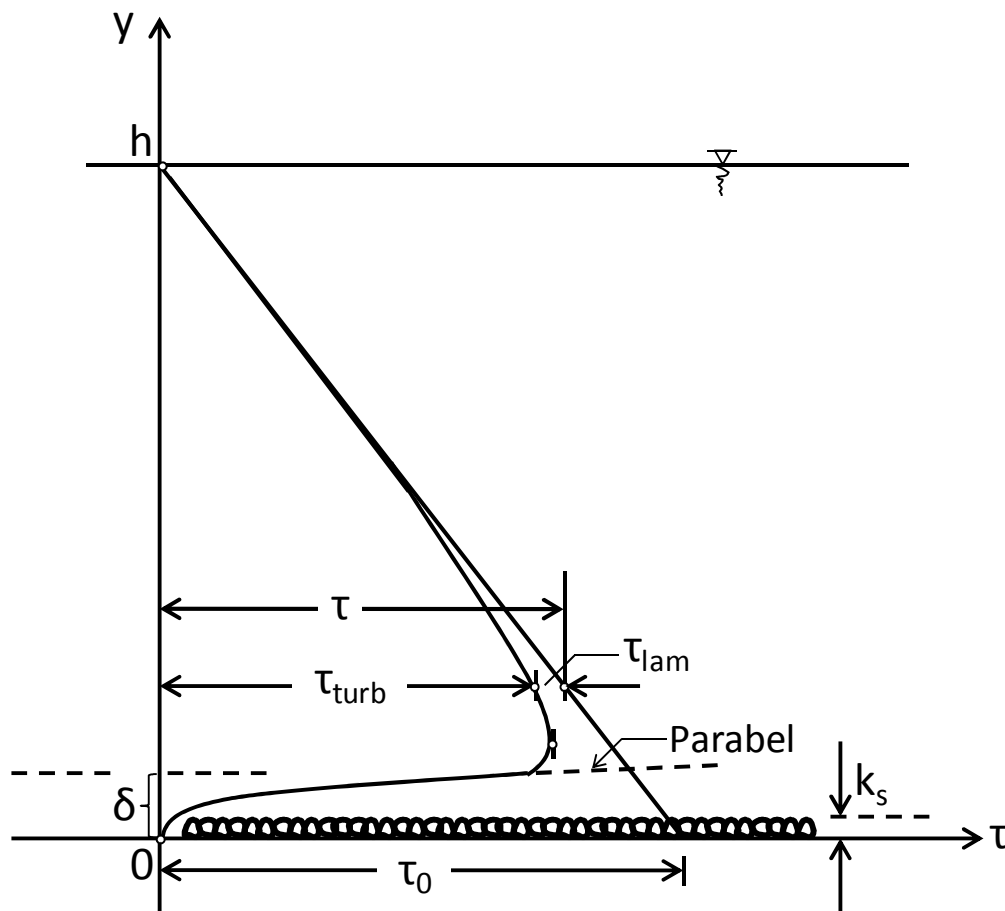


Abbildung 4: Vertikale Schubspannungsverteilung bei Freispiegelabfluss (nach Yalin, 1977)

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 8: 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 8 zeigt eine Auswahl der in der Literatur für Mischwasserkanäle angegebenen Werte, die durch Feldversuche ermittelt wurden.

3.4 Kanalablagerungen

Wie in 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 (Abbildung 5). 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 9).

Abbildung 6 zeigt einen typischen ablagerungsbehafteten Querschnitt durch einen Mischwasserkanal, an dem die Einteilung von Crabtree veranschaulicht wird. Maßgebliche Eigenschaften der unterschiedlichen Kategorien werden in Tabelle 10 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.

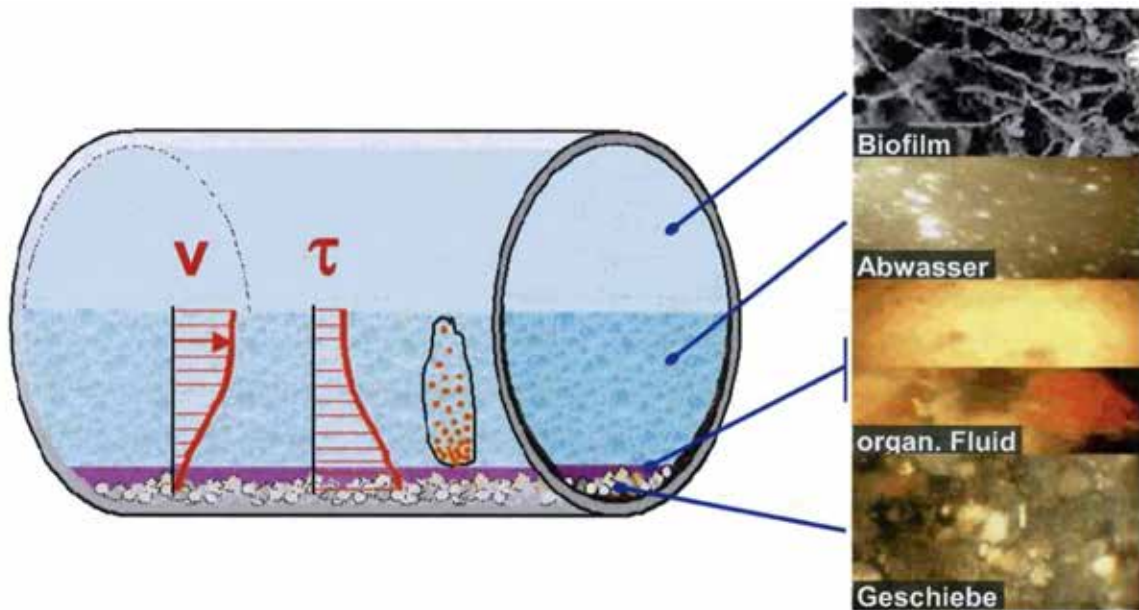


Abbildung 5: Schematisch Schichtung im Abwasserkanal (nach Gebhard, 2009)

Tabelle 9: Klassifizierung von Ablagerungen (nach Crabtree, 1989)

Typ	Beschreibung	Vorkommen
A	grobkörnig, locker, überwiegend mineralisch	Kanalsole
B	wie Typ A, jedoch verfestigt durch Fett, Bitumen, Zement etc.	
C	mobl/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

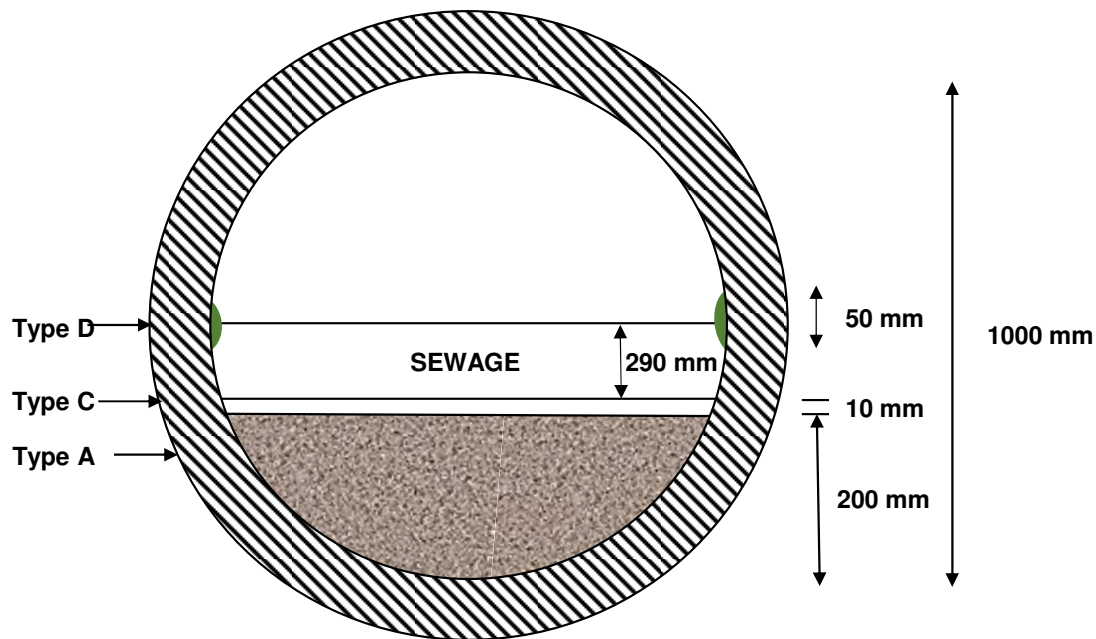


Abbildung 6: Typischer Querschnitt eines mit Ablagerungen behafteten Mischwasserkanals (Crabtree, 1989)

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 10: 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/m ³]		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
BSB ₅	[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
NH ₄ -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).

Abbildung 7 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 größeren 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.

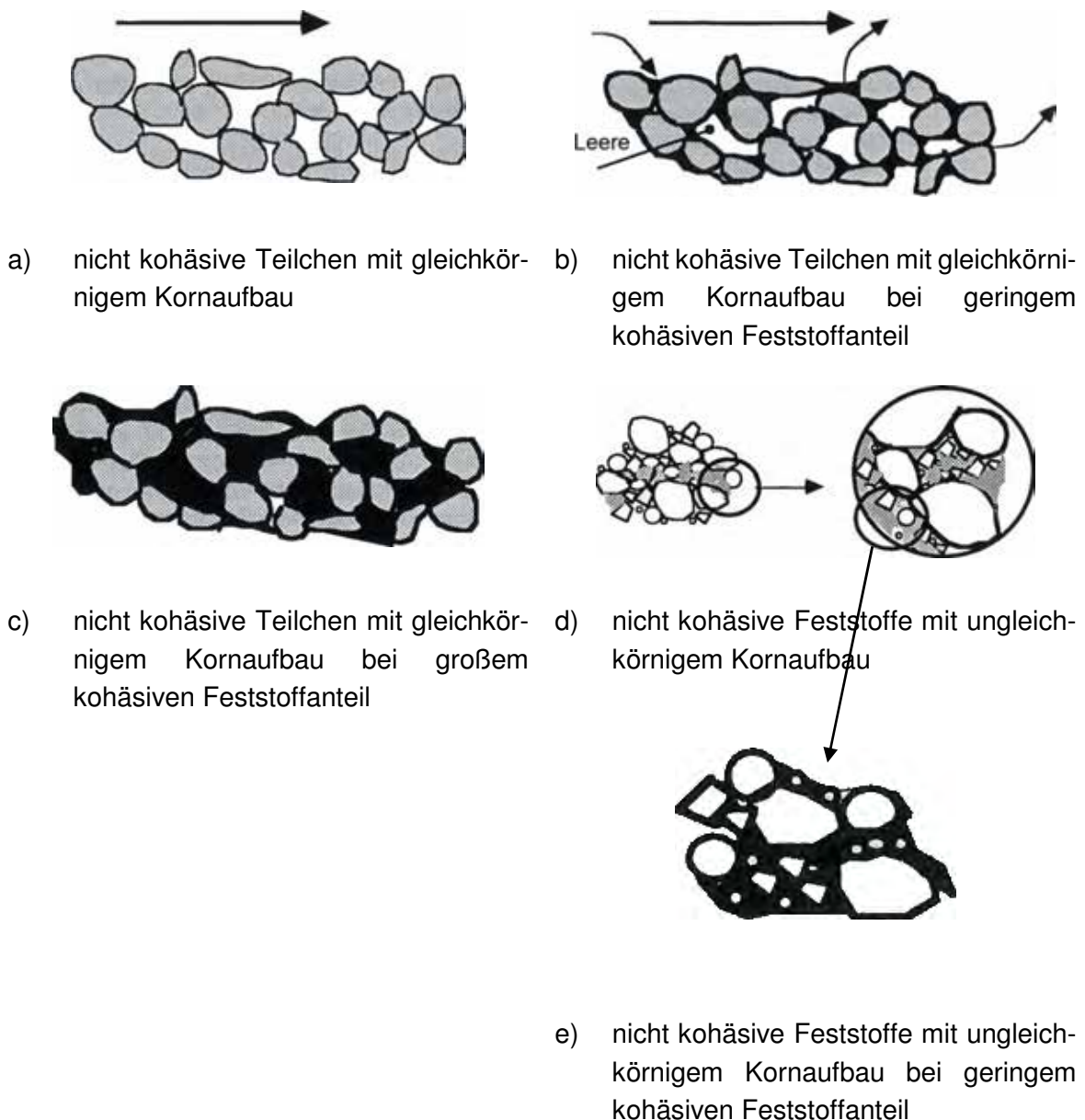


Abbildung 7: Struktur und Verhalten von Feststoffen (nach Artières, 1988)

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 (Abbildung 8).

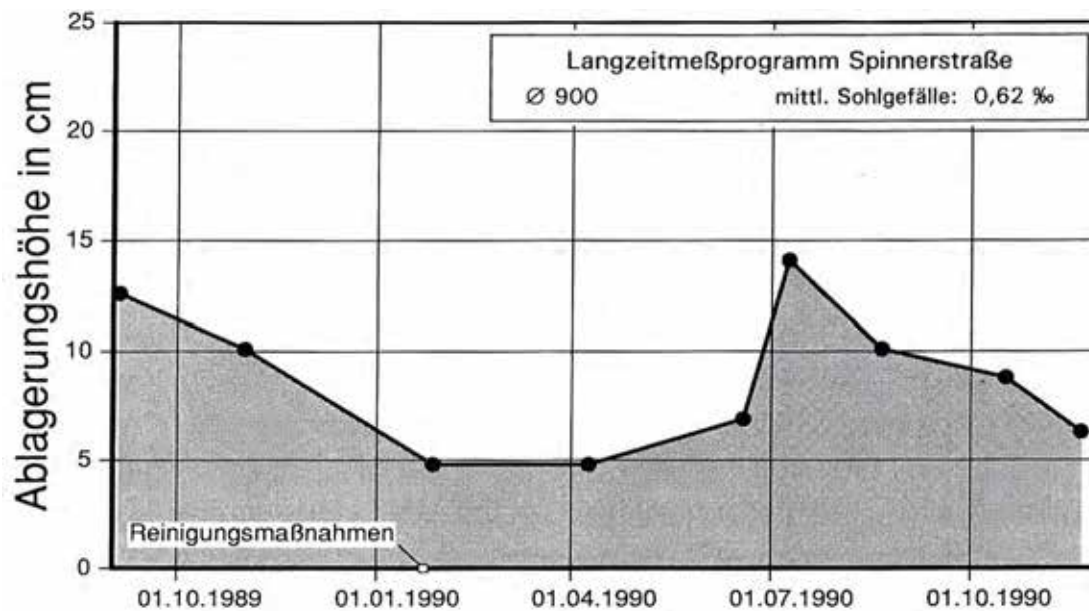


Abbildung 8: Entwicklung der Ablagerungshöhen im Kanalabschnitt Spinnerstraße (Dette et al., 1996)

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 11: 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 Belegung des Rechens Gefahr der Überlastung des Sandfangs	vermehrter Eintrag von Trüb- und Schadstoffen Ablagerungen von Feststoffen / Verschlammung der Gewässersohle
Rückstau Geringere Speicherkapazität des Kanalvolumens	häufigere Entlastungsereignisse	Erhöhter Primärschlammanfall in der Vorklärung Erhöhte Zulauffrachten in der biologischen Stufe	Sauerstoffmangel Eutrophierung
Erhöhung der Rauheit Geruchsbelästigung und Gesundheitsgefährdung durch Gasbildung (H ₂ S, CH ₄ etc.)		Zusammenbruch der biologischen Phosphorelimination Gefahr der Schlamm-ausschwemmung aus der Nachklärung	Veränderung der Lebensgemeinschaften
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 H_2S 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 12). 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/m^3 .

Verbindungen des Schwefelwasserstoffs werden Sulfide genannt, obwohl der Begriff "Sulfid" genau genommen nur das S_2^- -Ion bezeichnet. Im Abwasser kommen folgende Verbindungen vor: gelöster Schwefelwasserstoff H_2S , Hydrogensulfidion HS^- und das eigentliche Sulfid S_2^- .

Tabelle 12: 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 13 voneinander abgegrenzt.

Tabelle 13: 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 gelöster und chemisch gebundener Sauerstoff 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 Sichelhautwachstum 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 (Abbildung 9). 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 Sichelhaut und ggf. der Ablagerungen. Je besser die Sichelhaut ausgebildet ist und je mehr aktive Stellen sich in ihr befinden, desto mehr Fläche ist vorhanden, um Sulfide zu bilden.

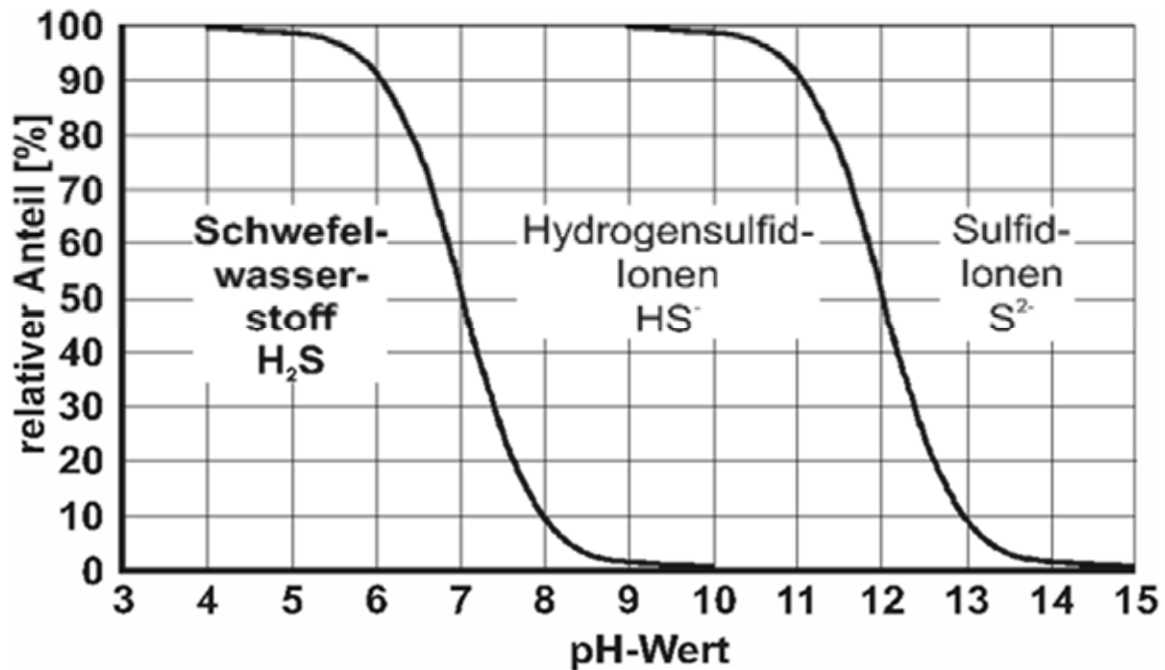


Abbildung 9: Einfluss des pH-Wertes auf das Dissoziationsgleichgewicht von Schwefelwasserstoff bei 20°C (Lohse, 1986)

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 (Abbildung 10).

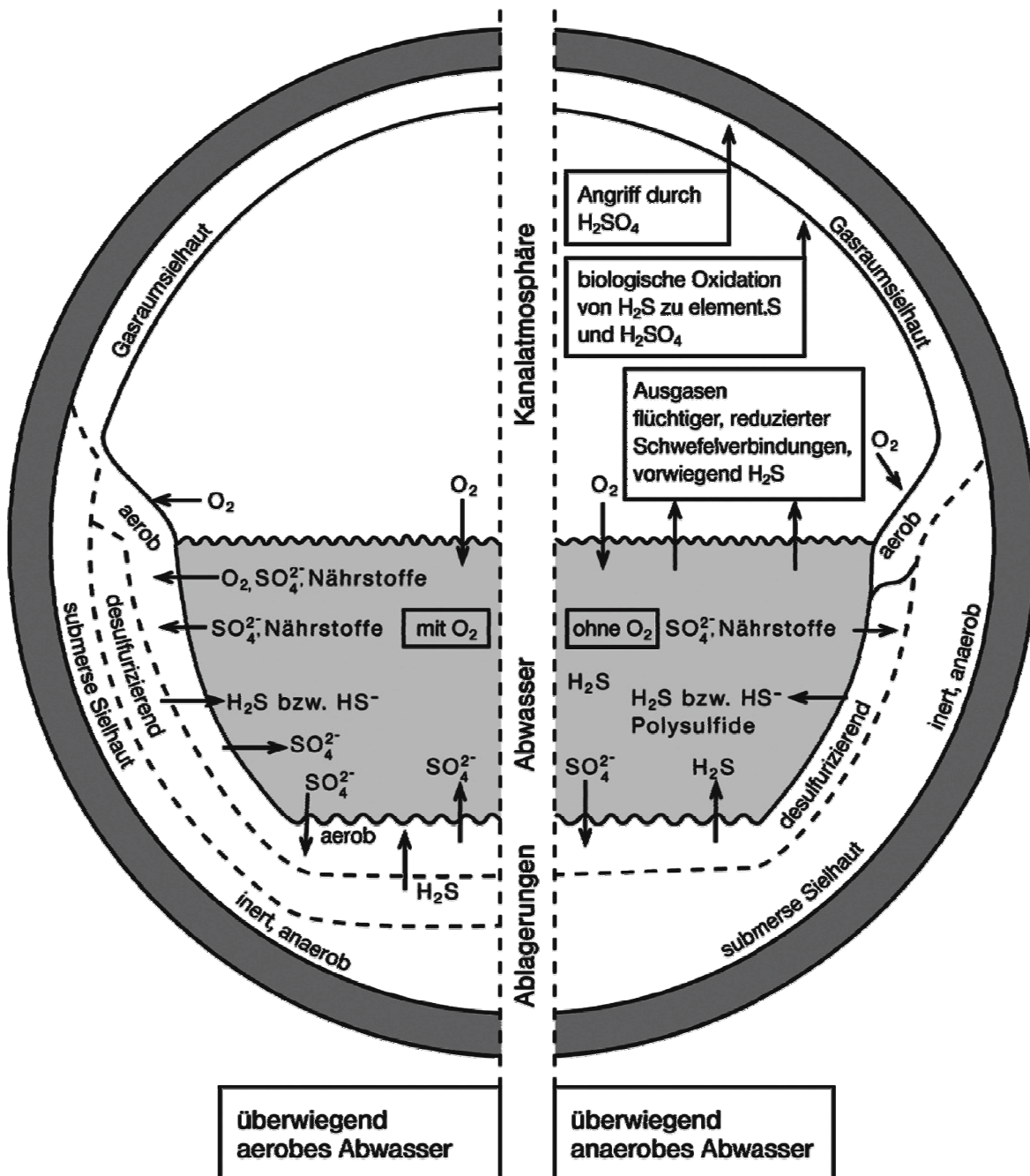


Abbildung 10: Stoffumsatz in Abwasserkanälen (DWA, 2010)

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 (Thistlethwaite, 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 Bakterien-gattungen (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.

3.7 Vorgehensweise und Arbeitsplan

Die Struktur des gesamten Arbeitsprogramms ist in Abbildung 11 dargestellt und umfasst insgesamt 11 Arbeitspakete. Der Schwerpunkt der IKT-Arbeiten lag im Bereich „Ermittlung betrieblicher Synergien“ (AP 7, AP 8, AP 9) sowie der Hotline für Kanalprobleme (AP 4) und der Organisation und Durchführung der Expertenworkshops (AP 5). Das Gesamtprojekt wurde in zwei Phasen bearbeitet. In der ersten Phase wurde im Rahmen der Arbeitspakete 4, 5, 7, 8 eine umfassende Ist-Analyse durchgeführt. Die Erkenntnisse wurden in Expertenworkshops und Betreibergesprächen hinsichtlich ihrer Relevanz und möglicher Verbesserungspotenziale für den Kanalbetrieb validiert. Im Ergebnis lag eine Zusammenstellung der betrieblichen Abläufe, typischer Schwachstellen und möglicher Synergiepotentiale vor. Insbesondere wurden konkrete Maßnahmen zur Einführung einer bedarfsorientierten Kanalreinigung vorgeschlagen sowie Schwerpunkte definiert, deren Umsetzung in Phase II des Projektes bei ausgewählten Netzbetreibern begleitet wurde.

Die Vorgehensweise und sämtliche Ergebnisse sind in den Kapiteln 6 und 7 dargestellt. Als Ergebnis liegt in Kapitel 7 („Materialien für die Förderung des Wechsel zur bedarfsgerechten Kanalreinigung“) insbesondere ein modularer Maßnahmenplan mit

ergänzenden Arbeitshilfen (z.B. Marktübersichten, Protokollvorlagen und ein Störfallkatalog) vor. Dieser kann als Vorlage für die individuelle Umsetzung im Kanalbetrieb dienen. Seine Inhalte basieren auf den in Phase II vertieft untersuchten Zusammenhängen und Fallbeispielen (s. Kapitel 6).

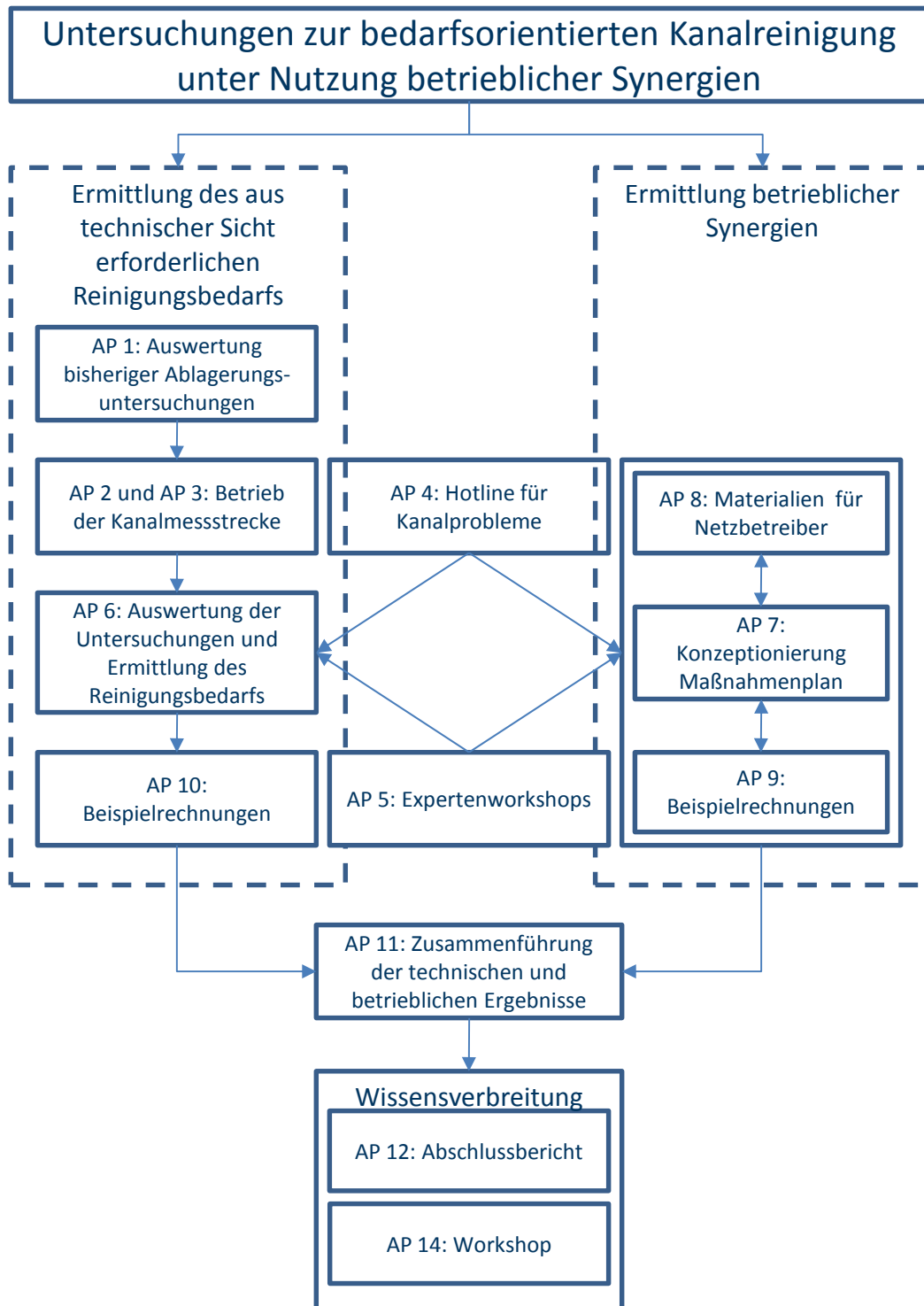


Abbildung 11: Struktur des Arbeitsprogramms

4 Stand der Technik

4.1 Rechtliche und technische Anforderungen

Die EU-Richtlinie 91/271/EWG fordert in Anhang I A, dass bei der „... Unterhaltung der Kanalisation die optimalen technischen Kenntnisse zugrunde zu legen [sind], die keine unverhältnismäßig hohen Kosten verursachen“. Entsprechend unterstreichen auch die novellierten deutschen Wassergesetze – insbesondere WHG §§ 60, 61 – und die damit verbundenen Landesgesetze beziehungsweise –verordnungen (LWG/SüwV/EKVO), dass Betreiber von Abwasseranlagen zu einem Kanalbetrieb nach den allgemein anerkannten Regeln der Technik verpflichtet sind. Damit sind die Betriebsprozesse, insbesondere Inspektion, Reinigung und Reparatur durch fachkundiges Personal nach den geltenden technischen Anforderungen zu planen, umzusetzen und rechtssicher zu dokumentieren. (EU-Richtlinie 91/271/EWG, 1991)

Für die Kanalreinigung werden in Nordrhein-Westfalen (NRW) diese **rechtlichen und technischen Anforderungen** seit dem 01. Januar 1996 in der Selbstüberwachungsverordnung Kanal (SüwV Kan) (Land Nordrhein-Westfalen, 1995) konkretisiert, die am 17. Oktober 2013 durch die Selbstüberwachungsverordnung Abwasser (SüwVO Abw, NRW), abgelöst wurde. (Land Nordrhein-Westfalen, 2013)

Das LWG NRW (Land Nordrhein-Westfalen, 2013) und die SüwVO Abw, (Land Nordrhein-Westfalen, 2013) bzw. SüwV Kan (Land Nordrhein-Westfalen, 1995) stellen folgende maßgebliche Anforderungen an die Netzbetreiber:

- Für Kanalisationsbauwerke sind „Anweisungen über die Durchführung der Selbstüberwachung“ sowie „Betriebsanweisung“ anzufertigen. Entsprechend können Netzbetreiber Umfang und Häufigkeit der Reinigungsarbeiten in Abhängigkeit der „örtlichen Verhältnisse, der wasserwirtschaftlichen Bedeutung der Anlagen und der technischen Schwierigkeiten“ selbst festlegen.
- Eine erstmalige Erfassung des gesamten Netzzustandes durch Kanalfernsehuntersuchung (TV-Inspektion) oder Begehung ist innerhalb von 10 Jahren durchzuführen.
- Nach Abschluss der Ersterfassung hat eine Wiederholungsprüfung des Zustandes alle 15 Jahre am gesamten Kanalnetz (mind. 5 % pro Jahr) zu erfolgen.
- Kanäle sind auf Ablagerungen nach einem Einsatz- bzw. Spülplan zu kontrollieren. Liegt dieser nicht vor, ist mindestens alle zwei Jahre eine optische Kontrolle bzw. Inaugenscheinnahme durchzuführen.
- Über die durchgeführten Maßnahmen sind von den Verantwortlichen (z. B. Einsatzleiter) mindestens vierteljährlich Nachweisberichte gegenzuzeichnen.

Nach dem Runderlass sind Ablagerungen mit einer Höhe von mehr als 15 % der Profilhöhe in den Kanälen nach einem Spülplan zu reinigen. Falls kein Spülplan vorhanden ist, müssen bis DN 1000 innerhalb von drei und Leitungen größer als DN 1000 innerhalb von sechs Monaten gereinigt werden. (Ministerium für Umwelt, Raumordnung und Landwirtschaft NRW, 1995)

Außer an rechtlichen Normen orientieren sich die Behörden und Betreiber auch an technischen Normen des DIN und der DWA. Wichtige technische Normen und Regeln für die Kanalreinigung enthalten u. a. DWA-A 199-1 (DWA-A 199-1, 2011), ATV A 147 (DWA, 2005a) und DIN EN 752 (DIN 2008a).

Für die Kanalreinigung bieten sich unterschiedliche Verfahren an:

- Hochdruckspülverfahren (HD-Spülverfahren),
- Spülverfahren (Schwall- und Stauspülung),
- mechanische Verfahren und
- sonstige Verfahren.

In Deutschland werden ca. 90 % der Leitungen mittels HD-Reinigung gespült (Falk et al. 2000). Detaillierte Informationen zur Leistungsfähigkeit dieser Technik sowie typischen Risiken finden sich in „Kanalreinigung-Düse, Drücke, Hochdruckstrahlen-Endbericht des IKT-Institut für Unterirdische Infrastruktur“ (Bosseler und Schlüter, 2004). Informationen zu den übrigen Reinigungsverfahren finden sich z. B. in „Kanalisierung“ (Jung, 1998).

4.2 Reinigungsstrategien

Um den Sollzustand eines Kanalnetzes wiederherzustellen, lassen sich folgende Reinigungsstrategien benennen (Kaltenhäuser und Illing, 2003):

- Feuerwehrstrategie,
- Präventivstrategie und
- Inspektionsstrategie.

Bei der **Feuerwehrstrategie** wird keine regelmäßige Wartung und Inspektion durchgeführt. Die Reinigung erfolgt erst nach Verstopfung oder einer Überflutung im Kanalnetz durch Noteinsatzgruppen. Durch die fehlende Vorerkundung werden bewusst Störfälle und dadurch entstehende Folgeschäden in Kauf genommen. Eine Sanierung findet nur bei dringendem Handlungsbedarf statt. Die spätere Schadensbehebung ist mit einem sehr hohen Finanz- und Arbeitsaufwand verbunden.

Die Reinigung bei der **Präventivstrategie** erfolgt nach festen, vorgegebenen Intervallen, z. B. einmal im Jahr. Bei dieser Strategie wird der Zustand der Kanalisation nicht

berücksichtigt, d. h., es werden alle Kanäle unabhängig von dem Grad der Ablagerungen bzw. Verschmutzung gereinigt. Die Sanierung der Abwasserkanäle erfolgt nach dem aktuellen Befund. Durch dieses wenig effiziente Vorgehen entstehen unnötige Umweltbelastungen und Mehrkosten für Energie, Wasser, Personal und Maschinen.

Die **Inspektionsstrategie**, auch **bedarfsorientierte Kanalreinigung** genannt, setzt eine regelmäßige Inspektion des Kanalnetzes voraus, wodurch der tatsächliche Reinigungsbedarf ermittelt wird. Die Inspektionen können durch Kanalspiegel, TV-Inspektion (z. B. Kamera) sowie durch Inaugenscheinnahme bei begehbaren Kanälen durchgeführt werden. Eine Reinigung findet ausschließlich nach ausgewerteten Befunden statt, d. h. nur gezielt an den verschmutzten Stellen im Kanalnetz. Durch diese Vorgehensweise wird der Reinigungsaufwand erheblich verringert.

Die Umsetzung einer bedarfsorientierten Kanalreinigung wird durch die Erstellung eines Spülplans unterstützt. Als Grundlage dient die langjährige Inspektion, Analyse und Dokumentation des Netzzustandes. Häufig verschmutzte Netzabschnitte werden regelmäßig gereinigt, die „sauberen“ Kanäle werden erst dann gereinigt, wenn sie einen gewissen Verschmutzungsgrad erreicht haben. Die Inspektion dient nicht nur zur Feststellung der Ablagerungssituation, sondern auch zur Erkennung von Schäden im Kanal, wie z. B. Rissen. Der Einsatz von Schachterkennungssystemen mit den dazugehörigen elektronischen Datenverarbeitungssystemen (EDV-Systemen) kann die Effizienz von Inspektionsmaßnahmen erhöhen.

4.3 Inspektionsmethoden

Die Wahl der eingesetzten Inspektionsmethode ist abhängig von der Zielstellung der Inspektion. In der Regel sind Schäden zu dokumentieren, um einen Sanierungsplan erstellen zu können. Werden Inspektionstechniken zur Erkennung von Ablagerungen genutzt, 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.

4.3.1 TV-Inspektion mittels Fahrwagenkamera

Der Einsatz eines TV-Inspektionskamerawagens wird in der Regel nach einer Kanalreinigung eingesetzt. In der SÜwVO Abwasser NRW wird verlangt, 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. (Land Nordrhein-Westfalen, 2013)

Die nachfolgende Abbildung 12 zeigt die Funktionsweise eines TV-Inspektionskamerawagens.

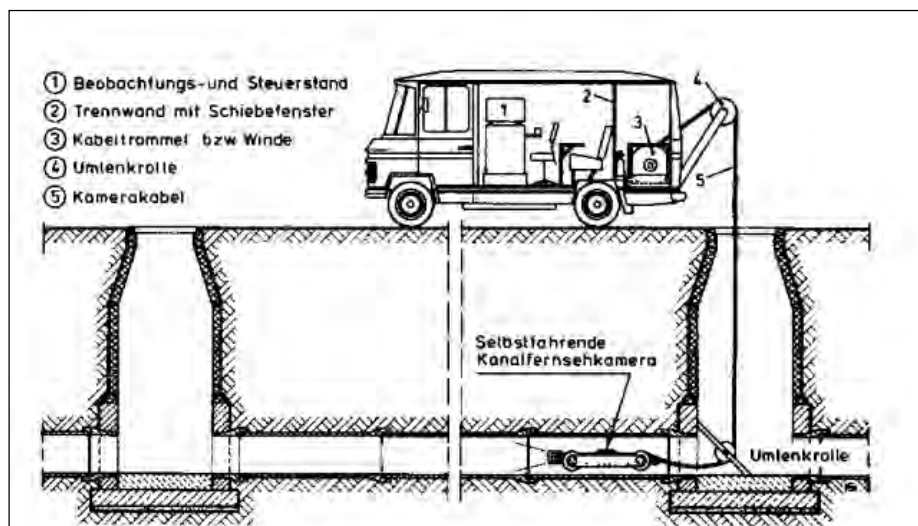


Abbildung 12: Darstellung der TV-Inspektion (Falk et al. 2000)

Die TV-Fahrwagenkamera ist mit einem Kabel an einem Messwagen angeschlossen. Der TV-Wagen wird über den Schacht in die Haltung eingelassen und fährt durch die Haltung. Das ankommende Signal wird am Messwagen empfangen und aufgezeichnet. (Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung, 2011) Abbildung 13 zeigt eine mögliche Ausführungsvariante der TV-Fahrwagenkamera.



Abbildung 13: TV-Inspektionskamerawagen (Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung, 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. (IBAK GmbH, 2011)

4.3.2 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 (siehe Abbildung 14). Ein Schachteinstieg ist bei Verwendung eines solchen Systems nicht notwendig. Über einen angeschlossenen Monitor können Bilder gemacht und Videos aufgenommen werden, die direkt vor Ort zu sehen sind, aber auch für spätere Auswertungen genutzt werden können. Erfahrungswerte aus der Praxis zeigen, dass je nach verwendetem Kamerasystem Sichtweiten von 20 m bis hin zu 80 m möglich sind. Die Anschaffungspreise bewegen sich je nach Hersteller und Ausstattungsvariante in einem Bereich zwischen ca. 8 500 € und 25 000 €. (IBAK GmbH, 2011)



Abbildung 14: Schachtkamerasystem mit mobilem Bedienteil; Beispiel (Volprecht, 2006)

Die aktuelle Marktübersicht „Schachtkameras“ (Tabelle 14: Marktübersicht Schachtkameras) ist das Ergebnis einer Marktanalyse, die im Rahmen der hier dargestellten Untersuchungen durchgeführt wurde. Die Marktanalyse bildet den aktuellen Stand der Technik, auf Grundlage einer umfangreichen Betreiber- und Herstellerbefragung, ab. Dabei konnten die vier am häufigsten verwendeten Kamerasysteme identifiziert werden. Weitere am Markt erhältlich Systeme sind hier aufgrund der Anwenderzahlen nicht mit aufgeführt.

Praxiserfahrungen zeigen, dass Tagesleistungen von 40 – 80 Kanalhaltungen/d, entsprechend etwa 1500 m – 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. (Envirosight LCC, 2014)

Tabelle 14: Marktübersicht Schachtkameras

Herstellerfirma	Ritec **	Envirosight (Gullyver, IPEK) **	JT-elektronik **	Messen Nord **
Produkt	Schachtkamera	QuickView Schachtkamera	FastPicture Schachtkamera	Schacht-Zoom Kamera
Logo				
Schachtkamera				
Steuer- und Bedieneinheit				
Kanaldurchmesser	DN 100 - DN 1000	DN 100 - DN 1500	DN 150 - DN 2000	DN 200 - DN 800
Sichtweite	15 m - 45 m	15 m - 100 m	15 m - 100 m	25 m - 50 m
Grundausrüstung	<ul style="list-style-type: none"> • Kameraeinheit mit Beleuchtung • Teleskopstange • Bedienelement zur Kamera- und Lampensteuerung • Stromzufuhr über Kabeltrommel • Aufnahme- und Beobachtungseinheit 	<ul style="list-style-type: none"> • statische Kameraeinheit mit Beleuchtung • Teleskopstange • Steuereinheit • Multimediagerät zur Beobachtung und Videoaufnahme • Tragweise mit Akku integriert • Akkuladegerät • 12 m Kabel 	<ul style="list-style-type: none"> • Kameraeinheit mit Beleuchtung • Teleskopstange • Steuereinheit • Aufnahme- und Beobachtungseinheit 	<ul style="list-style-type: none"> • Kameraeinheit mit Beleuchtung • Teleskopstange • Bedieneinheit • USB-Kabel, SD-Card zur Bild-/Videospeicherung
Teleskopstange	<ul style="list-style-type: none"> • 2 m bis 7 m Tiefe • 10 m Kamerakabel • nach oben verlängerbar, frei justierbar mit Schnellspanner • Höheneinstellstange mit Schnellspanner 	<ul style="list-style-type: none"> • bis 9 m Tiefe • stabiles Kabel • nach oben verlängerbar • Höheneinstellstange mit Schnellspanner 	<ul style="list-style-type: none"> • 1,80 m bis 8,40 m Tiefe • stabiles Kabel (10 m) • nach oben verlängerbar • Höheneinstellstange durch Klammersystem inklusive 2x Kabelführungsschleife 	<ul style="list-style-type: none"> • bis 8 m Tiefe • stabiles Kabel • Kabellänge Kameraeinheit 10 m • Koppelstangenset bis 16 m Tiefe • Höheneinstellstange
Kameraeinheit	<ul style="list-style-type: none"> • 432x Zoom (36x optisch und 12x digital) • Lichtempfindlichkeit 1,4 Lux • Kamerahalterung • Fokus: manuell und automatisch • mit EX-Schutz nachrüstbar 	<ul style="list-style-type: none"> • 432x Zoom (36x optisch, 12x digital) • Lichtempfindlichkeit 1,4 lux • Fokus: automatisch / manuell / makro • EX-Schutz 	<ul style="list-style-type: none"> • 360x Zoom (30x optisch und 12x digital) • Lichtempfindlichkeit 0,35 lux • elektrische Köpfeinrichtung mit Zylinderleuchtung • Fokus: manuell und automatisch • kein Ex-Schutz 	<ul style="list-style-type: none"> • 270x Zoom (22x optischer, 4x digitaler Zoom) • Lichtempfindlichkeit 0,85 lux • Kamera manuell 360° drehbar, 90° abschwenkbar • Fokus: manuell und automatisch • kein Ex-Schutz
Bedieneinheit	<ul style="list-style-type: none"> • Steuerung für den Betrieb zum Umhängen • integrierter TFT-Monitor 5,6" • Ansteuerung für Fokus, Zoom, Autoblende und Beleuchtung • Video OUT (BNC) für externen Monitor oder Aufzeichnungsgerät • Lichtschutztube • SD-Speicherkartenslot 	<ul style="list-style-type: none"> • Zoom / Fokus-Joystick • Erfassungssoftware DWA 143/149 • Fotos und Videospeicherkarte CF-Karte • Schnittstellen USB, LAN • SD-Speicherkartenslot 	<ul style="list-style-type: none"> • Monitorbox integriert in Schutzkoffer • Monitor 10" HD-LCD • Aufzeichnung mit optionalem Digitalrecorder • eingebautes Steuermodul für Kamerafunktionen • separate Fernbedienung für Kamerafunktionen • eingebauter Full-HD-Recorder • SD-Speicherkartenslot 	<ul style="list-style-type: none"> • Standard-Bedieneinheit mit Nacken-Tragegurt • Integrierter, tageseitlauglicher TFT-Monitor 6,4" • Kamerasteuerung über Joystick • Schnittstellen USB, WLAN, Video • Standard-Videoausgang BNC für externe Recorder • SD-Speicherkartenslot
Möglichkeiten der Stromversorgung	<ul style="list-style-type: none"> • Netzteil mit 10 m Stromversorgungskabel • Powerkabel (Auto Zigarettenanzünder) 10 m oder 20 m 	<ul style="list-style-type: none"> • Akkubetrieb 3 Stunden möglich • Adapter für Zigarettenanzünder mit 6 m Kabel 	<ul style="list-style-type: none"> • Akkubetrieb oder Netzbetrieb • Netzteil und Ladegerät integriert • Akkubetrieb 1,5 Stunden 	<ul style="list-style-type: none"> • Akkubetrieb oder Netzbetrieb • Netzteil • Akkubetrieb 4 Stunden
Zubehör/Sonderausstattung	<ul style="list-style-type: none"> • Transportkoffer • Text-Generator 	<ul style="list-style-type: none"> • Transportkoffer • Digitaler Recorder / Viewer • Optionale Weitwinkel Kamera • Zentrierhilfe für hochliegende Abweiger in den Schacht • Längenerweiterung Teleskop • Funk-Videoübertragung • Beleuchtung für Rohre mit großem Durchmesser • Anlagenüberwachungssoftware 	<ul style="list-style-type: none"> • Transportkoffer • Erweiterung von Monitorbox mit digitaler Texteinblendung • inklusive eingebaute Tastatur • Befestigungssatz für Stangenmontage, • Schultergurt, Stativ, Teleskopisch auf Anfrage • Wechselakku inklusive Ladestation • Zigarettenanzünder 	<ul style="list-style-type: none"> • Rucksack mit Akkuversorgung • Stativ mit Rotationsaufnahme • Kabeltrommel 50 m • 12V DC (Kfz) – Adapter • Sonnenschutzblende • Schachtspektationssoftware entspr. DIN EN 13508-2
Kosten für Standardpaket	ca. 9.600 €	ca. 9.750 €	ca. 12.500 €	ca. 8.500 €

** = www.ritec-tv.de/cms/upload/produkte/schachtkameras/Schachtkamera_Deutsch.pdf
 ** = www.gullyver.de/de/kameras/sondersysteme/quickview/quickview und www.ipek.at/fileadmin/FILES/downloads/brochures/ipek_quickview_web_de.pdf
 ** = JT-Journal Seite 19 "FastPicture" und zugesandte Unterlagen des JT-elektronik Mitarbeiters Tobias Jöckel
 ** = <http://www.messen-nord.de/fileadmin/Media/PDF/Inspektionskameras.pdf> und http://www.messen-nord.de/fileadmin/Media/PDF/Kurzdokumente_STV.pdf

4.3.3 Kanalspiegelung

Die älteste und kostengünstigste 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. In Abbildung 15 ist der schematische Aufbau der Kanalspiegelung unter Zuhilfenahme einer Lichtquelle im Endschacht dargestellt. Abbildung 16 zeigt eine alternative Vorgehensweise, bei der die Lichtquelle direkt über den Spiegel gehalten wird.

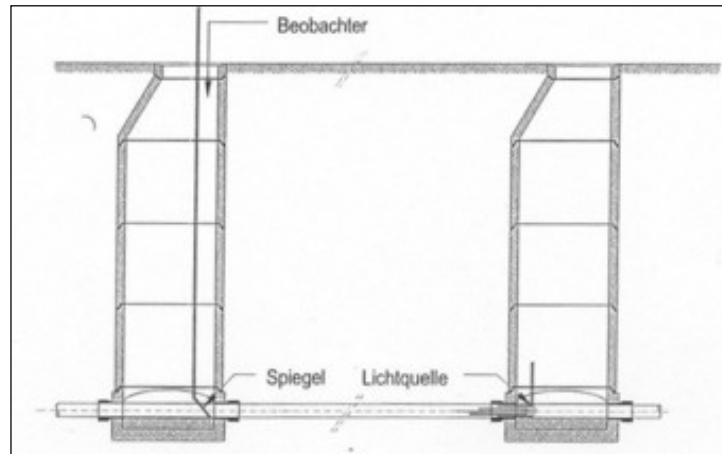


Abbildung 15: Schematische Darstellung der Kanalspiegelung (Orth et al. 2008)



Abbildung 16: Kanalspiegelung mit Lichtquelle am Beobachterschacht

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 (AöR Lünen, 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 bis 80 Haltungen (ca. 1500 m – 3000 m), inklusive Schmutzfängerleerung, erreicht werden. (Orth et al., 2008)

4.3.4 Begehung

Ab einer Mindesthöhe von 1200 mm (DN 1200) kann ein Kanal mittels Begehung inspiziert werden (DWA-A 147, 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 DWA M 197 (Türk, 2007) als Sonderreinigung beschrieben und von der flächendeckenden Unterhaltungsreinigung abgegrenzt sind.

4.3.5 Inaugenscheinnahme des Schachtgerinnes

Durch eine Inaugenscheinnahme des Schachtgerinnes erhält man Informationen über den Zustand des Schachtes, wie den Verschmutzungsgrad und ob die Steigeisen und der Schmutzfänger vorhanden sowie in Ordnung sind. Die Prüfung der Schachtbauwerke gehört zu den Aufgaben, die von der SÜwVO Abw 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 schließen. In Abbildung 17 ist die Sicht einer Inaugenscheinnahme eines Schachtgerinnes dargestellt.



Abbildung 17: Inaugenscheinnahme des Schachtgerinnes (Begleitung der Kanalreinigungsarbeiten der TBV, 2014; Begleitung der Kanalreinigungsarbeiten der Stadt Gladbeck, 2014)

Mit der Inaugenscheinnahme des Schachtgerinnes können Tagesleistungen von 50 bis 90 Schächte (1500 m – 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)

4.3.6 Sehende Düsen

Die sehenden Düsen sind Kanalreinigungsdüsen, auf deren Grundkörper eine TV-Kamera installiert ist (Abbildung 18, Abbildung 19).



Abbildung 18: Sehende Düse (KEG, 2014)



Abbildung 19: Sehende Nordseedüse (P&W, 2014)

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. Der Einsatz der sehenden Düse bietet sich je nach eingesetztem System ab einer Nennweite von DN 100 an (KEG, 2014).

4.4 Hochdruckspülverfahren

4.4.1 Verfahrensablauf

Das **Hochdruckspülverfahren** wird sowohl zur Beseitigung von Ablagerungen im Rahmen der regelmäßigen Wartung als auch für die Reinigung als vorbereitende Maßnahme einer Kanalinspektion oder Sanierung eingesetzt (AöR Lünen, 2007). Die gesamte Gerätetechnik ist auf einem Fahrzeug installiert und besteht im Wesentlichen aus einem Wassertank, einer Hochdruckpumpe, einem HD-Spülschlauch, einem Saugschlauch sowie unterschiedlichen Reinigungsdüsen (Schlüter, 2004). Die Reinigung mittels HD-Spülverfahren erfolgt i. d. R. haltungsweise und in Wasserfließrichtung. Das Spülwasser für die Reinigung wird von einer Hochdruckpumpe aus einem Wassertank mittels Schlauch gepumpt, an dessen Ende eine Reinigungsdüse installiert ist. Der Vortrieb der Düse erfolgt durch Impulsänderung bzw. -erhaltung bei Umleitung und Austritt des durch die Hochdruckpumpe zugeführten Wassers. Die Düseneinsätze bündeln die mit hoher Geschwindigkeit austretenden Wasserstrahlen und richten sie auf die Rohrwand.

Mithilfe der Hochdruckwasserstrahlkraft, die radial und axial zur Rohrwandung wirkt, wird die Düse mit dem Schlauch im ersten Arbeitsschritt gegen die Wasserfließrichtung vom Startschacht zum Zielschacht befördert. Die Verunreinigungen werden durch den hohen Wasserdruck abgelöst und weggeschwemmt. Der eigentliche Reinigungsvorgang erfolgt beim zweiten Arbeitsschritt (vgl. Abbildung 20). Durch das langsame Zurückziehen der Düse in Fließrichtung des Abwassers wird mittels der austretenden Wasserstrahlen die Fließgeschwindigkeit erhöht. Die im ersten Arbeitsschritt nicht gelösten aber aufgelockerten Ablagerungen werden somit endgültig entfernt und zum Startschacht als Suspension transportiert. Dort wird das Spülwasser mit den Ablagerungen mittels Vakuum in den Schlammbehälter eines Reinigungsfahrzeuges gesaugt. Der gesammelte Schlamm wird nach Abschluss der Arbeiten entwässert und entsorgt. Abbildung 20 zeigt den Ablauf vom HD-Spülverfahren bei der Kanalreinigung.

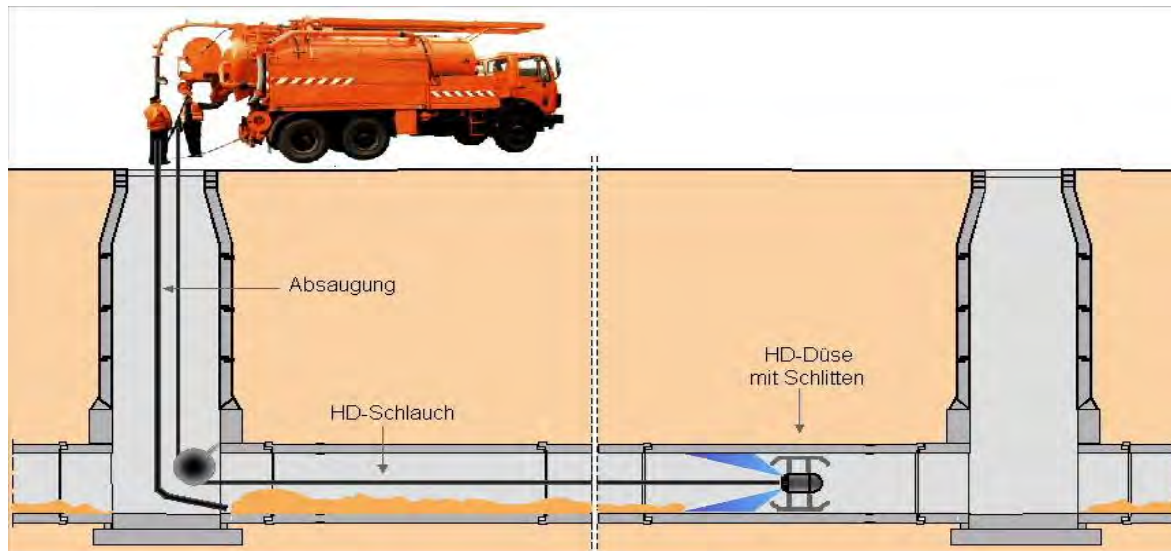


Abbildung 20: Schematische Darstellung zum HD-Spülverfahren (Schlüter, 2004).

Beim HD-Spülverfahren hängt die Auswahl einer geeigneten Kombination der einzelnen Komponenten, wie z. B. Düse und Schlauch, von der Reinigungsaufgabe und -strategie ab. Maßgebend für die Anzahl der Reinigungsdurchgänge, Art der Düse sowie die Ziehgeschwindigkeit des Schlauches ist i. d. R. der Verschmutzungsgrad. Einer effizienten Kanalreinigung liegt daher immer der zielgerichtete und sichere Einsatz der Technik zugrunde.

Einige grundlegende physikalische bzw. technische Zusammenhänge bei der Kanalreinigung mit dem Hochdruckspülverfahren sind nachfolgend dargestellt. Diese betreffen:

- Druck und Durchfluss (Abschnitt 4.4.2),
- Spülstrahlleistungsdichte (Abschnitt 4.4.3) und
- Saugleistung der Vakuumpumpe (Abschnitt 4.4.4).

Weiterhin wird die Thematik der Lärmemissionen (Abschnitt 4.4.5) während der Reinigung behandelt.

4.4.2 Druck und Durchfluss

In hydraulischen Berechnungen für die Ermittlung der optimalen Reinigungsleistung ist der Druck p , als Quotient aus Kraft und Fläche, ein besonders entscheidender Parameter:

$$\text{Druck } p = \frac{\text{Kraft } F}{\text{Fläche } A}$$

Druck ist eine skalare Größe, was bedeutet, dass er in einem Punkt eines Fluids nach allen Richtungen gleich groß ist. Die SI-Einheit des Druckes ist Pascal mit dem Einheitenzeichen Pa. Dabei entspricht ein Pascal einem Druck von einem Newton pro Quadratmeter:

$$1 \text{ Pa} = 1 \frac{\text{N}}{\text{m}^2} = 1 \frac{\text{kg}}{\text{m} \times \text{s}^2}$$

Für höhere Drücke wird die SI-konforme Einheit Bar verwendet, 1 bar entspricht dabei 100.000 Pa. (Bollrich, 2007) Der Prüfparameter Druck wird bei der Leistungsüberprüfung von Hochdruckspül- und Saugfahrzeugen aufgrund der auftretenden hohen Drücke in Bar angegeben. Um eine ordnungsgemäße und effiziente Reinigung zu gewährleisten, empfiehlt das ATV-DVWK-Merkblatt 197 einen Druck von 80 bis 100 bar an der Reinigungsdüse. Dementsprechend hohe Drücke sind notwendig, um Ablagerungen von der Kanalwandung erfolgreich zu entfernen. Nach (Schlüter, 2005) lassen sich alle planmäßigen Reinigungsaufgaben eines Kanalbetriebs mit Drücken unterhalb von 120 bar erfolgreich umsetzen.

Die am Fahrzeug installierten Hochdruckpumpen (Plungerpumpen oder hydraulisch betriebene Druckumsetzer) erzeugen durch Wasserverdrängung einen Druck, der über den Hochdruckspülschlauch zur Reinigungsdüse geleitet wird (Wielenberg, 1996). Auf diesem Weg kommt es an unterschiedlichen Stellen im System zu Druckverlusten. Die auftretenden Druckverluste am Fahrzeug, im Hochdruckspülschlauch und in der Düse zu kennen, ist für den effizienten Einsatz der Technik so den Reinigungserfolg besonders wichtig. Durch geeignete Spülschläuche, Düse sowie insbesondere Düseneinsätze kann die erreichbare Wasserdruckkraft, die zur Reinigung zur Verfügung steht, gesteigert werden. Bei gleicher Pumpenleistung kann so eine effektivere und schonendere Reinigung des Kanals bzw. eine Kosteneinsparung durch geringere Pumpenantriebsleistungen bei gleichbleibender Reinigungsleistung erzielt werden (Wielenberg, 1996).

Problematisch ist allerdings, dass zwar der Druck der HD-Pumpe am Fahrzeug eingestellt werden kann, jedoch der Druck an der Düse für das Betriebspersonal unbekannt bleibt. Durch eine Vielzahl von Armaturen und Formstücken, die sich in der Leitung zwischen Ausgang HD-Pumpe und Eingang HD-Schlauch befinden sowie durch kurze Leitungslängen lassen sich Druckverluste im System nicht oder nur überschlägig berechnen. Erschwerend kommt hinzu, dass die eingesetzten Verbindungs- und Leitungsstücke sich von Fahrzeug zu Fahrzeug unterscheiden können.

Schätzungen gehen von ca. 5% Druckverlust am Fahrzeug aus. Diese Druckverluste zwischen HD-Pumpe und Spülschlauch können durch den Einsatz von Schläuchen mit Nennweiten von DN 32 bis DN 40 verringert werden. Sie fangen durch das Fahrzeug

verursachte Vibrationen auf und halten durch ihre große Nennweite die Verluste gering. Aufgrund der kurzen Leitungslängen am Fahrzeug wirkt sich jedoch eine Reduzierung der Druckverluste nur minimal aus. (Wielenberg, 1996)

Ein großer Teil der auftretenden Druckverluste bei der HD-Reinigung tritt im Spülschlauch auf. Dabei kann aufgrund der hohen Strömungsgeschwindigkeit im Schlauch von turbulenten Strömungsverhältnissen ausgegangen werden. Neben den druckinduzierten axial gerichteten Transportbewegungen kommt es zu Querbewegungen des Fluids, was zu einer fortwährenden Verwirbelung der Transportvorgänge führt. Damit ergeben sich neben schubspannungsbedingten Reibungsverlusten an der Schlauchinnenwand auch Mischungsverluste im turbulenten Strömungsbereich. In Abbildung 21 erkennt man das wesentlich flachere Geschwindigkeitsprofil einer turbulenten im Vergleich zu einer laminaren Strömung.

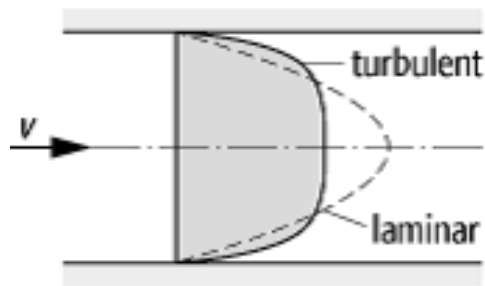


Abbildung 21: Geschwindigkeitsprofil laminarer und turbulenter Strömungen (Wielenberg, 1996)

Die auftretenden Druckverluste Δp bei turbulenten Strömungsverhältnissen lassen sich nach untenstehender Gleichung bestimmen.

$$\Delta p = \lambda \times \frac{l}{d} \times \frac{\rho}{2} \times v_m^2$$

oder

$$\Delta p = g \times \rho \times h_v$$

$$\text{mit } h_v = \lambda \times \frac{l}{d} \times \frac{v_m^2}{2 \times g}$$

Δp = Druckverluste in [N/mm²]

g = Erdbeschleunigung in [m/s²]

h_v = Reibungsverlusthöhe in [m]

l = Länge in [m]

d = Innendurchmesser in [m]

v_m = mittlere Durchflussgeschwindigkeit in [m/s]

λ = Rohrreibungszahl

ρ = Wasserdichte in [kg/m³]

Es wird deutlich, dass sich die Länge des Schlauches proportional auf die Höhe der Druckverluste auswirkt. Der Schlauchdurchmesser steht in einem umgekehrt proportionalen Verhältnis zu Δp . Den größten Einfluss auf Δp hat die Strömungsgeschwindigkeit, da sie zum Quadrat in die Berechnungen einfließt. Schließlich beschreibt die Rohrreibungszahl materialabhängige Verluste, die sich aus Reynoldszahl und relativer Wandrauhigkeit ergeben. Diese Art der Berechnung der Druckverluste ist für den praktischen Einsatz nicht zielführend. In der Praxis arbeitet man daher mit Druckverlustdiagrammen, die von den Herstellern bereitgestellt werden (Abbildung 22). Darin werden Druckverluste in Abhängigkeit vom Förderstrom der Pumpe für verschiedene Nennweiten angegeben. Damit lassen sich die pro Schlauchmeter auftretenden Druckverluste auf etwa 0,3 bis 0,4 bar abschätzen (Wielenberg, 1996).

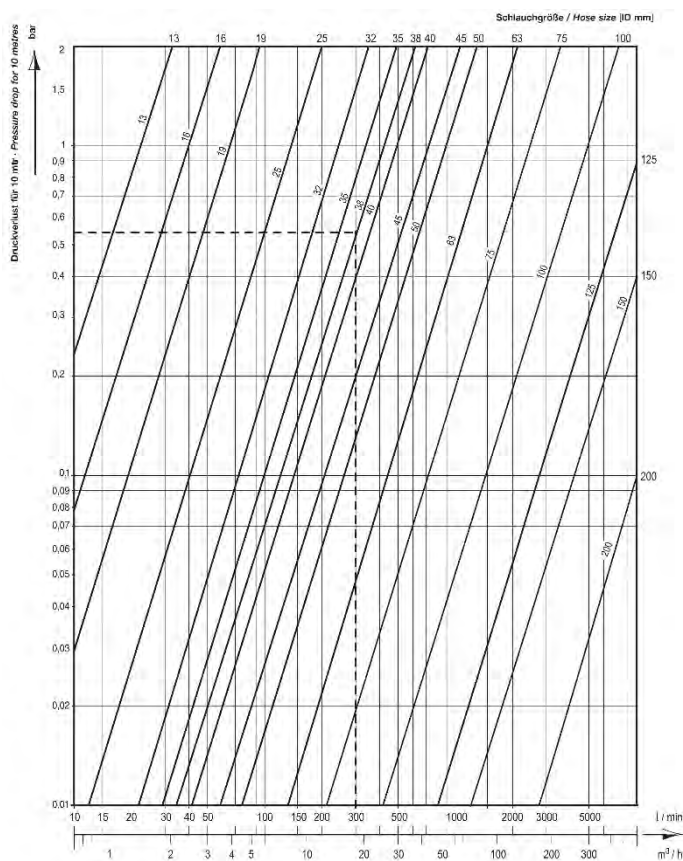


Abbildung 22: Druckverlustdiagramm, Beispiel, aus (Firmeninformationen ELAFLEX, 2014)

Ein Großteil der im Gesamtsystem auftretenden Druckverluste tritt beim Durchströmen des Düsenkörpers und der Düseneinsätze auf. Je nach Bauart der Düse (Form- und Innenwandgestaltung) entstehen unterschiedlich große Verluste. Die Strömungsverhältnisse innerhalb des Düsenkörpers sind für örtlich konzentrierte, hydraulische Verluste verantwortlich und damit maßgeblich für den Gesamtdruckverlust. Die wesentlichen örtlich konzentrierten, hydraulischen Druckverluste sind:

- Einlaufverluste,

- Verluste bei Querschnittsänderung,
- Verluste bei Richtungsänderung,
- Verzweigungsverluste und
- Austrittsverluste.

Diese Druckverluste entstehen an sogenannten Unstetigkeitsstellen, an denen das strömende Wasser in eine rückwärts gerichtete und/oder rotierende Bewegung versetzt wird. Dadurch wird der Hauptstrom eingeeengt, beschleunigt und stößt anschließend hinter der Unstetigkeitsstelle in langsamer fließende Wassermassen. Aufgrund der komplexen Kombination der Einzelverluste sowie der zustandsabhängigen Komponenten, wie beispielsweise der Zustand der Düseneinsätze, können die Gesamtverluste in einer Düse nur mit Hilfe komplexer Berechnungen (FEM) ermittelt werden. Eine praxisorientierte Möglichkeit ist die experimentelle Ermittlung (vgl. Abschnitt 6.5).

Ein wesentlicher Parameter, der die Reinigungsleistung maßgeblich beeinflusst, ist der Förderstrom der HD-Pumpe. Dieser wird in Liter pro Minute angegeben und als Durchfluss Q bezeichnet.

$$\text{Durchfluss } Q = \frac{\text{Wasservolumen}}{\text{Zeiteinheit}}$$

Mit größer werdender Durchflussleistung bzw. Förderstrommenge können immer mehr bei der Kanalreinigung gelöste Ablagerungen transportiert werden. Der maximale Förderstrom einer HD-Pumpe hängt von der Anzahl und dem Durchmesser der Plunger, sowie den Kurbelwellenumdrehungen pro Zeiteinheit, also der Hubzahl, ab. Daraus resultiert ein idealisiert linearer Zusammenhang zwischen Förderstrom und Pumpendrehzahl. Mit Hilfe eines Drehzahlmessers an der Pumpe kann somit der gewünschte Förderstrom bestimmt werden (Wielenberg, 1996).

4.4.3 Spülstrahlleistungsdichte

In Anlehnung an DIN 19523:2008-8 wird bei der Leistungsüberprüfung von Hochdruckspül- und Saugfahrzeuge die Spülstrahlleistungsdichte D_j ermittelt. Die DIN beinhaltet Anforderungen und Prüfverfahren zur Ermittlung der Hochdruckstrahlbeständigkeit und -spülfestigkeit von Rohrleitungsteilen für Abwasserleitungen und -kanäle. Demnach soll die Praxisprüfung die Belastungen bei der Hochdruckreinigung simulieren. Diese werden durch die Hochdruckwasserstrahlen in Kombination mit den mechanischen Belastungen, die durch Spülkopf und -schlauch verursacht werden, hervorgerufen. Die Spülstrahlleistungsdichte berechnet und beschreibt damit die Belastungen an der Materialoberfläche, die aus dem auftreffenden Spülstrahl resultieren. Damit ist sie maßgeblicher Bewertungsfaktor für die hydraulische Belastung und stellt

somit einen Prüfparameter für die Leistungsüberprüfung von Hochdruckspül- und –saugfahrzeugen dar (vgl. Abschnitt 6.5.3).

Die Berechnung der Spülstrahlleistungsdichte D_j erfolgt anhand folgender Formel nach DIN 19523:

$$D_j = 44,72 \times c_d^3 \times p^{3/2} \times \sin \alpha$$

mit: c_d = Beiwert für den Durchfluss des Spülkopfes

$$c_d = 0,474 \frac{Q}{d^2 \times p^{1/2}}$$

mit:

Q = Durchfluss [l/min]

d = lichter Durchmesser der Düseneinsätze [mm]

α = Auftreffwinkel des Spülstrahls [°]

p = Düsendruck [MPa]

Für eine erfolgreiche Prüfung sollte der Durchfluss Q zwischen 280 l/min bis 285 l/min, der lichte Düsendurchmesser d bei 2,60 +/- 0,02 mm, der Auftreffwinkel α bei 30° +/- 1° liegen. Gemäß DIN 19523 soll bei der Praxisprüfung ein Grenzwert für die Spülstrahlleistungsdichte von 330 +/- 15 W/mm² nicht überschritten werden. Der rechnerische c_d -Wert darf während des Versuchs 0,7 nicht unterschreiten. DIN 19523

Für die Leistungsüberprüfung von HD-Spülfahrzeugen (vgl. Abschnitt 6.5.3) werden die fahrzeugbezogenen Werte von Durchfluss, Durchmesser und Auftreffwinkel auf die Formel zur Berechnung der Spülstrahlleistungsdichte übertragen.

4.4.4 Saugleistung Vakuum

Als Vakuum bzw. Unterdruck bezeichnet man Drücke, die niedriger als der Umgebungsluftdruck sind. Im technischen Bereich wird der Begriff „Prozent- Vakuum“ verwendet. Der atmosphärische Druck auf Meereshöhe beträgt 1013,25 mbar und legt den Punkt „0% Vakuum“ fest. Ein völlig luftleerer Raum wird dementsprechend als „100% Vakuum“ beschrieben.

Um gelöste Ablagerungen und Verunreinigungen aus einer zu reinigenden Haltung in die Schlammkammer des Fahrzeuges zu befördern, wird mit einer Vakuumpumpe ein Unterdruck im Fahrzeugtank erzeugt. Dadurch ergibt sich ein Volumenstrom in Richtung des Fahrzeugs. Das abzusaugende Material wird durch das mit hoher Geschwindigkeit strömende Medium (Wasser und/oder Luft) mitgerissen. Unter dem anzusaugenden Teilchen baut sich im Bereich A ein Staudruck auf (Abbildung 23). In den Punkten B, die eine Engstelle bilden, erhöht sich die Geschwindigkeit und durch

die entstehende Reibung zwischen dem strömendem Medium und den Feststoffteilchen wird das Sauggut weitergefördert (dynamischer Druck). Im Bereich C entsteht durch Verwirbelungen der Strömung ein Unterdruck (Abbildung 23). (Wielenberg, 1996)

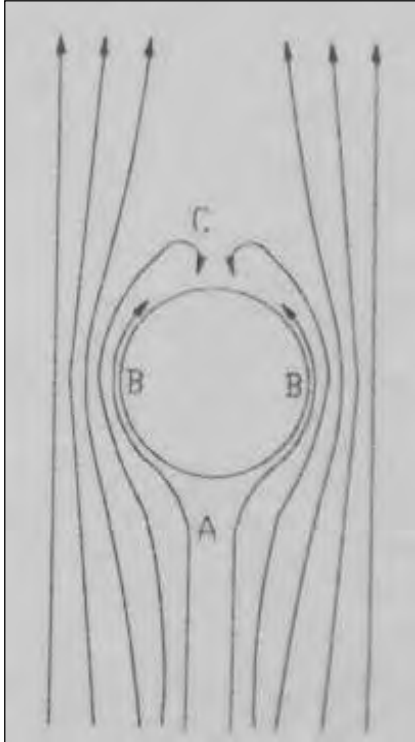


Abbildung 23: Unterströmung eines Feststoffteilchens (DIN 19523)

Die Strömungsgeschwindigkeit der Luft ist dabei nach der Kontinuitätsgleich direkt abhängig vom Volumenstrom der Vakuumpumpe. Der darin enthaltene Parameter Strömungsquerschnitt A ist durch die Nennweite des Saugschlauchs gegeben.

$$Q = v \times A$$

mit:

Q = Volumenstrom [l/min]

v = Strömungsgeschwindigkeit [m/s]

A = Strömungsquerschnitt [mm]

Da es sich bei dem zu fördernden Material um ein Gemisch aus Wasser und Feststoffen handelt, ist die Vakuumpumpe sowohl für Saugen durch Unterdruck als auch für Saugen von Luft auszulegen. In der Regel kommen heutzutage Wasserring- und Drehschieberpumpen zum Einsatz. Die Saugleistung der Vakuumpumpe wird vom Hersteller in m³/h gemessen und angegeben. Moderne Vakuumpumpen verfügen über maximale Luftfördermengen zwischen 900 m³/h bis 3100 m³/h, bei einem maximalen Arbeitsdruck von 1 bar.

4.4.5 Lärmemissionen

Bei dem Einsatz von Hochdruckspül- und Saugfahrzeugen entstehende Lärmemissionen werden unter dem Aspekt des Arbeitsschutzes und des aufkommenden Umgebungslärms betrachtet. Die Lärm- und Vibrations-Arbeitsschutz Verordnung (LärmVibrationsArbSchV, 2007) stellt Mindestanforderungen, um die Arbeitnehmer gegen tatsächliche oder mögliche Gefährdungen ihrer Gesundheit und Sicherheit durch die Einwirkung von Lärm zu schützen. Zur Beschreibung der Geräuschbelastung an Arbeitsplätzen gibt der Tages-Lärmexpositionspegel $L_{EX,8h}$ die durchschnittliche Lärmeinwirkung über einen Arbeitstag von 8 Stunden wieder. Ein weiterer Kennwert ist der Spitzenschalldruckpegel $L_{PC,peak}$, der als Höchstwert des momentanen C-frequenzbewerteten Schalldruckpegels definiert wird. Damit werden kurzzeitige Ereignisse, wie z.B. ein Knall, erfasst. Bei einer Überschreitung der Auslösewerte muss der Arbeitgeber Maßnahmen einleiten, die in Tabelle 15 aufgeführt werden. (Zustands-, Prozess-, Wirkungsanalyse zur Entwicklung einer bedarfsorientierten Reinigungsstrategie für Kanalnetze, 2008)

Tabelle 15: Auslösewerte nach der Lärm- und Vibrations-Arbeitsschutz Verordnung (LärmVibrationsArbSchV) (Mombert, 1993)

	$L_{EX,8h}$	$L_{PC,peak}$	Maßnahmen
Obere Auslösewerte	85 dB(A)	137 dB(C)	- persönlicher Gehörschutz vorgeschrieben - Lärmbereiche kennzeichnen - arbeitsmedizinische Untersuchung
Untere Auslösewerte	80 dB(A)	135 dB(C)	- Arbeitgeber stellt Gehörschutz bereit - Unterweisung der Mitarbeiter - arbeitsmedizinische Beratung

Bezogen auf die Umgebung sollen die Hochdruckspül- und Saugfahrzeuge nach ATV-M 197 (2004) den Anforderungen der Straßenverkehrszulassungsverordnung (StVO) genügen und der Fahrgeräuschgrenzwert darf je nach Baujahr 80 dB(A) bzw. 84 dB(A) nicht überschreiten. Die Hochdruckspül- und Saugfahrzeuge müssen daher gemäß der DIN EN ISO 3744 (2011) und der Richtlinie Geräuschemission 2000 (EU-Richtlinie 2000/14/EG) eine Lärmprüfung durchlaufen, bevor sie ausgeliefert werden.

4.5 EDV- und Schachterkennungssysteme

Die in diesem Abschnitt zusammengestellten Informationen sind im Rahmen der Phase I des Forschungsprojektes entstanden und werden im weiteren Verlauf ausführlicher diskutiert. Eine weiterführende Betrachtung des Themas EDV-Systeme und Unterstützung durch Betriebsführungssysteme erfolgt in Abschnitt 6.4 auf Grundlage ausführlicher Recherchen und Interviews.

Zur effizienten Verwaltung und Unterhaltung eines Kanalnetzes mit Abwasserschächten, Haltungen, Sonderbauwerken, etc. können spezielle geografische Informationssysteme (GIS) bzw. Kanalinformationssysteme (KIS) sowie Betriebsführungssysteme (BFS) genutzt werden (Bosseler, 2006) (Abbildung 24).

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).

Abbildung 24 zeigt exemplarisch ein Auszug aus einem GIS.

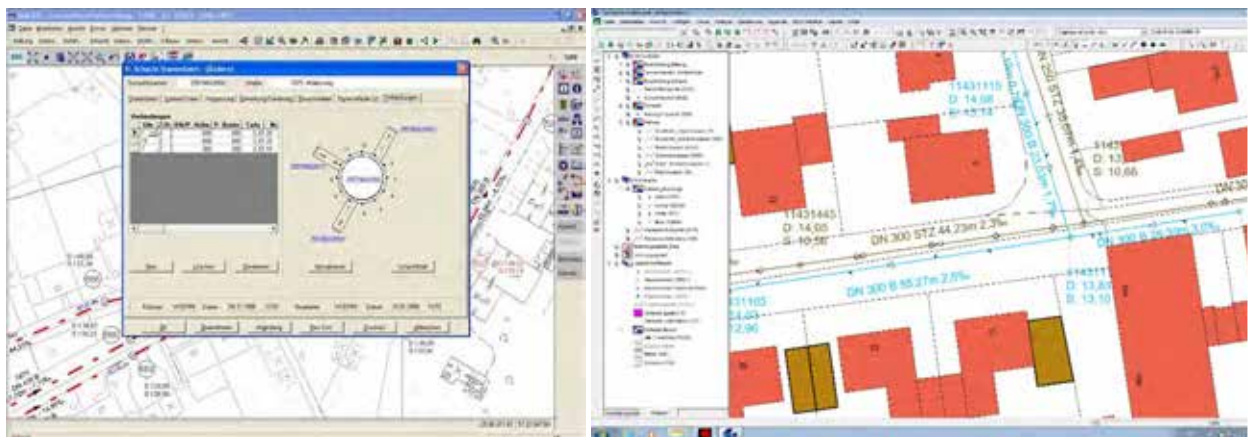


Abbildung 24: Geoinformationssystem GIS (Bosseler, 2006)

Eine spezielle Form des GIS ist das **Kanalinformationssystem** (Aschauer, 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.

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, Tablets oder PDAs (Abbildung 25) verstanden. Diese Geräte werden von den Mitarbeitern des Kanalbetriebes vor Ort mitgeführt (Dohmann, 2003).

Auf Abbildung 25 ist exemplarisch ein mobiles Datenerfassungsgerät dargestellt.



Abbildung 25: MDE-Gerät (Bosseler, 2006)

Sofern zu jedem Schacht bzw. zu jeder Haltung die erforderlichen Informationen und Daten vorliegen, können zu jedem Schacht bzw. Haltung die geografische Lage im Kanalnetz graphisch dargestellt, außerdem zu jedem Schacht bzw. 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, 2006).

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

Die korrekte Identifikation der Schächte ist im Zusammenhang mit dem Einsatz von EDV-Systemen von besonderer Bedeutung. Diverse Schachterkennungssysteme stehen 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** (Abbildung 26) als batterielose Speichereinheit im Bereich des Schachtkopfes angebracht. Die gespeicherten Daten können mithilfe eines mobilen Datenerfassungsgerätes (MDE-Gerätes) drahtlos ausgelesen werden.

Barcodes (Abbildung 27) 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 (Abbildung 28) aus Polystyrol oder Polyethylen werden i. d. R. an Steigeisen befestigt oder im Bereich des Schachtkopfes an die Schachtwand 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 (Abbildung 29), 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.



Abbildung 26: Transponder



Abbildung 27: Barcode



Abbildung 28: Schild



Abbildung 29: Markierungstopfen

Die einzelnen Schachterkennungssysteme sind in (Ulutas, 2007) detailliert erläutert.

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 gezielten Versuchen geplant. Der Fokus der praktischen Versuche lag auf dem Betrieb einer Kanalteststrecke, 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 Kanalteststrecke

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 Abbildung 30 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 zu sehr unterschiedlichen Einschätzungen des Reinigungsbedarfs gekommen.

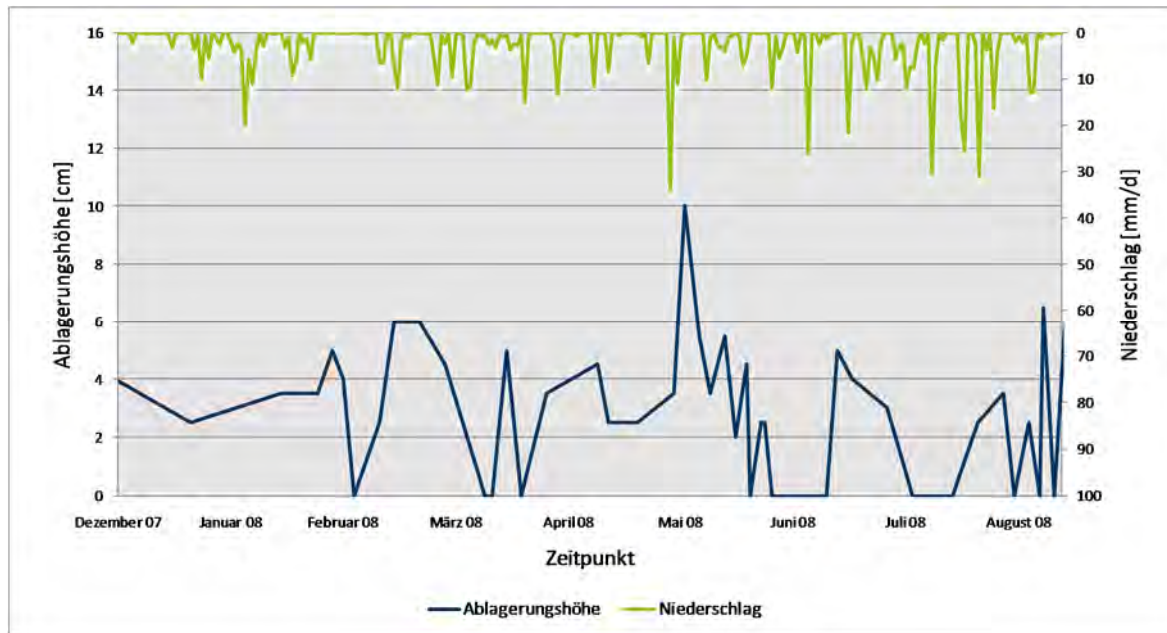


Abbildung 30: Ablagerungs- und Niederschlagshöhen (Messstelle Bochum-2, Messungen im Rahmen des MUNLV-Projektes „Zustands-, Prozess und Wirkungsanalyse zur Entwicklung einer bedarfsorientierten Reinigungsstrategie für Kanalnetze)

Um dieses Problem zu umgehen, wurde eine Kanalteststrecke 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 Kanalteststrecke 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 betonierete Fläche von ausreichender Größe, die für den Versuchsaufbau genutzt werden konnte, ohne den Kläranlagenbetrieb 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 Ölbachtal 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
- Kontrolle durch das Klärwerkspersonal, sodass größere Fehlfunktionen schnell bemerkt werden

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 Ölbachtal konnten diese Anforderungen erfüllt werden. Das Einzugsgebiet der Kläranlage Ölbachtal 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 Wannenbach). 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 16).

Tabelle 16: 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 unter 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 (Abbildung 31). Plexiglas bietet mehrere Vorteile gegenüber anderen Rohrmaterialien. 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.



Abbildung 31: 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 (Abbildung 32), wurde nach einer Möglichkeit gesucht, die äquivalente Sandrauheit der verwendeten Rohre so zu erhöhen, sodass 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 Bandbreite 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 17).

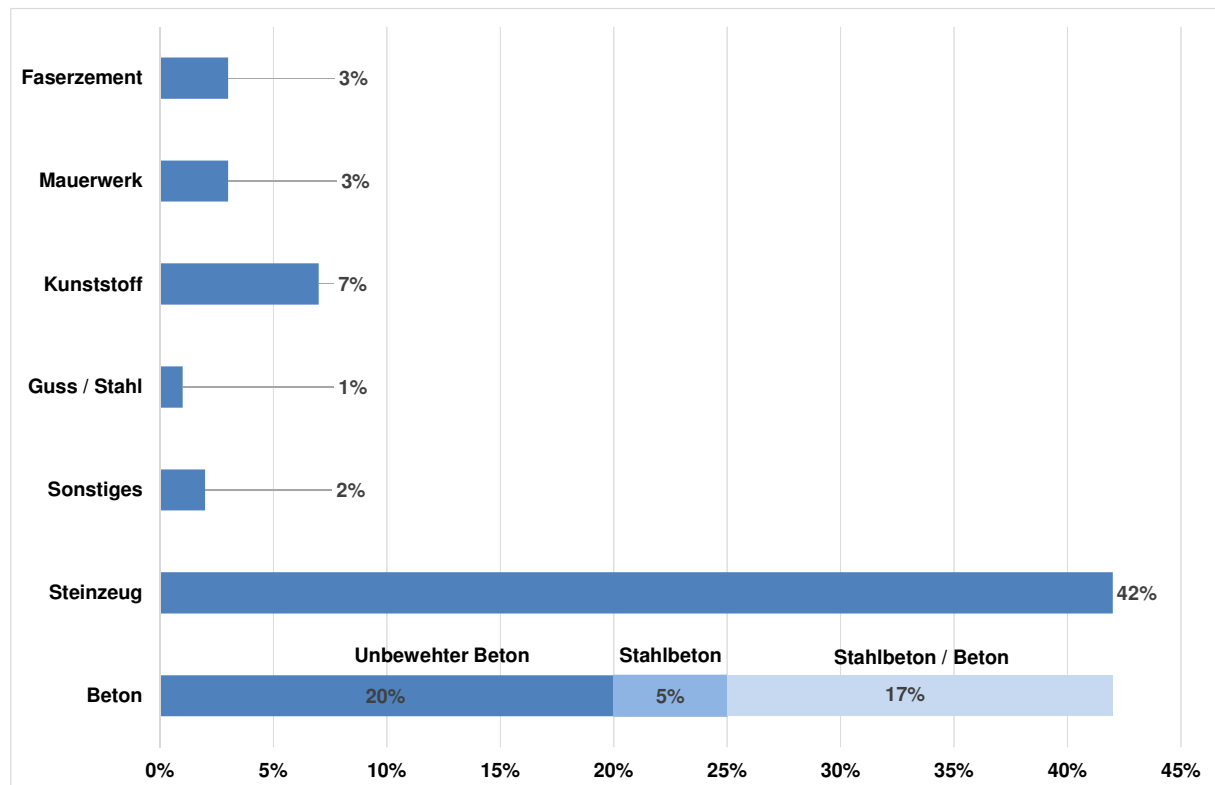


Abbildung 32: Verteilung der Rohrmaterialien im Gesamtnetz Deutschlands (nach Berger und Falk, 2011)

Um den Einfluss der äquivalenten Sandrauheit auf die Ablagerungsbildung zu untersuchen, sollen weitere Versuche mit Schleifpapier unterschiedlicher Körnungen durchgeführt werden. Diese Versuche sind Bestandteil der Phase II des Projektes. Unter anderem wird hier auch eine verfugte Natursteinfliese zur Nachempfindung von gemauerten Kanälen eingesetzt. Die Ergebnisse von ersten Vorversuchen mit äquivalenten Sandrauheiten von 0,1 und 0,635 mm finden sich in Kapitel 5.2.

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 17: 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 0,0015 bis 0,01
	Polyäthylen, weich und hart, neu; PVC, neu	
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 (Abbildung 33). So war es möglich, jeden Bereich im Rohr problemlos zu erreichen, ohne dass sich die Plexiglasrohre aufgrund von inneren Spannungen verformen.



Abbildung 33: Plexiglasrohr mit Ausschnitten im Scheitel

Unterbau

Der Unterbau der Versuchsrohre muss sehr stabil sein, um das Gewicht der Rohre im Vollfüllungszustand aufnehmen zu können. Dabei sollte es nicht zu nennenswerten 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 (Abbildung 34).

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.



Abbildung 34: Unterkonstruktion für die Versuchsrohre (links: Vertikale Stützen mit höhenverstellbaren Querstreben; rechts: Horizontale Träger als Auflage für die Versuchsrohre)

5.1.1.4 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 (Abbildung 35). Ein Ausgang mit DN 150 diente der Druckregulierung 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 Regenereignisses, 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.

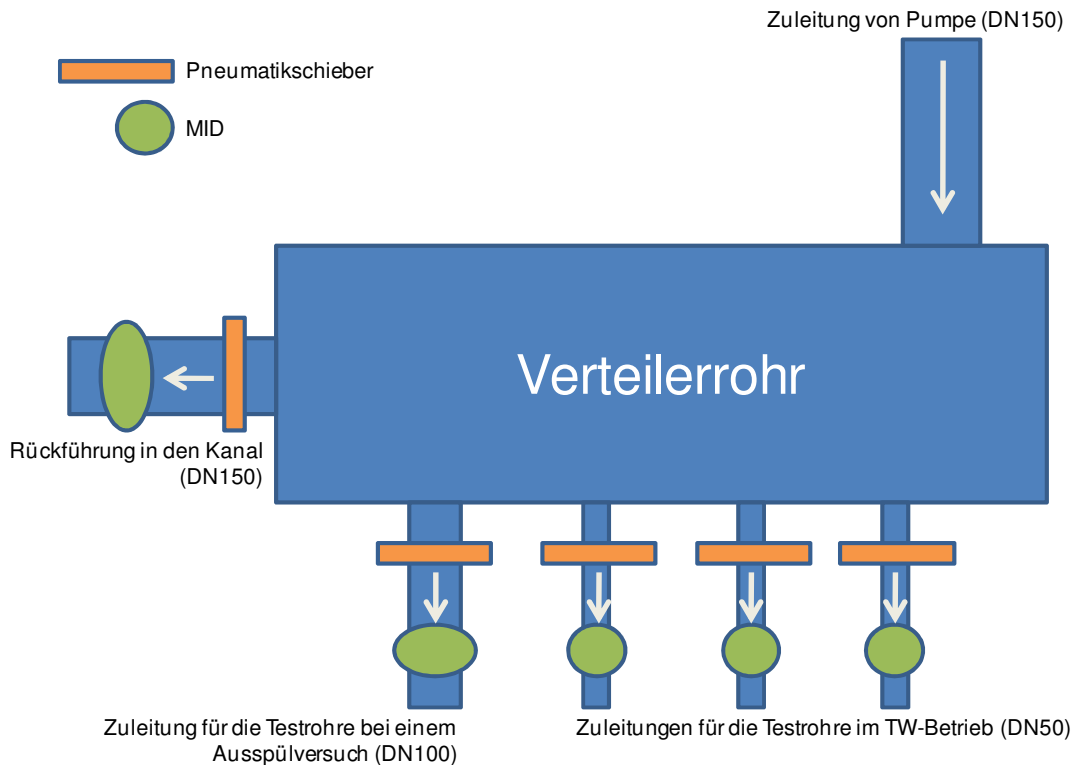


Abbildung 35: Funktionsskizze des verwendeten Verteilerrohrs

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 (Abbildung 36). 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.

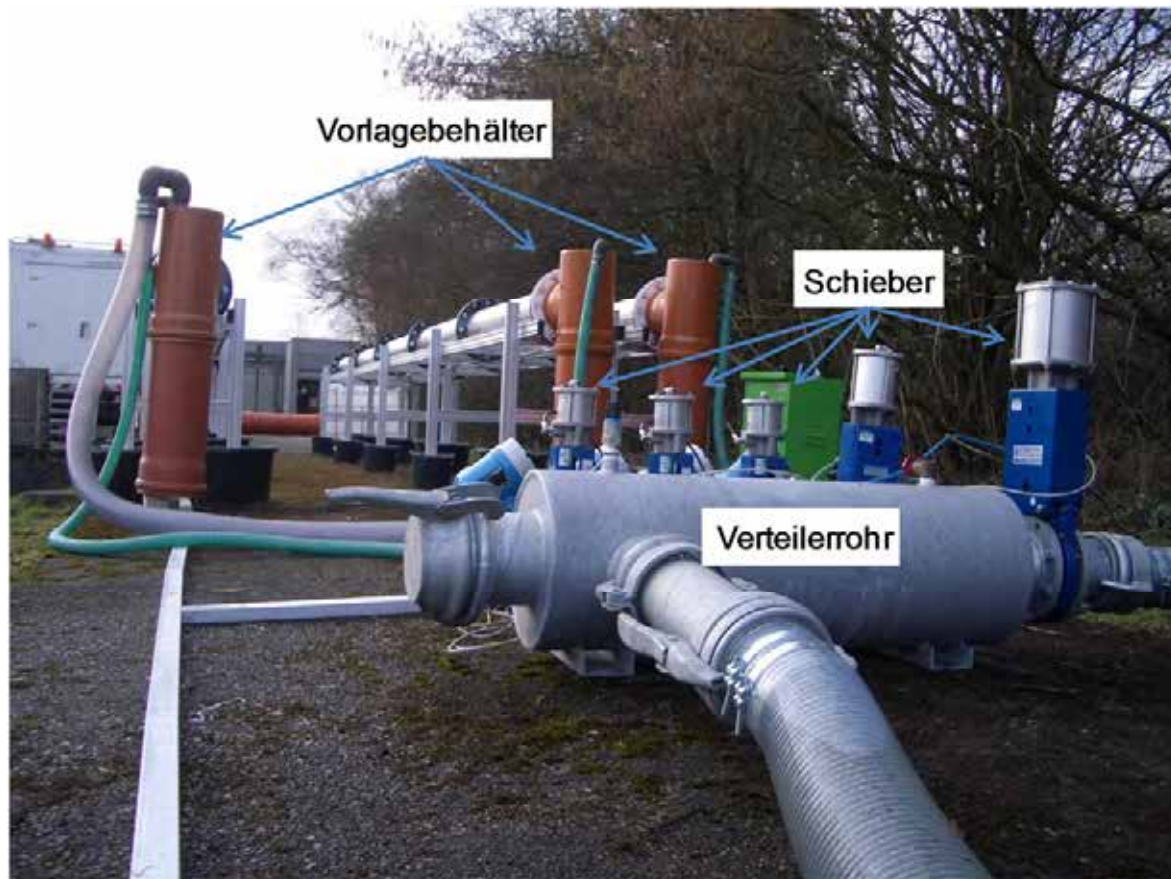


Abbildung 36: Verteilerrohr mit Schiebern (im Vordergrund) und Vorlagebehälter (braune Rohre im Hintergrund)

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. Abbildung 37 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.

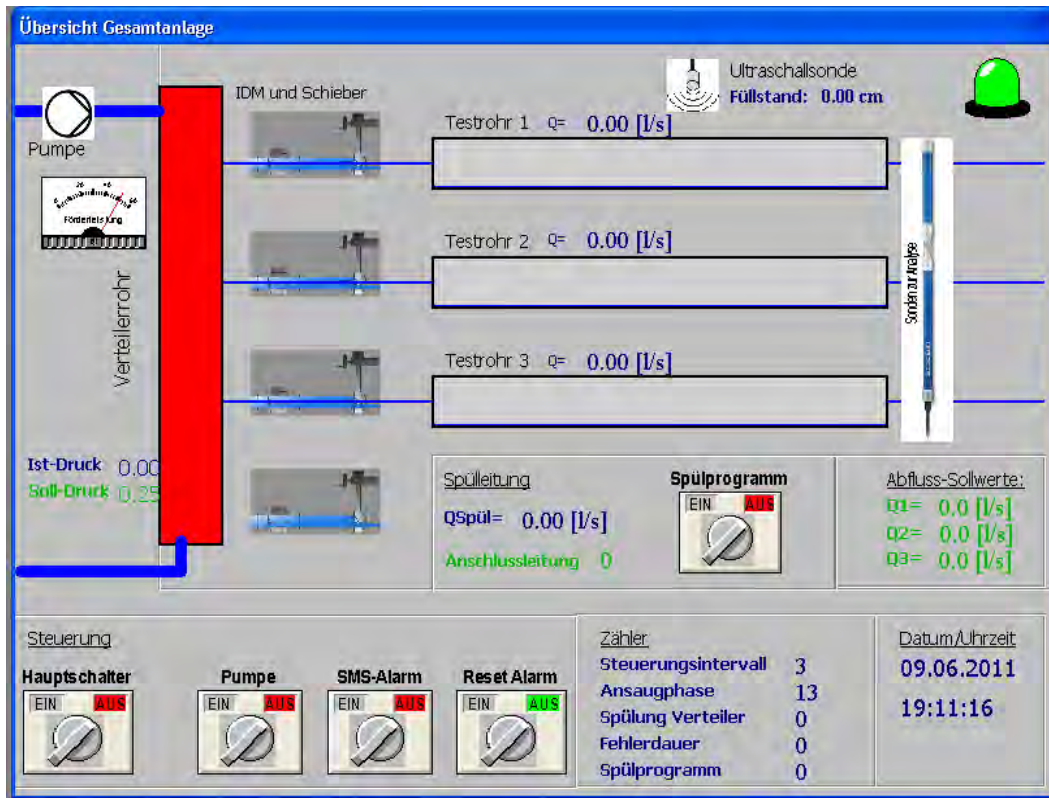


Abbildung 37: Steuerung der Kanaltteststrecke über InTouch (Wonderware GmbH), Hauptfenster

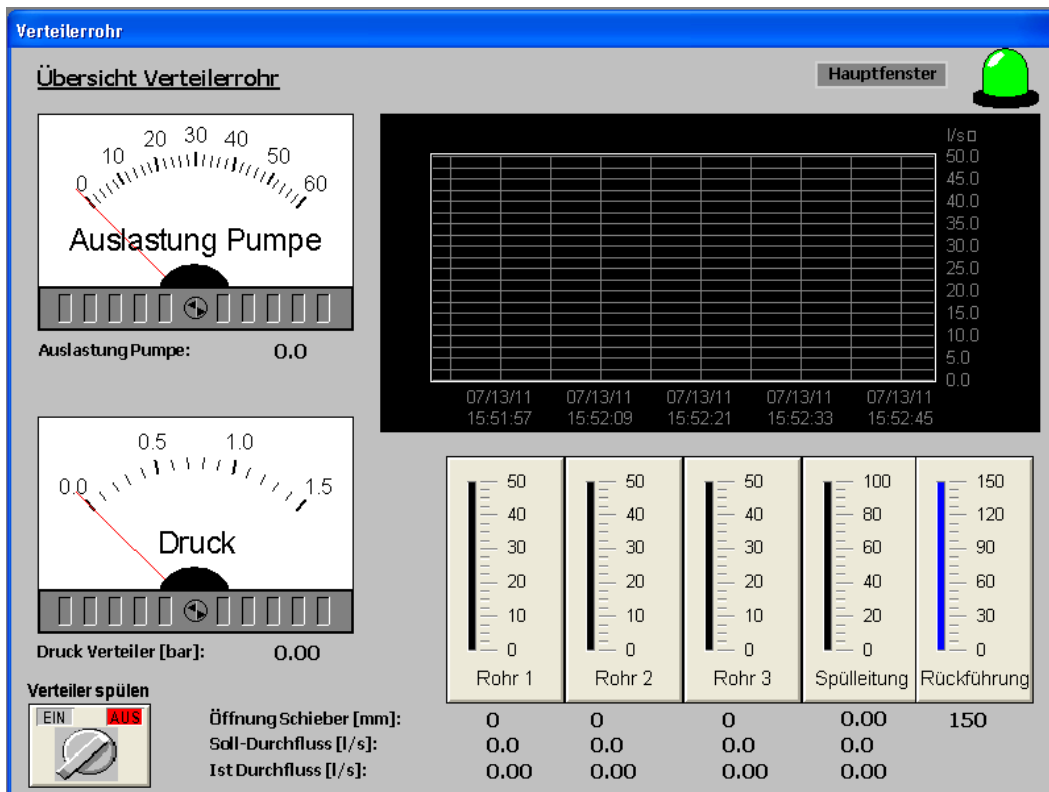


Abbildung 38: Steuerung der Kanaltteststrecke über InTouch (Wonderware GmbH), Übersicht Verteilerrohr

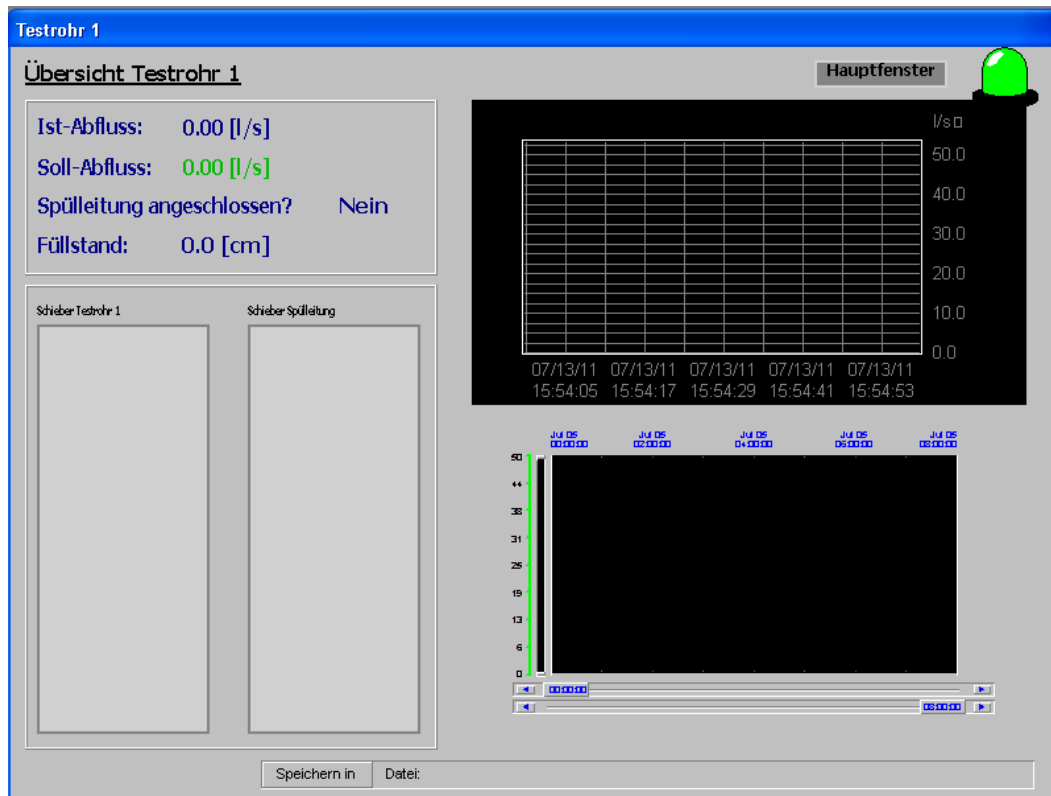


Abbildung 39: Steuerung der Kanaltteststrecke über InTouch (Wonderware GmbH), Übersicht Testrohr1

Da sich der Druck im Verteilerrohr durch den verstopfungsbedingten Leistungsabfall der Pumpe und variable Abflussmengen in den einzelnen Testrohren ständig änderte, 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 konnte. 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.

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

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

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

Wird in dieser Gleichung der maximale Abfluss Q_{max} mit einem Faktor f multipliziert, lässt sich darüber die Größe der Annäherungsschritte variieren. Bei Werten von f größer als 1 werden die Änderungen der Schieberöffnung verkleinert, was sinnvoll ist, wenn der Ist-Abfluss Q_{Ist} kleiner ist als der Soll-Abfluss Q_{Soll} . Auf diese Weise wird vermieden, dass sich 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 Abbildung 40 wird deutlich, wie sich unterschiedliche Werte für f auf die Größe der Annäherungsschritte auswirken.

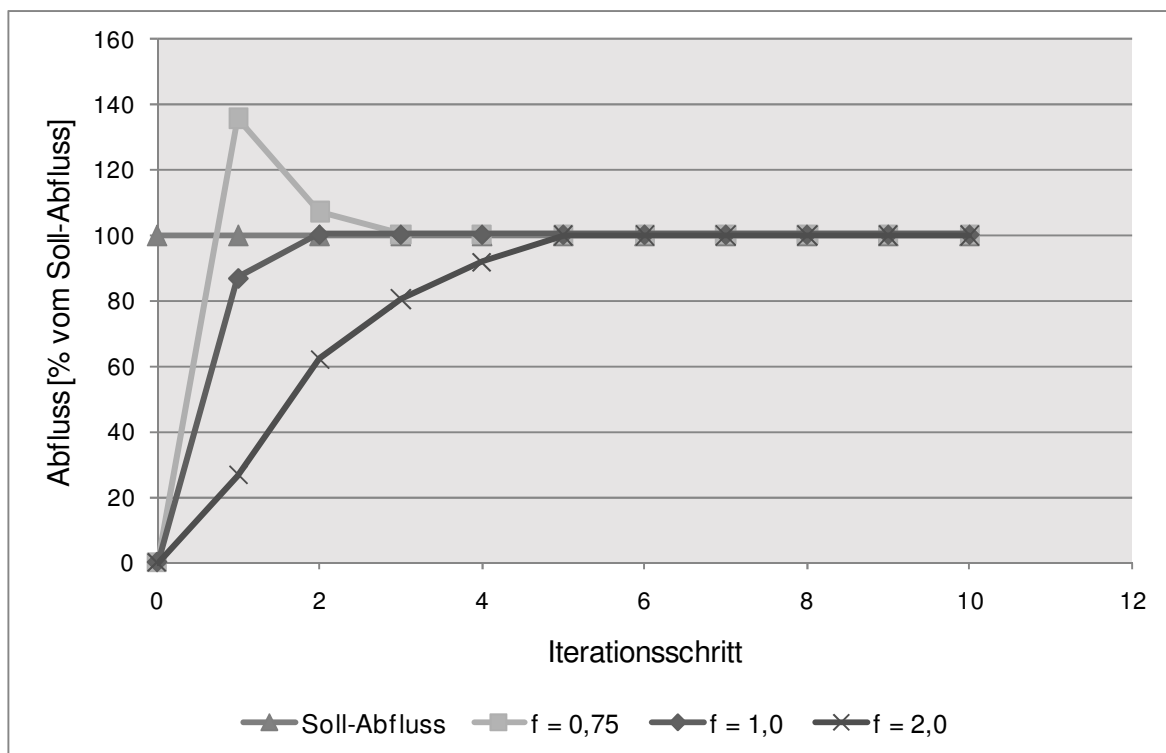


Abbildung 40: Beispielhafte Annäherung von Ist- und Soll-Abfluss für unterschiedliche Annäherungsgeschwindigkeiten (ohne Messwerte)

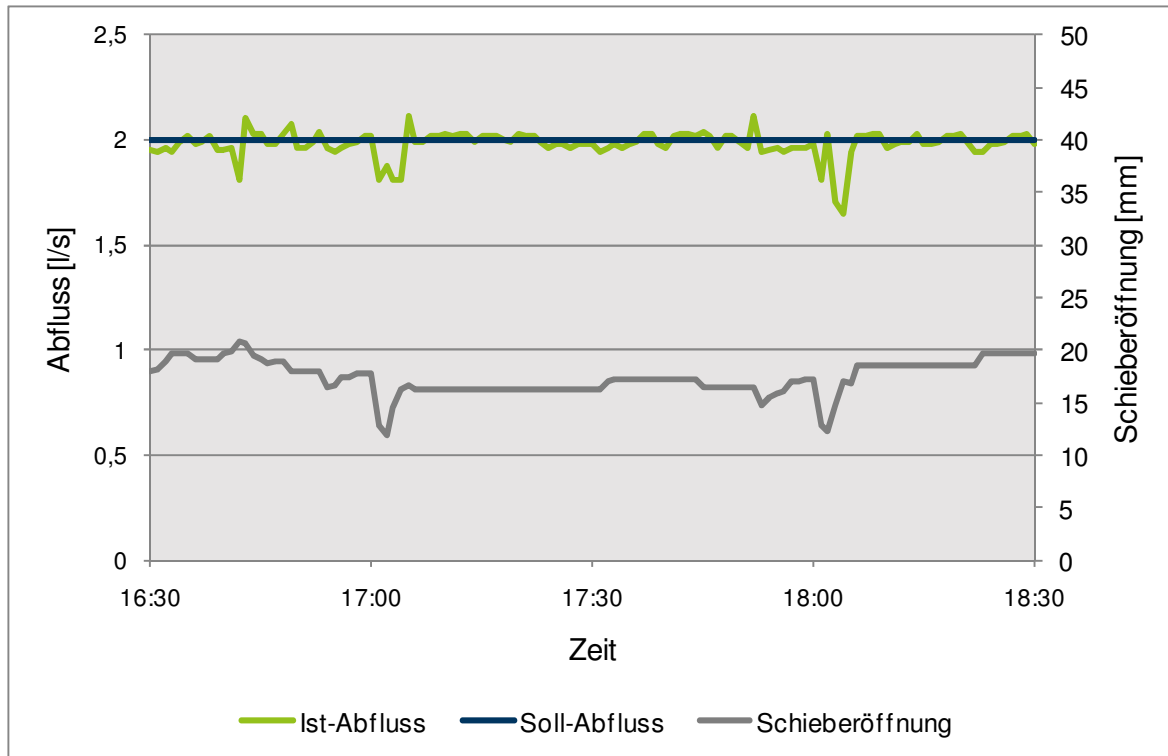


Abbildung 41: Abfluss bei konstantem Soll-Abfluss, leichte Abflussschwankungen bedingt durch Druckänderungen im Verteilerrohr (Schieber DN50), (Versuchsreihe 10, $Q=2$ L/s, $l_s=1$ ‰, $k_s=0,4$ mm, $\tau=0,3$ N/m²)

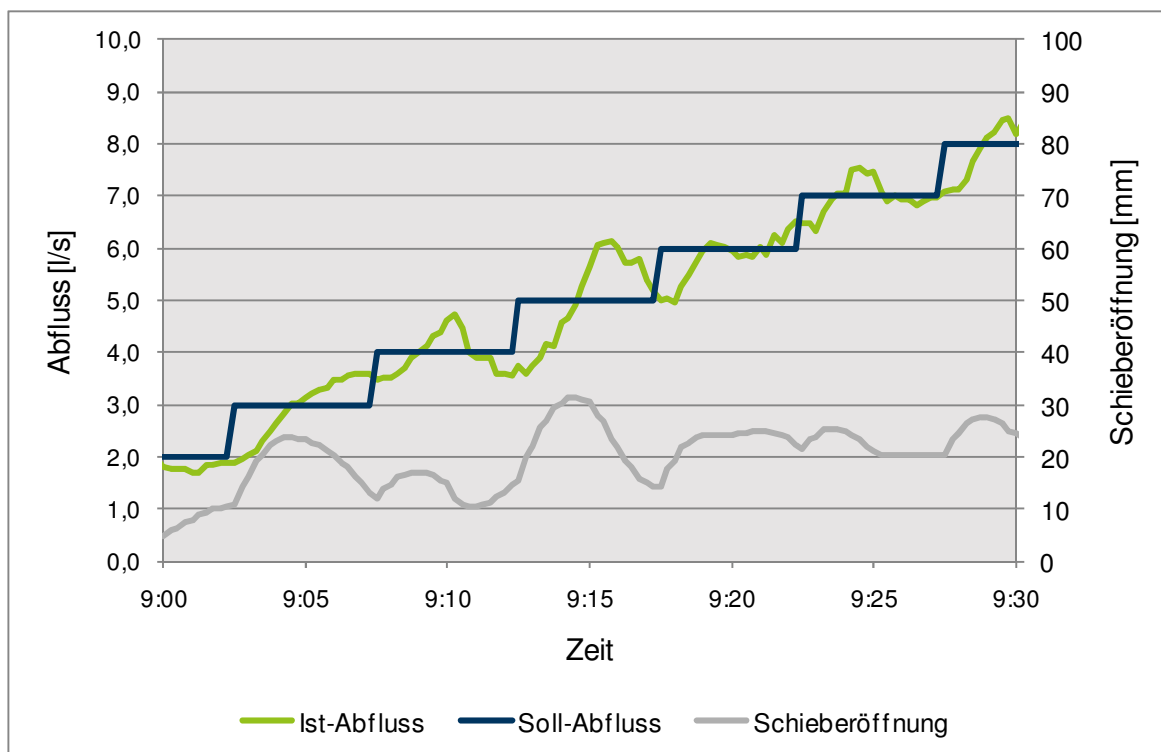


Abbildung 42: Schieberöffnung und Ist-Abfluss für einen sukzessive anwachsenden Soll-Abfluss (Schieber DN100) (Versuchsreihe 10, $l_s=1$ ‰, $k_s=0,4$ mm)

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 (Abbildung 41). Wird der Soll-Abfluss Q_{Soll} häufig verändert, ist der Ist-Abfluss Q_{Ist} aufgrund der trägen Regelung zeitlich verzögert (Abbildung 42). In Abbildung 42 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.

5.1.1.5 Messgrößen

In Tabelle 18 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 (Abbildung 44). Da die sorgfältige Messung der Ablagerungshöhen an allen 120 Messpunkten (40 je Rohr, s. Abbildung 43) 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 18: 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

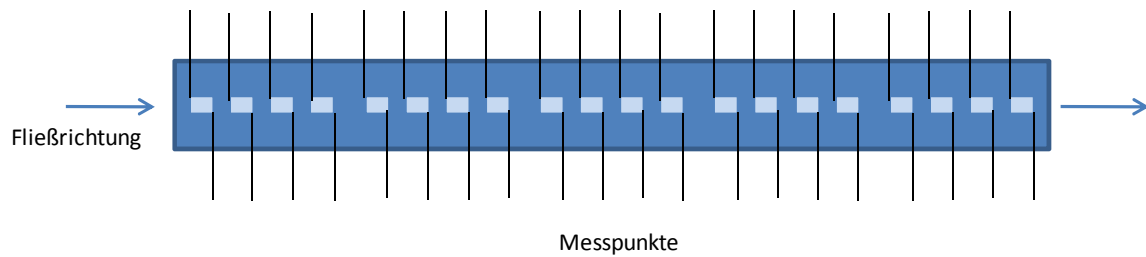


Abbildung 43: Auszug aus dem Messprotokoll für die Ablagerungshöhen, die schwarzen Striche markieren die Messpunkte (Draufsicht)



Abbildung 44: 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.

5.1.1.6 Wiederinbetriebnahme

Aufgrund von betrieblichen Änderungen an der Kläranlage Bochum-Ölbachtal wurde nach Beendigung Phase I (2011) ein Rechen und damit eine der beiden Zulaufstraßen außer Betrieb genommen. Aus diesem Grund zeigte sich bei der erneuten Inbetriebnahme der Versuchsanlage im Jahr 2014 eine erhöhte Ablagerungsmenge im Zulauf der Kläranlage. Dies spiegelte sich auch in den ersten drei durchgeführten Versuchsreihen in Phase II wieder. Neben gestiegenen Ablagerungshöhen kam es mehrmals täglich zu Betriebsstörungen, da sich Teile der Pumpe zusetzten. Hierzu zählten unter anderem der Ansaugschlauch und die Pumpenkammer. Dabei stellten sich im Abwasser mitgeführte textile Grobstoffe als besonders problematisch heraus, da sie innerhalb von Minuten zu einem vollständigen Erliegen der Pumpenleistung führten. Entnommene Faserstücke werden in Abbildung 45 rechts gezeigt. Zu sehen ist die Menge, die aus der Ansaugkammer der Pumpe entnommen wurde.

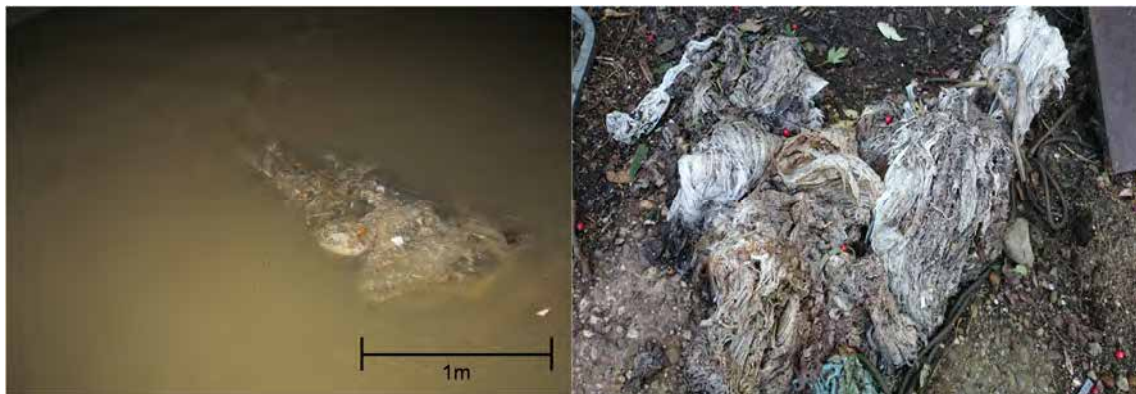


Abbildung 45: Bild links: Größere Ablagerungen, welche bei Trockenwetter an der Entnahmestelle auftraten. Bild rechts: Entnommene Faserstücke aus der Pumpe.

Es wurde versucht, dieses Problem mittels eines Grobfilters zu lösen. Hierzu wurde ein KG-Rohr DN 150 nahezu vollständig mit Löchern, mit einem Durchmesser von etwa vier Zentimetern, versehen. Dies sollte gewährleisten, dass weiterhin alle pumpfähigen Grobstoffe in die Versuchsrohre gelangen konnten. Es stellte sich jedoch bereits nach einem Tag eine so große Verblockung vor und in dem Filter ein, dass dieser Versuch abgebrochen werden musste. Innerhalb der ersten Versuchsreihe stellte sich zudem heraus, dass sich an der bisherigen Ansaugstelle der Pumpe bei Trockenwetter Ablagerungen deutlich oberhalb des Wasserspiegels einstellten. Dieses verdeutlicht Abbildung 45 (links), in der eine etwa zwei Meter große Ablagerungsbank zu erkennen ist.

Da aufgrund der Geometrie von Kanaldeckel, Anschlussstück der Pumpe und Ansaugschlauch kaum Möglichkeiten bestanden, die Ansaugstelle im Kanal zu beeinflussen, wurde beschlossen, die Ansaugstelle um ca. 30 m zu verlagern. An dieser Stelle ist der Zulauf zur Kläranlage Ölbachtal nicht mehr kanalisiert, sodass der Ansaugschlauch frei im Kanal positioniert werden konnte. Hierdurch konnte eine Veränderung

der Abwasserzusammensetzung aufgrund einer veränderten Entnahmestelle weitestgehend ausgeschlossen werden. Des Weiteren konnte der Entnahmeschlauch zur täglichen Überprüfung mühelos aus dem Abwasser gehoben werden. Dies wurde vor allem bei niedrigen Fördermengen und Regenwetter nötig, da sich vor dem Schlauch größere Geschiebemengen sammelten, in deren Folge sich der Schlauch mit der Zeit zusetzte. Ein weiterer Vorteil war, dass auf den Einsatz eines Halteseils am Ende des Schlauches verzichtet werden konnte, wodurch mögliche Verzopfungen ebenfalls ausgeschlossen werden konnten.

Um die Verlegung des Ansaugschlauches zu realisieren, wurde der Ein- und Auslass der Rohre vertauscht. Die ehemalige Entnahmestelle wurde jetzt als Ablauf genutzt. Für die verbleibenden ca. 20 m bis zur Versuchsanlage wurde ein verzinktes Stahlrohr DN 150 verwendet. Eine Beeinflussung des Zulaufs der Versuchsanlage aufgrund des zuvor schon entnommenen Abwassers konnte aufgrund der geringen Entnahmemenge und dem dagegen großen Zulauf ausgeschlossen werden. Außer dieser Maßnahme wurden keine weiteren Anpassungen vorgenommen, sodass der bisherige Versuchsaufbau weiter seine Gültigkeit behielt.

5.1.1.7 Alterung und Verschleiß

Gerade bei mehrjährigen Projekten sollte darauf geachtet werden, dass witterungsbeständige Materialien eingesetzt werden oder entsprechend vor Verwitterung geschützt sind. Dies wurde im durchgeführten Projekt bestmöglich umgesetzt. Dennoch zeigte sich insbesondere bei den verwendeten Plexiglasrohren und der eingesetzten Pumpe Verschleiß. Abbildung 46 zeigt Beispiele für altersbedingte Schäden am Plexiglas. Obwohl die Rohre während der Versuche mit Teichfolie vor äußeren Witterungseinflüssen geschützt wurden, zeigten sich vor allem zum Ende der Projektlaufzeit vermehrt Risse im Material und Undichtigkeiten an den verklebten Flanschen.



Abbildung 46: Die drei Abbildungen zeigen deutliche Abnutzungserscheinungen an den drei Plexiglasrohren. Links und Mitte: Risse im Material, welche zu Undichtigkeiten im System führten. Rechts: Haarrisse und Riefen im Material, wodurch die Ablagerungen nur schwer zu erkennen waren

Der größte finanzielle war die AbwasserStar 6“ der HEIDE-Pumpen GmbH. Ein häufiges Verschleißteil war die vordere Schleißscheibe, welche das Laufrad vor übermäßiger Abnutzung schützte. Durch den hohen mineralischen Anteil im geförderten Medium musste diese alle drei Monate getauscht werden. Weiter führte der mineralische Anteil bei mehreren Rohrteilen zu einem so hohen Verschleiß, dass sie ausgetauscht werden mussten.

In den letzten vier Monaten wurde daher die AbwasserStar 6“ der HEIDE-Pumpen GmbH durch zwei Drehkolbenpumpen PL 200 der Firma Börger ausgetauscht. Beide Pumpen sind baugleich und haben eine Leistungsaufnahme von 4 kW, was einer maximalen Förderleistung von ca. 7,5 L/s entspricht. Die beiden Pumpen wurden zunächst parallel geschaltet, sodass die maximale Fördermenge bei ca. 15 L/s lag.

5.1.1.8 Betrieb einer Versuchsanlage in den Wintermonaten

Für Erkenntnisse zur Ablagerungsentstehung und -charakteristik wurde in der zweiten Phase des Projektes die Versuchsanlage auch über die Wintermonate betrieben. Vor allem in den Monaten Dezember, Januar und Februar bestand die Gefahr, dass bei Stillstand der Versuchsanlage durch Nacht- oder Dauerfrost Leitungen und Pumpen einfroren. Zudem stellte sich die Enteisung einer Pumpe als zeitaufwendig heraus, da die Pumpe nicht in der Lage war durch die vorhandene Motorkraft das Eis zu entfernen. Ein Heißluftföhn konnte ebenfalls nur bedingt eingesetzt werden, um den empfindlichen Kunststoff nicht zu beschädigen.

5.1.2 Versuchsprogramm in Phase I

Die im Rahmen der Phase I des Forschungsprojektes durchgeführten Versuchsreihen sind in Tabelle 19 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 $0,3\text{ N/m}^2$. Die Variation der Dauer 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, bei welchem Durchfluss 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 19: Stand der Versuchsreihen nach Phase I (März bis November 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 Versuchsprogramm in Phase II

Auf Grundlage der Ergebnisse aus Phase I wurden für Phase II Ausgangsparameter für weitere Versuche festgelegt (vgl. Tabelle 20). Aufgrund der längeren Standzeit der Versuchsanlage wurden Versuchsreihen wiederholt, um Veränderungen in der Abwasserzusammensetzung während des Stillstands der Versuchsanlage auszuschließen. Hierzu wurden als Ausgangsgrößen die folgenden Parameter festgelegt:

Tabelle 20: Definition der Ausgangsparameter in Phase II (entspricht Versuchsreihe 27 / 34)

Versuchsdauer	Gefälle	Abfluss	äquivalente Sandrauheit
[d]	[‰]	[L/s]	[mm]
28	1	2	0,635

Bei der Wahl dieser Parameter wurde Wert darauf gelegt, eine möglichst große Vergleichbarkeit mit den bisher durchgeführten Versuchen sicher zu stellen. Bei der Versuchsdauer wurde darauf geachtet, eine große Datengrundlage zu schaffen. Da sich in Phase I zeigte, dass sich nach etwa drei bis vier Wochen eine Vergleichmäßigung der Ablagerungen einstellt, wurde ebenfalls ein Untersuchungszeitraum von 28 Tagen gewählt. Das Gefälle wurde zunächst auf ein Promille und der Abfluss auf zwei Liter pro Sekunde festgelegt. Bei diesen Werten ist davon auszugehen, dass sich in einem Kanalrohr für gewöhnlich Ablagerungen bilden. Da bisher nur zwei Versuchsreihen mit einer anderen Sandrauheit als 0,4 mm durchgeführt wurden, ist diese zu 0,635 mm gewählt worden, was einem Sandpapier mit einer Körnung 60 entspricht. Hierdurch sollte der Einfluss durch die Erhöhung der Rauheit von Kanalrohren, beispielweise durch Alterung, ermittelt werden. Zusätzlich wurden Untersuchungen mit einer verfugten Natursteinfliese zur Nachempfindung von gemauerten Kanalrohren durchgeführt. Die einzelnen Fliesen hatten ein Maß von etwa 22 x 22 x 4 mm und das Fugenmaß schwankte zwischen ein bis fünf Millimeter.

Eingesetzte Versuchsmaterialien zur Nachbildung der Wandrauheit in Phase II

Neben den bisher eingesetzten verschiedenen Varianten von Sandpapier, wurde in Phase II zusätzlich ein Rohr mit einer verfugten Natursteinfliese eingesetzt. In Abbildung 47 sind zum einen das Sandpapier mit einer Rauheit von 0,635 mm (Körnung 40), welches hauptsächlich in Phase II verwendet wurde, und zum anderen die verfugte Natursteinfliese dargestellt.



Abbildung 47: Links: Sandpapier mit einer Körnung von 40. Rechts: Verfugte Natursteinfliese. Mit dem Maß einer einzelnen Fliese von etwa 22 x 22 x 4 mm. Das Fugenmaß schwankte zwischen ein bis fünf Millimeter

In Phase I ist die Rauheit des Sandpapiers mittels einer Sieblinie nach Mesh berechnet worden. Diese beschreibt die Anzahl der Maschen eines Siebes pro Zoll (25,4 mm). Je größer die Zahl, desto feiner die Körnung. Überschlagsmäßig gilt für die Korngröße: Korngröße in mm = $25,4 / \text{Körnung}$. Da dies für die verfugte Natursteinfliese nicht möglich ist, wurden für einen Vergleich von Sandpapier und Natursteinfliese Oberflächenaufnahmen vom Lehrstuhl für Verkehrswegebau an der Ruhr-Universität-Bochum erstellt. Diese wurden während der ersten Versuche in Phase II (Versuchsreihe 32-35, Tabelle 22) und vor dem ersten Einsatz der Natursteinfliese durchgeführt. Für die Messungen wurde ein Texturmessgerät der Firma GF Messtechnik GmbH verwendet. Das Messfeldvolumen liegt bei $40 \times 30 \text{ mm}^2$, die angegebene Höhengauflösung beträgt $6 \mu\text{m}$ und die Lateralaufklärung $53 \mu\text{m}$. Anschließend wurden die erstellten Aufnahmen am PC weiterverarbeitet. Zum Einsatz kam hier die Software MountainsMap Form Vision. Das Programm erstellt aus der Draufsicht der Probe an der gewünschten Stelle ein Höhenprofil des Querschnitts. In Abbildung 48 sind exemplarisch drei Proben ausgewählt.

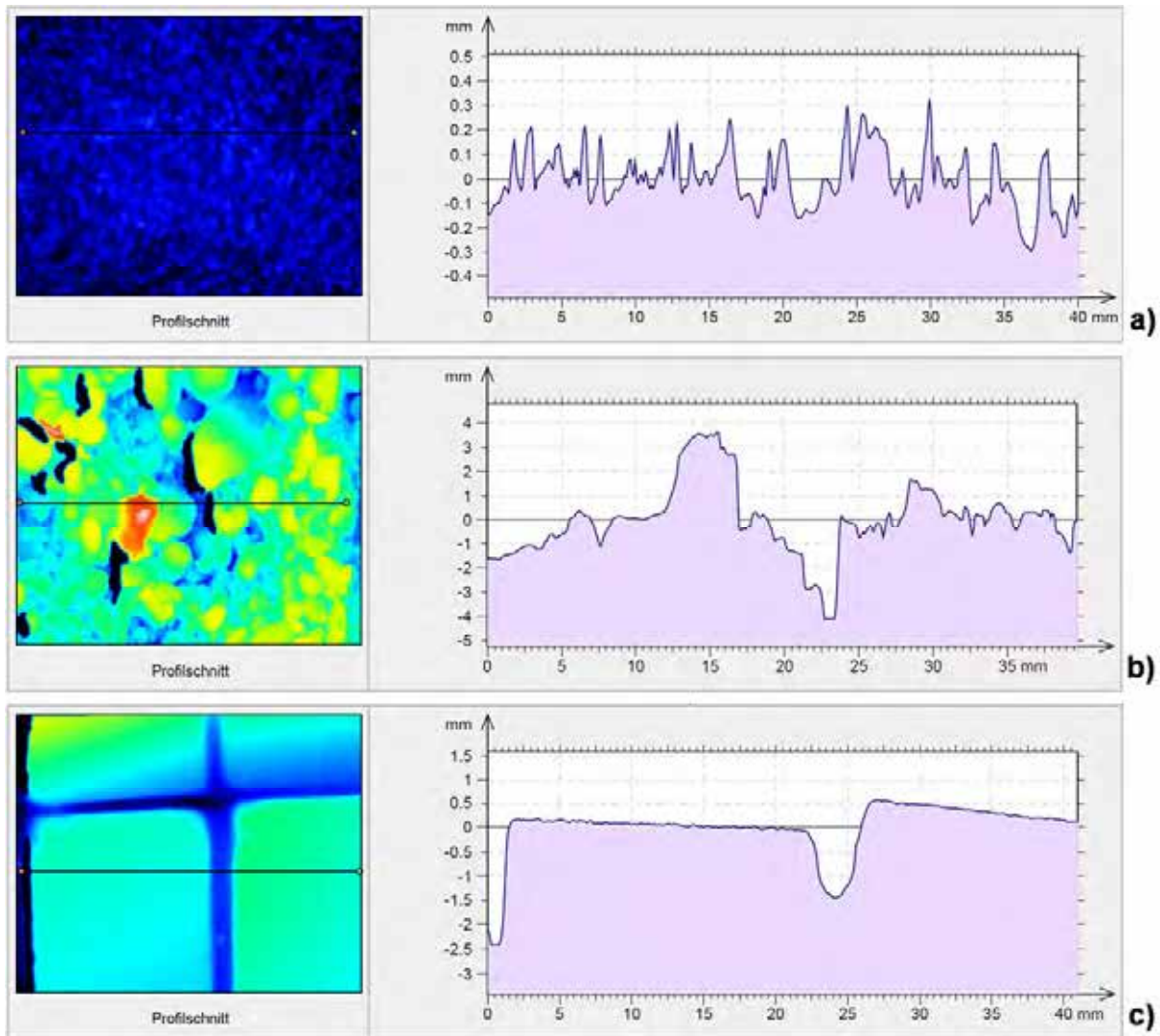


Abbildung 48: Oberflächenstruktur von a) Sandpapier mit einer Körnung von 40; b) Sediment aus der Versuchsanlage; c) verfugte Natursteinfliese

Hierbei handelt es sich um a) Sandpapier mit einer Körnung von 40, b) ein aus der Kanaltteststrecke entnommenes Sediment und c) einen Teil der verfugten Natursteinfliese. Vor allem beim Vergleich von Sandpapier und Natursteinfliese lässt sich ein Unterschied feststellen. Während es sich beim Schleifpapier um eine Rauheit 4. Ordnung nach DIN 4760 (1982) handelt, lässt sich die der Natursteinfliese durch eine 2. Ordnung charakterisieren. Nach DIN 4760 (1982) werden Oberflächen nach der Abweichung zu einer idealen Form beschrieben. Eine Abweichung 2. Ordnung wird als Welligkeit beschreiben, während die 4. Ordnung durch eine Rauheit mit Riefen oder Schuppen charakterisiert wird. Hierdurch lässt sich bei den Sandpapieren das vermehrte Auftreten von faserstoffhaltigen Ablagerungen zu Beginn der Versuche erklären, da sich diese in vorhandenen Riefen leicht verkeilen können. Währenddessen lässt sich bei der Natursteinfliese nahezu keine Riefenbildung feststellen. Lediglich aus der Fliesengeometrie sowie dem Fugenbild resultiert die vorhandene Rauheit. Die untersuchte Sedimentprobe wurde während der 32. Versuchsreihe entnommen und

getrocknet. Das vorhandene Ablagerungsprofil zeigt ebenfalls ein Wellenprofil, wie bei der Natursteinfliese. Weiter lässt sich eine leichte Riefenbildung erkennen, welche sich durch vorhandene Sandkörner in der Probe erklären lässt.

Neben den Profilquerschnitten wurden durch die Software Mountain Map verschiedene Parameter, wie die durchschnittliche quadratische Höhe (S_q) sowie die maximalen Mulden (S_v) und Spitzen (S_p), der Probe mit ausgegeben. Diese sind in der nachfolgenden Tabelle für die drei Proben aufgeführt:

Tabelle 21: Analyseparameter der Strukturanalyse

Parameter [mm]	Sandpapier (a))	Kanalsediment (b))	Natursteinfliese (c))
S_q	0,128	1,290	0,955
S_v	0,335	5,090	2,560
S_p	0,593	3,640	2,030

Auf Grundlage der Strukturanalysen wurde die Natursteinfliese zu einer äquivalenten Sandrauheit von 1,25 mm abgeschätzt. Ein direkter Bezug auf die betriebliche Rauheit k_b ist damit nicht möglich. Dennoch können mit diesen Daten weitere Aussagen über die Rauheitsbeschaffenheit verschiedener Materialien gemacht werden.

Anhand dieser Erkenntnisse wurde ein Versuchsplan (Tabelle 22) erstellt, in dem weitere Versuchseinstellungen zu den in Phase I bereits durchgeführten Experimenten aufgenommen wurden. Dabei wurde auf eine angepasste Beschickung der Rohre Wert gelegt, um eine realitätsnahe Durchströmung zu erreichen. Zur Eingrenzung des Einflusses des Niederschlags wurden Versuchseinstellungen ab Versuchsreihe 42 durchweg parallel durchgeführt.

Tabelle 22: Versuchsplan der Phase II

Versuchsreihe	Dauer [d]	Gefälle [‰]	Abfluss [L/s]	äquivalente Sandrauheit [mm]	
32	25	5	2	0,635	Sandpapier P40
33	25	1	4	0,635	Sandpapier P40
34	25	1	2	0,635	Sandpapier P40
35	76	1	2	1,250	Natursteinfliese
36	28	10	2	0,635	Sandpapier P40
37	28	1	8	0,635	Sandpapier P40
38	28	1	2	0,635	Sandpapier P40
39	28	1	2/1-4	0,635	Sandpapier P40
40	28	1	2	0,400	Sandpapier P60
41	28	1	1-5	0,635	Sandpapier P40
42	28	1	2	0,400	Sandpapier P60
43	28	1	2	0,635	Sandpapier P40
44	28	1	2	1,250	Natursteinfliese
45	55	1	1-4	1,250	Natursteinfliese
46	55	1	1-4	0,400	Sandpapier P60
47	55	1	1-4	0,635	Sandpapier P40
48	28	1	2	1,250	Natursteinfliese
49	28	1	2	0,400	Sandpapier P60
50	28	1	2	0,635	Sandpapier P40

Es konnten drei Langzeituntersuchungen über einen Zeitraum von zwei bzw. drei Monaten durchgeführt werden. Von einer Beschickung der Rohre ausschließlich bei Trockenwetter wurde abgesehen. Wenn bei Niederschlagsereignissen kein Abwasser durch die Versuchsrohre floss, trocknete die Sielhaut bereits nach einem Tag vollständig ein. Bei einer erneuten Beschickung der Versuchsrohre löste sich dieser ab (Abbildung 49), was zu einer Verfälschung der Ergebnisse führte. Gleiches gilt für die Sedimente an der Sohle. Hieraus wird deutlich, dass schon durch kurze Förderpausen

und ein Austrocknen der Rohre die Ablagerungen und insbesondere die Sielhaut erheblich verändert werden.



Abbildung 49: Links: Ablagerungen am Rand des Versuchsrohrs nach ca. einem Tag ohne Beschickung. Rechts: Identische Stelle im Versuchsrohr einen Tag später. Die bisherige Sielhaut ist vollständig verschwunden

5.2 Auswertung und Ergebnisse

Zu Beginn der Versuchsphase I 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 (Abbildung 50).



Abbildung 50: Ablagerungsbildung in einem glatten Plexiglasrohr nach einem Tag ($Q=2$ L/s $I_s=1$ ‰, $k_s\approx 0,0015$ 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. Diese setzen sich nicht allein aus mineralischen Bestandteilen, sondern auch aus organischen Bestandteilen und Faserstoffen zusammen (Abbildung 51). Durch die verminderte Fließgeschwindigkeit im Bereich der durch das Sandpapier erhöhten äquivalenten Sandrauheit kam es zudem zu einer vermehrten Ablagerungsbildung vor diesen Bereichen (Abbildung 52).



Abbildung 51: Ablagerungen auf Sandpapier nach zwei Tagen ($Q=2$ L/s, $I_S=1$ ‰, $k_S=0,4$ mm, $\tau=0,3$ N/m²)



Abbildung 52: 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 Abbildung 53 ist deutlich zu erkennen, wie die Ablagerungshöhen nach vier Metern, also bei Beginn der erhöhten äquivalenten Sandrauheit, deutlich ansteigen. 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.

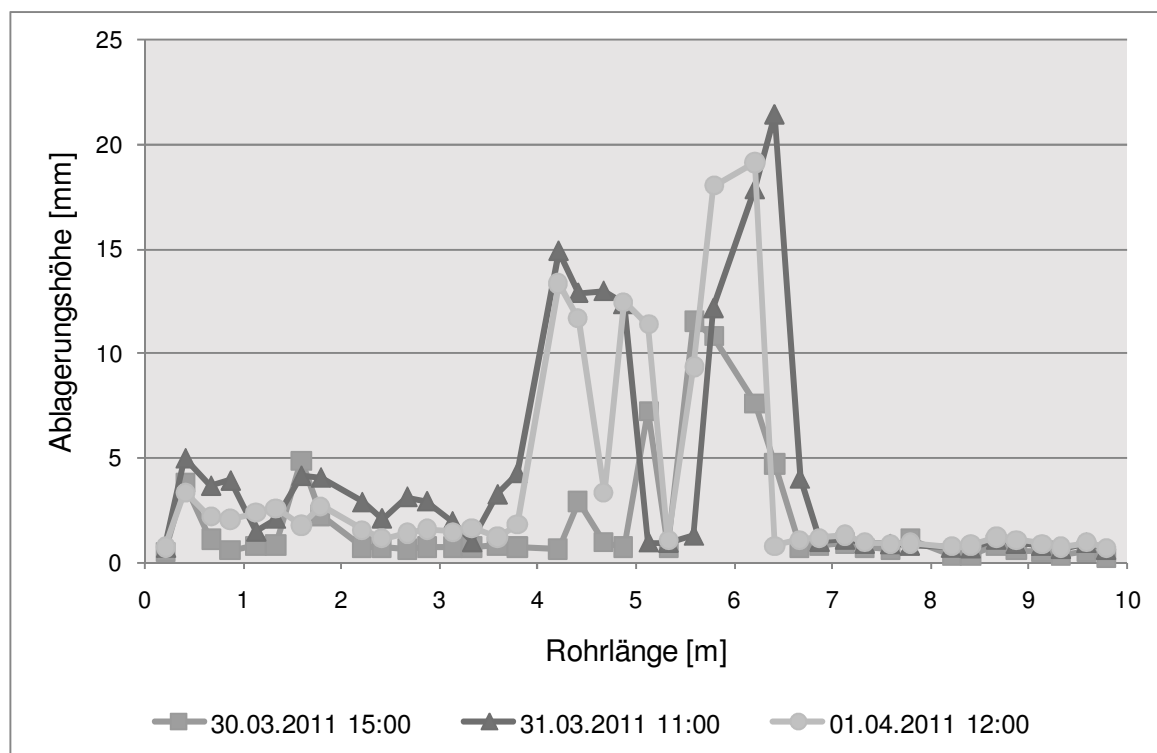


Abbildung 53: Ablagerungshöhen über die Rohrlänge, Auskleidung mit Sandpapier im Bereich von Meter 4 bis 6 ($Q=2$ L/s, $l_s=1$ ‰, $k_s=0,4$ mm)

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.

5.2.1 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. Dazu 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

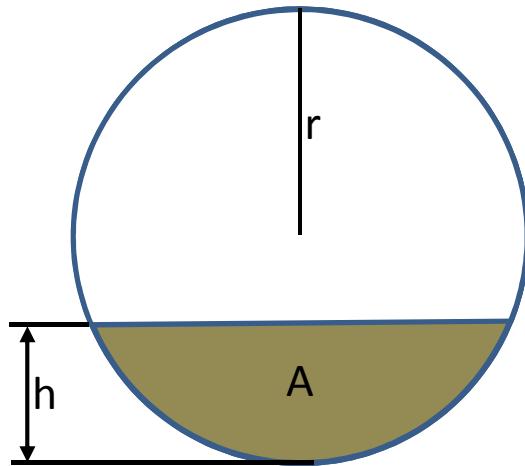


Abbildung 54: Idealisierte Querschnittsfläche der Ablagerungen

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

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

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 Abbildung 54 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 Abbildung 55 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 Abbildung 56 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 Versuchsröhre 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 Versuchsröhren sind während des beobachteten Zeitraumes weitgehend konstant (Abbildung 57). 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.

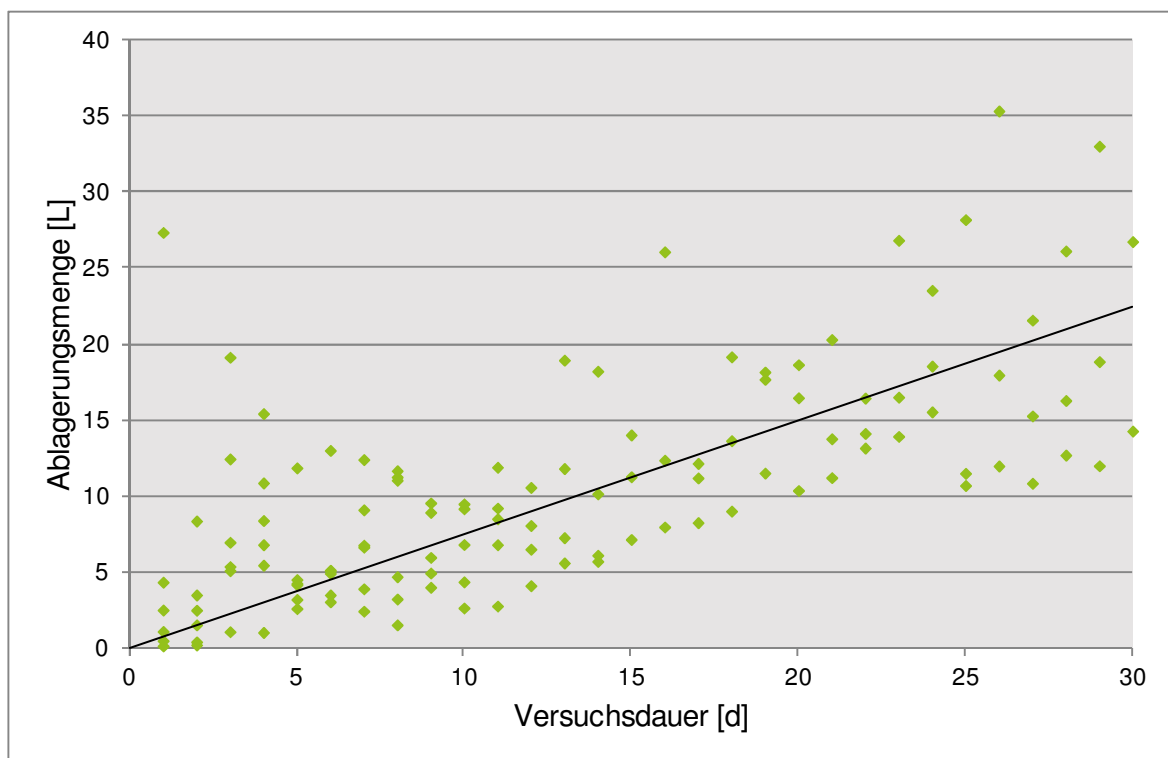


Abbildung 55: Entwicklung der Menge aller Ablagerungen im Testrohr (Versuchsreihen 11, 13, 14, 16, 17 und 20, $Q=2$ L/s, $I_S=1,0$ ‰, $k_S=0,4$ mm)

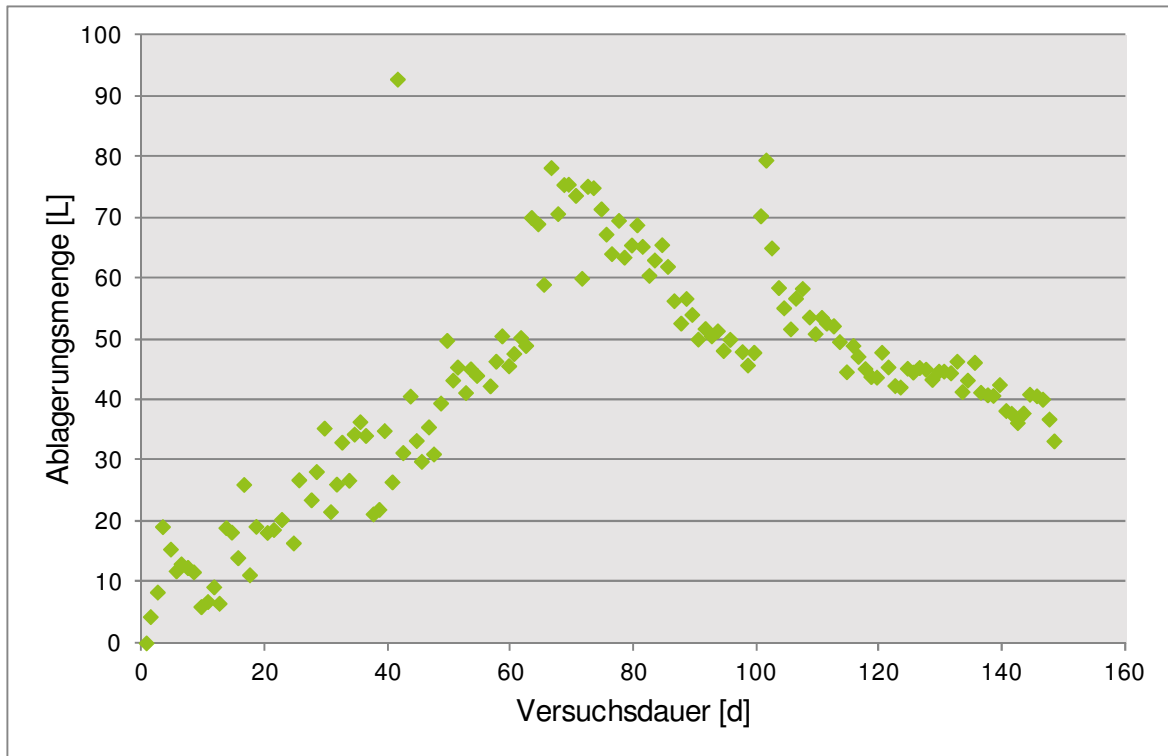


Abbildung 56: Entwicklung der Menge aller Ablagerungen im Testrohr (Versuchsreihe 20, $Q=2$ L/s, $I_S=1$ ‰, $k_S=0,4$ mm)

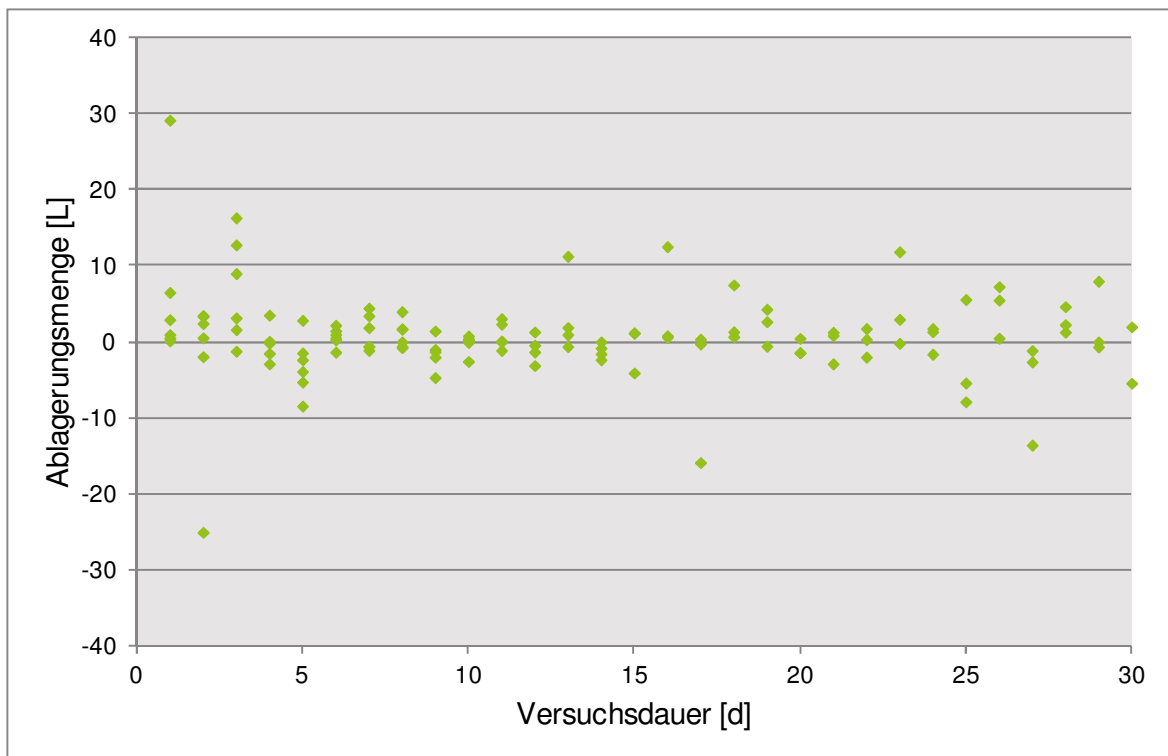


Abbildung 57: Tägliche Änderung der Menge aller Ablagerungen im Testrohr in Abhängigkeit der Versuchsdauer (Versuchsreihen 11, 13, 14, 16, 17 und 20, $Q=2$ L/s, $I_S=1$ ‰, $k_S=0,4$ mm)

Im Folgenden wird auf den Einfluss der Variation von Randbedingungen wie Gefälle, äquivalenter Sandrauheit und Durchfluss eingegangen.

5.2.2 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 119ff detaillierter eingegangen.

Bei der Variation der äquivalenten Sandrauheit wurde 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 (Abbildung 58). 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 119ff). Das Ergebnis eines geringen Einflusses der Wandrauheit auf die Ablagerungsbildung deckt sich weitgehend mit den Aussagen der Literatur, wonach äquivalente Sandrauheit und Oberflächenstruktur von Kanalrohren nur einen untergeordneten Einfluss auf die Ablagerungsbildung besitzen (Staufer, 2009).

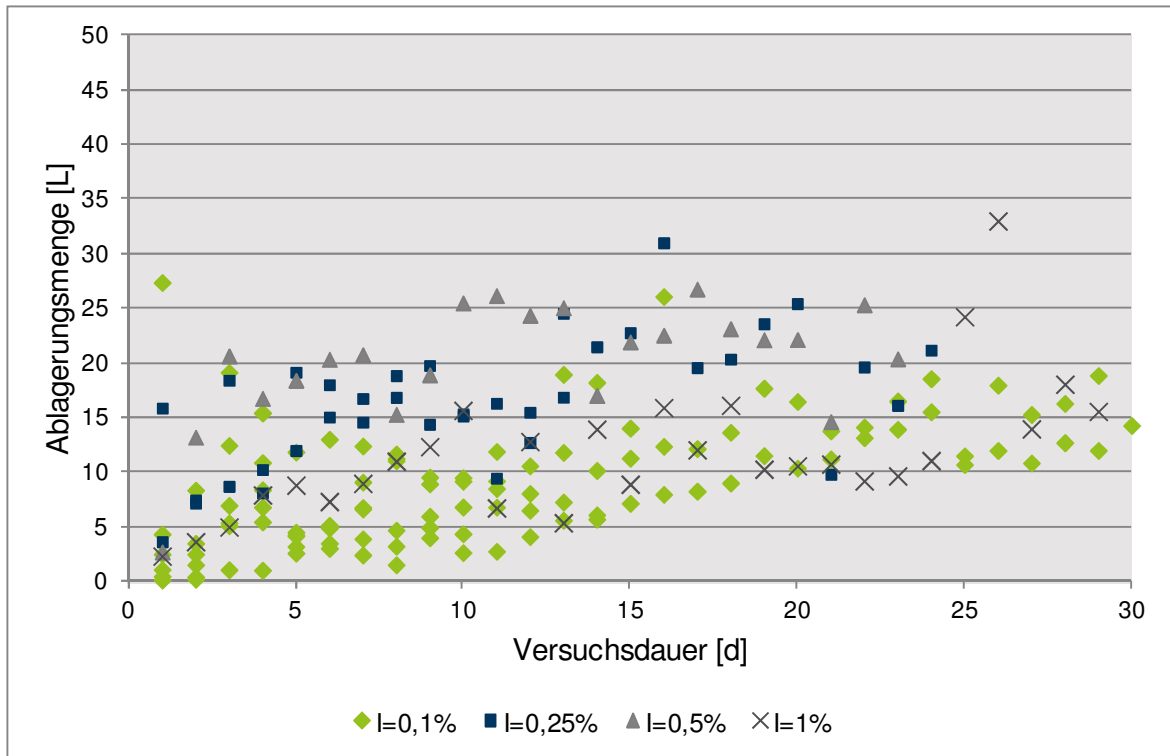


Abbildung 58: Entwicklung der Menge aller Ablagerungen im Testrohr bei unterschiedlichen Rohrgefällen (Versuchsreihen 11, 13-18, 20 und 21, $Q=2$ L/s, $k_s=0,4$ mm)

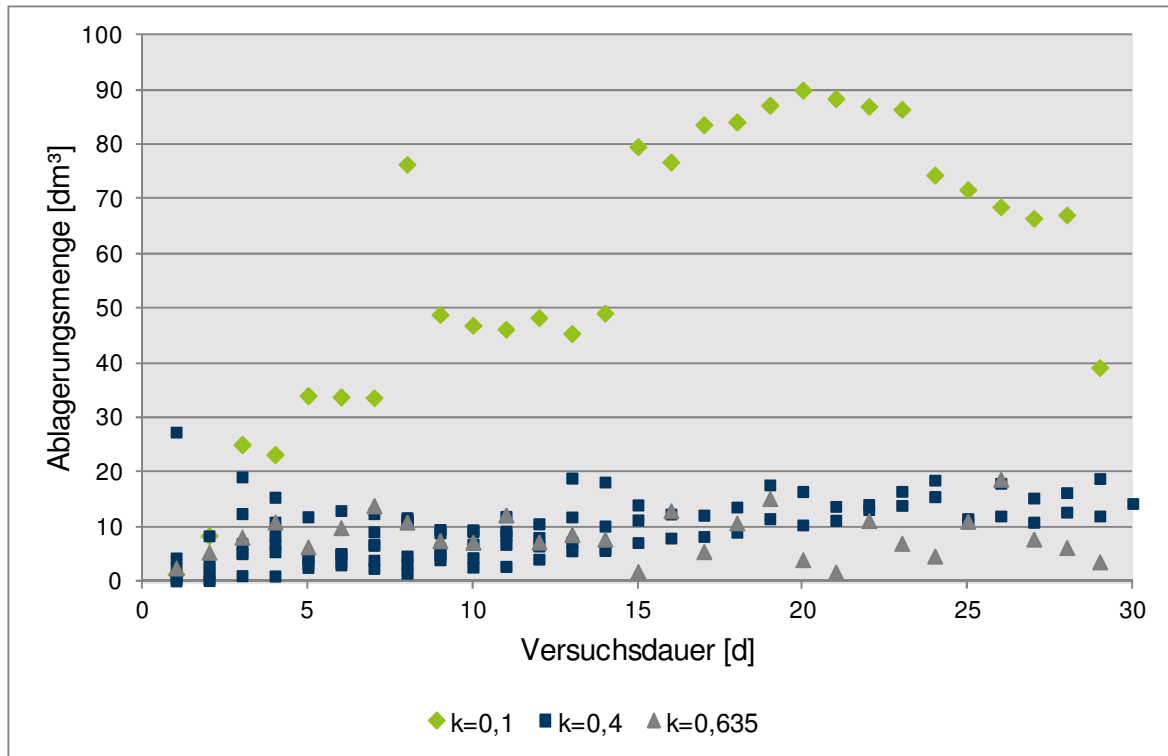


Abbildung 59: Entwicklung der Menge aller Ablagerungen im Testrohr bei unterschiedlichen äquivalenten Sandrauheiten (Versuchsreihen 11, 13, 14, 16, 17, 20 und 26-27, $Q=2$ L/s, $I_s=1$ ‰)

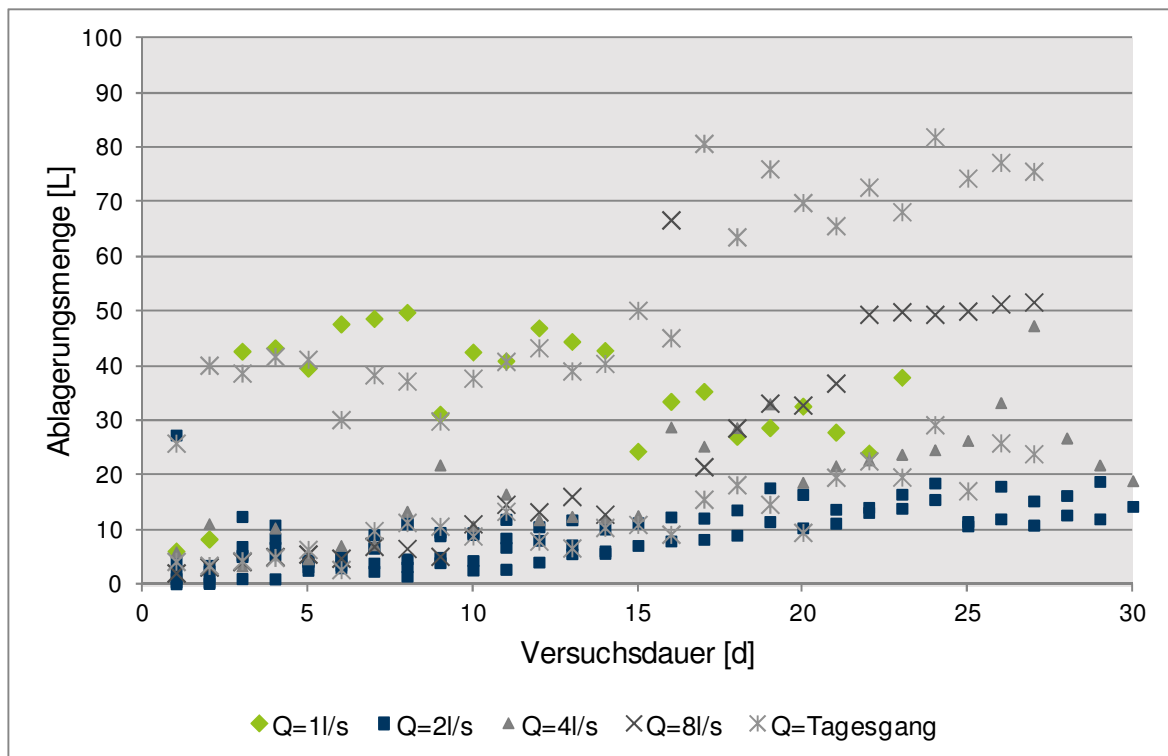


Abbildung 60: Entwicklung der Menge aller Ablagerungen im Testrohr bei unterschiedlichen Abflussmengen (Versuchsreihen 11, 13, 14, 16, 17, 19, 20, 22, 23, 25 und 31, $I_s=1$ ‰, $k_s=0,4$ mm)

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 $Q=2$ L/s wurden Versuchsreihen mit

$Q=1$ L/s, $Q=4$ L/s und $Q=8$ L/s sowie einer Tagesganglinie, deren Mittelwert $Q=2$ L/s entsprach, durchgeführt. Die größten Ablagerungsmengen bildeten sich bei diesen Versuchen bei der Versuchsreihe mit $Q=1$ L/s (Abbildung 60). 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.

5.2.3 Einflussfaktor Rauheit und Durchfluss

Um den Einfluss auf die Ablagerungsbildung bei der eingesetzten Natursteinfliese besser quantifizieren zu können, wurden in den Versuchsreihen 42-47 jeweils Sandpapiere mit einer äquivalenten Sandrauheit von 0,4 und 0,635 mm der Natursteinfliese gegenübergestellt. Zunächst wurden die Rohre in den Versuchsreihen 42-44 mit einem konstanten Volumenstrom von 2 L/s für 28 Tage beschickt. Diese Ergebnisse sind in Abbildung 61 dargestellt.

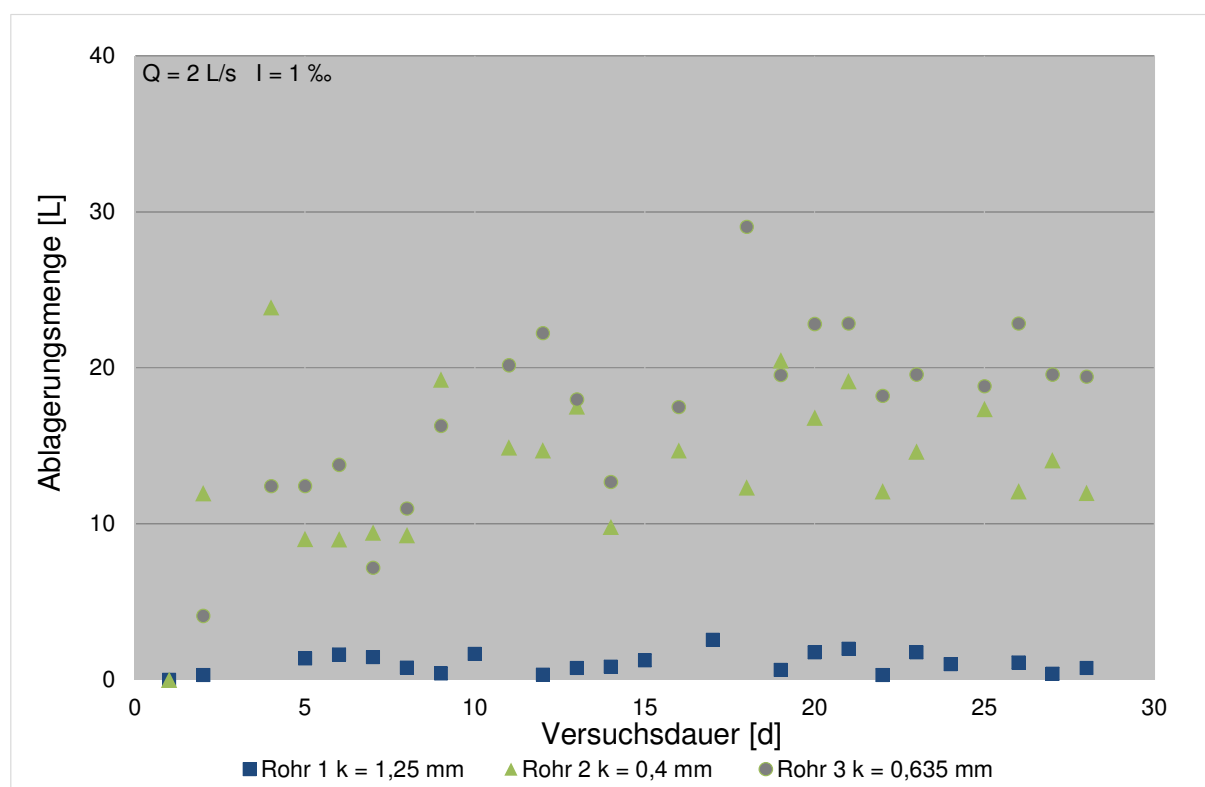


Abbildung 61: Entwicklung der Menge aller Ablagerungen im Testrohr bei unterschiedlichen Oberflächenstrukturen (Versuchsreihen 42-44, $I_s=1$ ‰, $Q=2$ L/s)

Deutlich zu erkennen ist, dass sich in den ersten zehn Tagen nach Versuchsbeginn bei beiden Sandpapieren eine Ablagerungsmenge von 17 ± 2 L einstellt. Währenddessen bei der Natursteinfliese Ablagerungsmengen von maximal 2 L festzustellen sind.

Zu erkennen ist zudem, dass die täglichen Schwankungen in allen drei Fällen nach etwa 20 Tagen nachlassen. Während zu Beginn bei den beiden Sandpapieren zum Teil eine Verdopplung oder Halbierung der Ablagerungsmengen gemessen wurde, konnte zum Ende der Versuche maximale Veränderung von 30% festgestellt werden. In absoluten Zahlen sind dies zu Beginn bis zu zehn Liter, während es zum Ende der Versuchsreihe noch vier Liter pro Tag sind. Dies ist einer zunehmend ausgeprägten Sielhaut zuzuschreiben. Zusätzlich setzen sich die Zwischenräume mit zunehmender Versuchsdauer mit kleinen Sandpartikeln zu, wodurch ein Anhaften weiterer Faserstoffe am Sandpapier verhindert wird.

Auf Grundlage der bisherigen Ergebnisse mit einem konstanten Abfluss wurde im Anschluss ein Tagesgang zwischen 0,7 und 4 L/s programmiert, welcher im Durchschnitt ein Q von 2 L/s hatte. Der Durchfluss wurde so gewählt, dass die Zeitdauer des geringsten Abflusses mit 0,7 L/s genauso so lang war wie der maximale Abfluss mit 4 L/s.

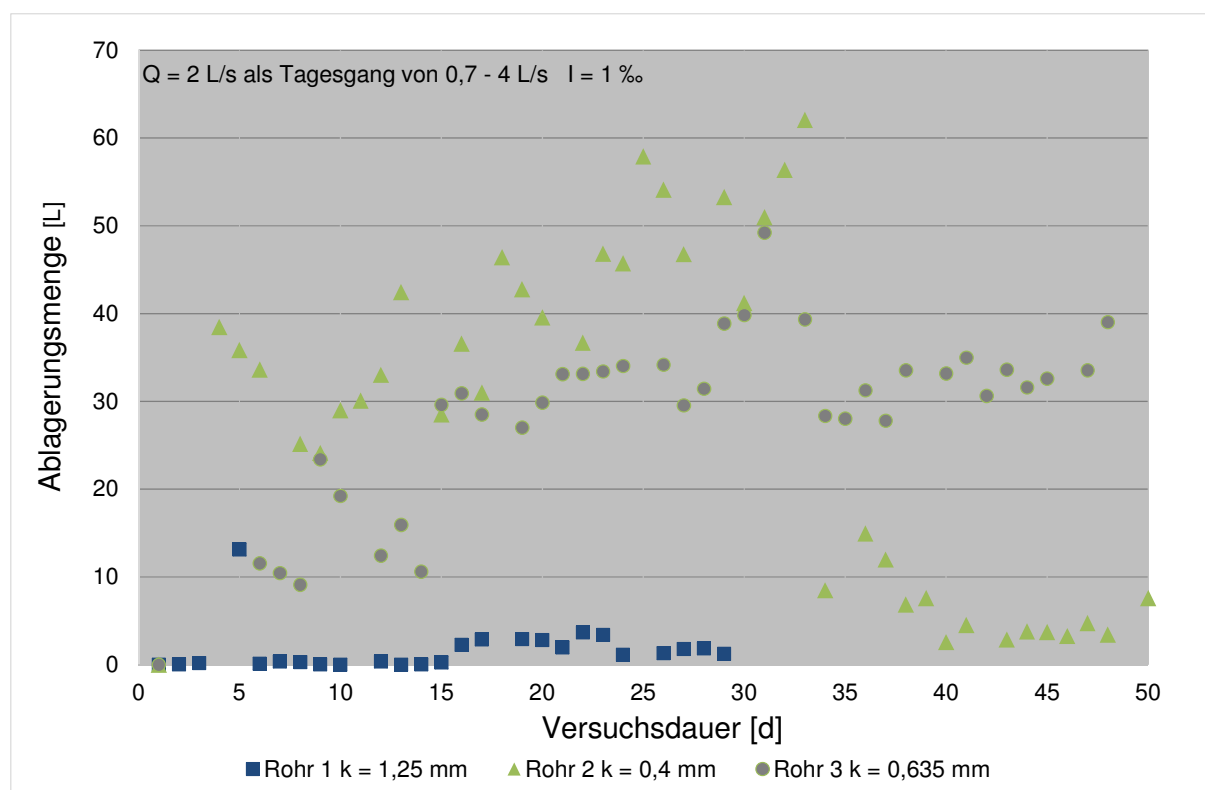


Abbildung 62: Entwicklung der Menge aller Ablagerungen im Testrohr bei unterschiedlichen Anfangsrauheiten und einem angepassten Q (Versuchsreihen 45-47, $I_s=1$ ‰, $Q=2$ L/s als Tagesgang von 0,7 bis 4 L/s)

Bei Betrachtung der erzeugten Ablagerungsmengen lässt sich wiederum ein deutlicher Unterschied zwischen den Sandpapieren und der Natursteinfliese erkennen (Abbildung 62). Während bei den Sandpapieren Ablagerungsmengen von bis zu 60 L festgestellt wurden, lagen diese bei der Natursteinfliese lediglich bei maximal drei Litern. Eine Verschiebung von zweier Natursteinfliesen führte dabei lediglich zu einer

marginalen Erhöhung der Ablagerungen. Im Vergleich zu den entstehenden Ablagerungen bei den untersuchten Sandpapieren können diese jedoch vernachlässigt werden. An Versuchstag 29 lösten sich weitere Teile der Fliesen, welche sich nicht wieder an den vorgesehenen Orten befestigen ließen, weshalb hier die Versuchsreihe vorzeitig abgebrochen wurde.

Die beiden mit Sandpapier ausgeklebten Rohre zwei und drei wurden über den gesamten Versuchszeitraum betrieben. Wie auch schon bei der vorherigen Versuchseinstellung mit einem konstanten Durchfluss, waren in beiden Rohren deutliche Ablagerungsmengen festzustellen. Während sich bei einer Sandrauheit von 0,635 mm nach etwa 15 Tagen ein nahezu konstanter Wert von 30 ± 2 L einstellte, stiegen die Ablagerungsmengen bei einer Rauheit von 0,4 mm kontinuierlich weiter an. Der maximal gemessene Wert lag nach 33 Tagen bei über 60 Litern und ist damit mehr als doppelt so groß wie mit einem konstanten Q von 2 L/s. Was jedoch bei beiden Sandpapieren sehr deutlich auffällt, ist der starke Abfall der nach Tag 33. Während sich die Ablagerungsmengen in Rohr 2 wiederum auf 30 Liter einpendelten, fielen die Ablagerungsmengen in Rohr 3 ohne ersichtlichen Grund bis auf unter 10 L ab. In den darauffolgenden Tagen war eine fortlaufende Entwicklung zu beobachten. Abschließend lagen die Ablagerungen mit etwa 5 Litern annähernd im Bereich der Natursteinfliese.

Bei der Natursteinfliese lag die maximale Ablagerungsmenge bei vier Litern. Der an Versuchstag fünf auftretende Messpunkt von 13 L ist durch einen Messfehler bei der Aufnahme der Ablagerungshöhen zu erklären. An diesem Tag sind alle Messpunkte um ziemlich genau 20 mm nach oben verschoben, obwohl auf den Aufnahmen der Rohrabschnitte keine Veränderung im Ablagerungsbild zu erkennen ist. Des Weiteren löste sich an Versuchstag 15 eine Fuge annähernd in der Mitte des Versuchsrohrs. Der hieraus resultierende Versatz von ca. 15 mm spiegelte sich leicht in den Ablagerungsmengen wieder.


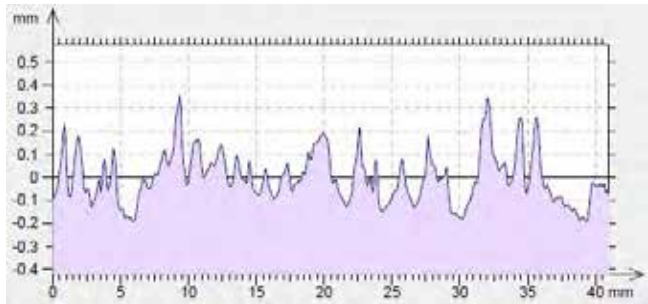
Ein Grund für die erhöhten Ablagerungsmengen könnte sein, dass das verwendete Abwasser an der Entnahmestelle über den Versuchszeitraum eine annähernd gleiche Stoffzusammensetzung hatte. Hierdurch wurden bei höheren Abflüssen mehr Ablagerungen in das Versuchsrohr eingetragen, welche bei geringeren Abflüssen sedimentierten. Zwar können gewisse Schwankungen im Zulauf beobachtet werden, jedoch befindet sich an der Entnahmestelle immer eine annähernd konstante Sedimentschicht. Lediglich bei stärkeren Regenereignissen findet eine deutliche Remobilisierung statt, was dazu führt, dass auch im Abwasser größere Mengen Sediment zu finden sind. Deutlich sichtbar wird dies während der Versuchsreihe mit einem Tagesgang. Um Tag 30 herum führte ein längeres Regenereignis ebenfalls zu einer Erhöhung aller Ablagerungsmengen, welche in den darauffolgenden Tagen wieder abgebaut wurden. Die deutlich erhöhten Ablagerungsmengen in den beiden



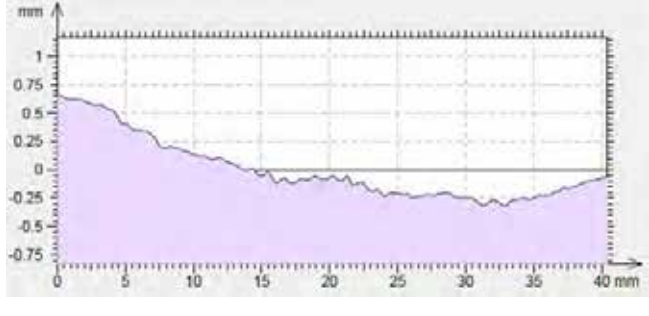
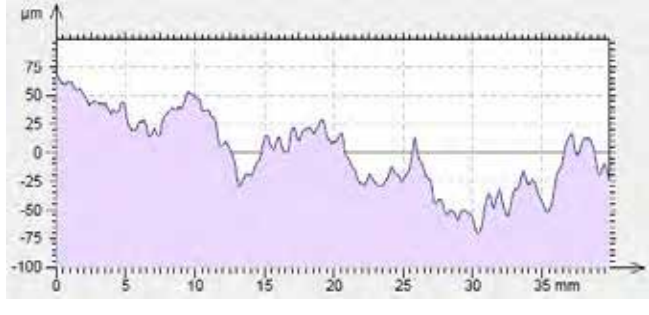
Versuchsrohren mit Sandpapier lassen sich vermutlich durch die erhöhten Feststoffkonzentrationen bei erhöhten Abflüssen erklären. Hierdurch sind zudem auch die Schieber weitergeöffnet, was auch größeren Partikeln ermöglicht, in die Versuchsrohre zu gelangen. Diese können bei anschließenden geringen Durchflüssen nicht remobilisiert werden, weshalb die Ablagerungsmenge insgesamt zunimmt.

5.2.4 Zusammenfassung für den Faktor Rauheit

Da sich bei den durchgeführten Versuchsreihen deutliche Unterschiede bei der Ablagerungsentstehung und -menge zwischen den bisher genutzten Sandpapieren und der Natursteinfliese zeigten, wurde versucht, hierfür eine Begründung zu finden. Da es nicht möglich war die äquivalente Sandrauheit der Natursteinfliese zu bestimmen, wurden zunächst weitere Aufnahmen mit dem schon zuvor genutzten Texturmessgerät der Firma GF Messtechnik GmbH erstellt, um eine möglichst große Vergleichbarkeit verschiedener Materialien zu erreichen. Untersucht wurden das ebenfalls genutzte Sandpapier mit einer äquivalenten Sandrauheit von $k = 0,4 \text{ mm}$, sowie drei Proben, die vom IKT bereitgestellt wurden. Dabei handelte es sich um ein Steinzeugrohr, ein mehrere Jahrzehnte altes Betonrohr und einem neuen Inliner, welcher in einem KG-Rohr verbaut wurde. Ergebnisse sind in der Tabelle 23 aufgeführt. Neben der visuellen Oberflächenbeschaffenheit sind zudem die mittlere Rauheit (R_a) und die mittlere quadratische Rauheit (R_q) angegeben.

Tabelle 23: Überblick über verschiedene Oberflächenprofile. Die ersten drei Aufnahmen stellen die Versuchsmaterialien dar. Zusätzlich sind drei Originalproben des IKTs untersucht worden.

Material/ Sandrauheit	Oberflächenbeschaffenheit	R_a [mm]	R_q [mm]
Natursteinfliese geschätzt zu 1,25 mm		$0,86 \pm 0,12$	$0,65 \pm 0,12$
Sandpapier P = 40 0,635 mm		$0,10 \pm 0$	$0,13 \pm 0$

Sandpapier P = 60 0,40 mm		$0,05 \pm 0$	$0,07 \pm 0$
Beton (alt) geschätzt zu 1,00 mm		$0,26 \pm 0,18$	$0,32 \pm 0,20$
Inliner		$0,43 \pm 0,14$	$0,53 \pm 0,15$
Steinzeug geschätzt zu 0,40 mm		$0,19 \pm 0$	$0,22 \pm 0$

Bei der Auswertung der Oberflächenbeschaffenheiten fällt zunächst auf, dass die Natursteinfliese durch die ausgeprägte Fugenstruktur in ihrer Rauheit deutlich von den anderen Materialien abweicht. Zusätzlich fließt bei den Proben des IKTs zum Teil die Materialkrümmung mit in das Untersuchungsergebnis ein. Besonders deutlich wird dies bei der Probe des Inliners. Hier ist die Krümmung auch in der Oberflächenbeschaffenheit gut zu erkennen, während die eigentliche Inlinerstruktur kaum zu erkennen ist. Dennoch lassen sich durch die Aufnahmen gute Rückschlüsse auf die zu Beginn herrschenden Rauheiten ziehen.

Wie auch aus den Versuchen deutlich wird, sind vor allem Rauheiten mit dritter und vierter Ordnung kritisch für eine anfänglich starke Ablagerungsbildung (vgl. Seite 87 ff). Die zum Teil festgestellte Tendenz, dass mit sinkender Rauheit trotzdem erhöhte Ablagerungsmengen entstehen, könnte hierdurch erklärt werden. An den sehr dicht aneinander liegenden Erhöhungen dritter und vierter Ordnung könnten dann, ähnlich wie bei einem Klettverschluss, Faserstoffe schnell und dauerhaft anhaften. Im direkten Vergleich von Sandpapier und Natursteinfliese fehlen hier diese Anhaftungspunkte vollständig. Hierdurch können gerade zu Beginn keine größeren Ablagerungshöhen im Rohr entstehen, sondern es setzen sich direkt kleine Sedimente in den Zwischenräumen ab. Diese vergleichmäßigen die Oberfläche noch weiter, weshalb kaum bis gar keine Ablagerungen im Versuchsrohr festgestellt werden konnten. Mit zunehmender Versuchsdauer spielt dann, wie auch in der Literatur beschrieben, das Biofilmwachstum eine wichtige Rolle. Aus diesem Grund kommt es dann auch bei der Natursteinfliese zu einer Ablagerungsbildung bei längeren Versuchsreihen. Dennoch liegen diese deutlich unter denen der eingesetzten Sandpapiere.

5.2.5 Zusammenfassung für den Faktor Abfluss und Abwasserzusammensetzung

Wie schon in den Versuchen in Phase I spielt die Abwasserzusammensetzung eine entscheidende Rolle bei der Ablagerungszusammensetzung. Für die Versuchsanlage auf der Kläranlage Bochum-Ölbachtal wurde das Abwasser kurz vor dem Rechengebäude entnommen. Hier ist mit der größten Feststofffracht im Einzugsgebiet zu rechnen. Bei einer Breite des Abwasserkanals von 3 m und einer durchschnittlichen Wassertiefe von 0,6 m bei Trockenwetter ist die Position des Entnahmeschlauches ein wichtiger Faktor auf die Abwasserzusammensetzung. Hinzu kommt, dass das Gerinne im Ölbachtal einen Trapezquerschnitt hat, wodurch sich vor allem in der Mitte des Gerinnes große Mengen von mineralischen Feststoffen befinden. Dabei ist der mineralische Anteil bei der untersuchten Kläranlage im Durchschnitt mit 300 t/a Sandfanggut mit anderen Kläranlagen vergleichbar.

Ein weiteres Phänomen während der Versuche waren Verzopfungen in den Vorlagebehältern, die sich an PVC-Zulaufschläuchen bildeten. Diese nahmen zum Teil ein Volumen von über zehn Litern an und wurden wenn möglich entfernt. Es ist jedoch davon auszugehen, dass diese zum Teil auch durch die Versuchsrohre flossen und so einen Teil des Sediments mit aus dem Rohr drücken. Festgestellt werden konnte dies vor allem an deutlichen Schleifspuren in der Sielhaut der Versuchsrohre. Es war zudem möglich, dieses Ereignis auf Video festzuhalten. Dabei führte dieser Faserstoffballen zu einem deutlichen Aufstau von Abwasser, durch welches die Faserstoffe nach und nach aus dem Rohr ausgetragen wurden. Nachdem diese

Faserstoffballen aus dem Versuchsrohr ausgetragen wurde, kam es im Anschluss zu einer Art Schwallspülung. Bei einer anschließenden Kontrolle der Ablagerungen, konnte allerdings keine große Veränderung festgestellt werden. Da zudem die tägliche Messung der Ablagerungshöhen bereits mehrere Stunden zurück lag, konnte dementsprechend kein genauer Zusammenhang zwischen der Spülung und einer Ablagerungsaustragung gezogen werden. Hinzu kommt, dass die Versuchsreihe 46 bereits 27 Tage lief, wodurch sich eine weitestgehend einheitliche Sedimentschicht aus feinem Sand aufgebaut hatte. Diese ist deutlich unempfindlicher gegenüber einer abrasiven Kraft im Vergleich zu Beginn einer Versuchsreihe. Hier würden anhaftende Faserstoffe sehr wahrscheinlich durch das Voranschieben der Faserstoffe mitgerissen werden und somit eine gewisse Selbstreinigung verursachen.

Für die eigentliche Ablagerungsbildung in Abwasserkanälen spielen bei Trockenwetter die Abflussmengen in den Testrohren eine untergeordnete Rolle. Zwar lässt sich grundsätzlich mit steigendem Abfluss die Tendenz von erhöhten Ablagerungsmengen feststellen, was sich hauptsächlich mit der erhöhten Stofffracht im Versuchsrohr erklären lässt. Aus diesem Grund nimmt auch die Ablagerungsmenge während Regenereignissen in den Rohren zu. Durch die erhöhten Fließgeschwindigkeiten im Kanal sind auch an der Sohle mehr Schwebstoffe in Bewegung, die anschließend in die Rohre gelangen können. Bei den Versuchen mit einem Tagesgang konnten in den Rohren mit Sandpapier die höchsten Ablagerungsmengen festgestellt werden, obwohl im Tagesdurchschnitt 2 L/s durch die Rohre geleitet wurden. In Abbildung 63 sind exemplarisch vier Versuchsreihen mit Abflüssen von zwei bis acht Litern pro Sekunde sowie einem Tagesgang aufgeführt. Im Vergleich zu den Versuchen in Phase I wurde die Rauheit von 0,4 auf 0,635 mm erhöht und das Gefälle mit einem Promille konstant gehalten. Insgesamt konnten die Ergebnisse aus Phase I weitestgehend bestätigt werden. Die leicht reduzierten Ablagerungsmengen lassen sich zum einen durch die Erhöhung der Rauheit und zum anderen durch allgemeine Schwankungen in der Abwasserzusammensetzung erklären. Auffällig sind bei Versuchen mit Sandpapier und Tagesganglinie die enormen Ablagerungsmengen. Hier liegen die gesamten Ablagerungsmengen noch über denen von Versuchen mit Abflüssen von 8 L/s.

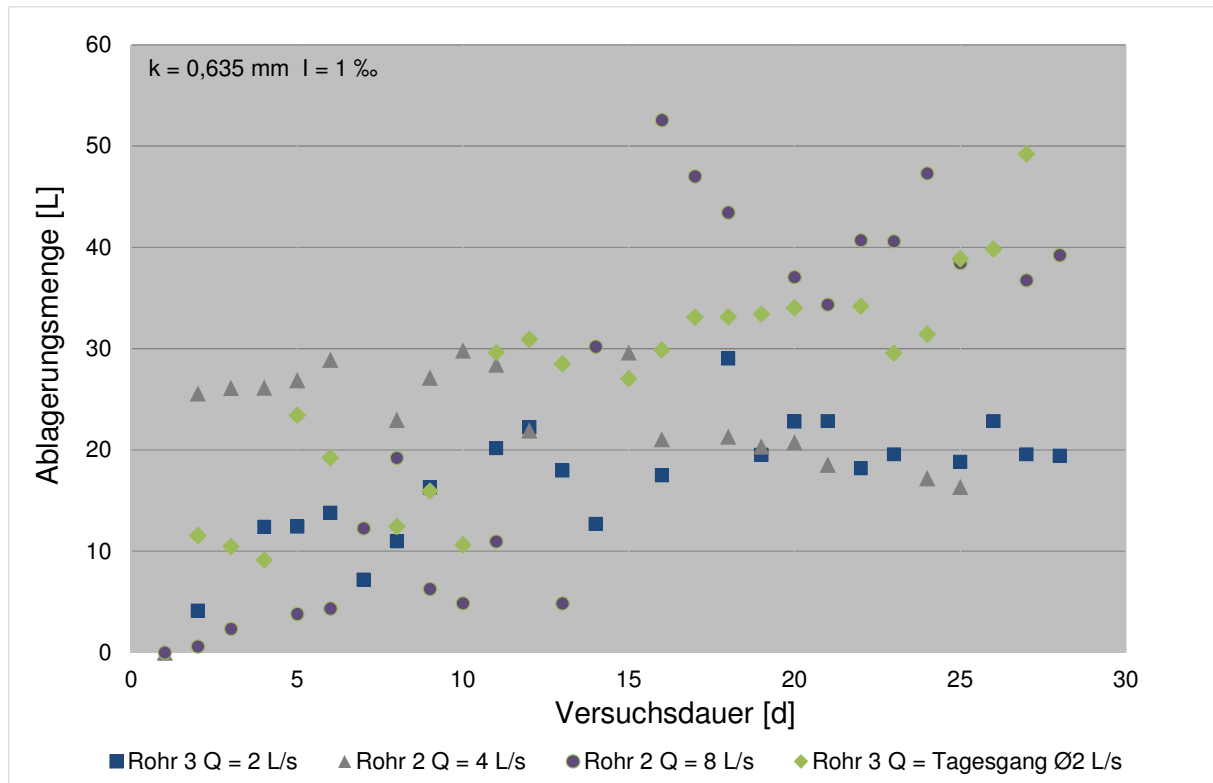


Abbildung 63: Ablagerungsmengenentwicklung durch unterschiedliche Beschickungsmengen (Versuchsreihe 33, 37, 43, 47 $k_s=0,635 \text{ mm}$, $l_s=1 \text{ ‰}$). Mit zunehmender Zuflussmenge in die Versuchsrohre nimmt auch die Ablagerungsmenge in den Rohren zu.

Zur genaueren Betrachtung der Fließzustände im Versuchsrohr werden im Folgenden die aus den beschriebenen Randbedingungen resultierenden Geschwindigkeiten und Randschubspannungen genauer betrachtet. Hierzu sind in Tabelle 24 sowohl die erforderlichen Randbedingungen, als auch die berechneten Ergebnisse aufgeführt. Es sind jeweils die Mittelwerte für eine Versuchsreihe sowie deren Standardabweichung mit aufgenommen.

Tabelle 24: Übersicht über die aus den Ablagerungshöhen berechneten mittleren Geschwindigkeiten und deren Standardabweichung

Ver- suchs- reihe	Datum	Dauer	Gefälle	Durch- fluss	Sandrau- heit	Mittelwert der Geschwindig- keit	Mittelwert Ablage- rungsme- nge
[-]	[Monat/Jahr]	[d]	[‰]	[L/s]	[mm]	[m/s]	[L/m]
32	07/14	25	1	2	0,635	0,50 ± 0,19	0,8
33	07/14	25	1	4	0,635	0,50 ± 0,04	5,6
34	07/14	25	5	2	0,635	0,41 ± 0,07	2,4
35	08-10/14	76	1	2	1,25	0,54 ± 0,20	1,4
36	08/14	28	10	2	0,635	0,25 ± 0,03	1,3
37	08/14	28	1	8	0,635	0,46 ± 0,04	2,7
38	09/14	28	1	2	0,635	0,63 ± 0,08	0,9
39	09/14	28	1	2/1-4	0,635	0,22 ± 0,02	1,7
40	10/14	28	1	2	0,4	0,33 ± 0,07	0,9
41	10/14	28	1	1-5	0,635	0,30 ± 0,03	1,2
42	11/14	28	1	2	0,4	0,19 ± 0,03	1,4
43	11/14	28	1	2	0,635	0,29 ± 0,12	1,7
44	11/14	28	1	2	1,25	0,21 ± 0,03	0,1
45	02-03/15	50	1	1-4	1,25	0,27 ± 0,09	0,2
46	02-03/15	50	1	1-4	0,4	0,16 ± 0,07	2,7
47	02-03/15	50	1	1-4	0,635	0,22 ± 0,08	2,9
48	04/15	28	1	2	1,25	0,08 ± 0,01	4,2
49	04/15	28	1	2	0,4	0,08 ± 0,01	4,5
50	04/15	28	1	2	0,635	0,10 ± 0,01	5,4

Bei Betrachtung der Ergebnisse liegen nahezu alle mittleren Geschwindigkeiten unterhalb des Grenzwertes von 0,49 m/s (DWA-A 110) für einen ablagerungsfreien Kanal. Dabei liegt die Durchschnittsgeschwindigkeit über alle Versuche bei etwa 0,3 m/s. Die Betrachtung der Standardabweichung zeigt außer für die Versuchsreihen 32, 35 und 45 Abweichungen von unter zehn Prozent. Bei diesen Reihen ist der Mittelwert und

Median nahezu übereinstimmend, weshalb auch hier größere Ausreißer ausgeschlossen werden können. Als abschließendes Fazit lässt sich feststellen, dass wie bei der Natursteinfliese ersichtlich wird, auch bei geringen Geschwindigkeiten ein nahezu ablagerungsfreier Zustand festgestellt werden kann. Zusätzlich zeigen die Versuchsreihen 48-50 mit einem Hindernis, wie deutlich sich solche Ereignisse auf die Fließzustände im Kanal auswirken können.

Die Abwasserzusammensetzung wurde während der Versuche nicht separat analysiert, da sie im Hinblick auf die Feststoffzusammensetzung sehr heterogen ist und zum Beispiel Textilstoffe schwer analysierbar sind. Der Einsatz von Onlinemesstechnik ist nicht sinnvoll, da diese nur in gewissen Abständen messen und deshalb punktuelle Feststofffrachten nicht erfasst werden. Lediglich die Parameter pH-Wert und Leitfähigkeit werden an der Entnahmestelle von der Kläranlage in einem Sekundenintervall erfasst und können für die Auswertung genutzt werden. Weitere Zulaufparameter werden von der Kläranlage Ölbachtal nur im wöchentlichen Rhythmus analysiert und sind deshalb für die Versuchsanlage nicht weiter zielführend. Allerdings wird der CSB in homogenisierter Form fast täglich im Zulauf der Belebung bestimmt. Nach ATV-DVWK-A-131 (2000) sind diese Werte etwa 25 % geringer im Vergleich zu den Zulaufwerten. Deshalb werden hier diese Werte mit einem Zuschlag von 33 % verwendet. Durchschnittlich haben sich die Trockenwetterzuflüsse der Kläranlage Bochum-Ölbachtal im Vergleich zu Phase I nicht verändert. Diese liegen weiterhin bei etwa 43000 m³/d. Über die gesamte Projektlaufzeit waren kaum Veränderungen festzustellen. In Tabelle 25 sind die berechneten CSB-Konzentrationen für den Zulauf aufgetragen. Hier liegen die durchschnittlichen Trockenwetterkonzentrationen bei 410 g/m³. Dies entspricht einer Einwohnerspezifischen Schmutzfracht von ca. 104 g_{CSB_{hom}}/(EW*d) bei 180000 angeschlossenen Einwohnerwerten (Stand 2013, ELWAS-WEB). Diese Werte liegen unterhalb der Angabe in ATV-DVWK-A-131 (2000) von 120 g_{CSB_{hom}}/(EW*d).

Tabelle 25: Zulaufdaten zur Kläranlage Bochum-Ölbachtal über den Versuchszeitraum von Phase II

	Zulauf Kläranlage Ölbachtal [m ³ /d]	CSB _{homogenisiert} [g/m ³]
Median aller Messwerte	50000	350
Mittelwert für Trockenwetter (Q < 50000 m³/d)	42000	435
Minimalwert	35600	100
Maximalwert	170000	650

Der Zulauf konnte nicht nur durch den chemischen Sauerstoffbedarf, sondern auch durch die Leitfähigkeit und den pH-Wert beschrieben werden. Der pH-Wert lag mit ca. 8,0 im neutralen Bereich und hatte deshalb keinen größeren Einfluss auf die Ablagerungsbildung oder -charakteristik. Aus diesem Grund wird im Folgenden nur auf die Leitfähigkeit genauer eingegangen. Regenwetterereignisse konnten deutlich erkannt werden, da die Leitfähigkeit im Regenwetterfall von ca. 1,5 auf etwa 0,2 mS/cm abfällt. Des Weiteren kann so die Dauer und Intensität recht genau analysiert werden. Über den gesamten Versuchszeitraum lag die Leitfähigkeit im Zulauf zur Kläranlage in einem Bereich von 0,25 bis zu 4,9 mS/cm, wobei es sich bei den 4,9 mS/cm um Zulaufspitzen durch Streusalz handelte. Ein normaler Trockenwetterwert lag bei etwa 1,5 mS/cm und damit vergleichbar mit anderen Kläranlagen ohne größeren Industrieanteil. Als Schwellenwert für Regenwetter wird hier ein Wert von 1,1 mS/cm und für Starkregen von unter 0,5 mS/cm angenommen. Bei 150 Messungen trat ein Wert von unter 1,1 mS/cm 30 mal und ein Wert unter 0,5 mS/cm 6 mal auf. Dies entspricht einer Häufigkeit von ca. 30 %. Damit ist kein großer Unterschied zwischen den Regenereignissen im Sommer im Vergleich zu den Wintermonaten festzustellen. Des Weiteren konnten durch schwache Regenereignisse keine großen Veränderungen der Ablagerungen festgestellt werden. Entscheidend sind starke Regenereignisse, die auf eine längere Trockenperiode folgen. In diesem Fall werden größere Mengen Schmutzfracht in den Kanal eingespült und in den Kanalrohren wieder gefunden.

5.2.6 Ablagerungsbildung durch Hindernisse

Exemplarisch wurden Versuchsreihen mit je einem Hindernis in den Versuchsrohren durchgeführt. Hierfür wurde ein 11 x 11 x 7 cm großer Kalksandstein mittig in das Versuchsrohr gelegt. Als Randbedingungen wurden wieder ein Abfluss von 2 L/s und

ein Gefälle von 1 ‰ gewählt. Wie schon in den vorherigen Versuchsreihen wurde zudem der Einfluss der drei verschiedenen Wandrauheiten von 0,4 bis ca. 1,25 mm betrachtet. Bei einer gesamten Versuchsdauer von 28 Tagen wurden die Hindernisse nach 17 bzw. 18 Tagen entfernt. Zum einem bildeten sich derart große Ablagerungsmengen vor den Hindernissen, dass den Rohren Schaden drohte, zum anderen konnte so untersucht werden, ob es reicht, ein Hindernis zu entfernen oder ob eine komplette Reinigung erforderlich wird.

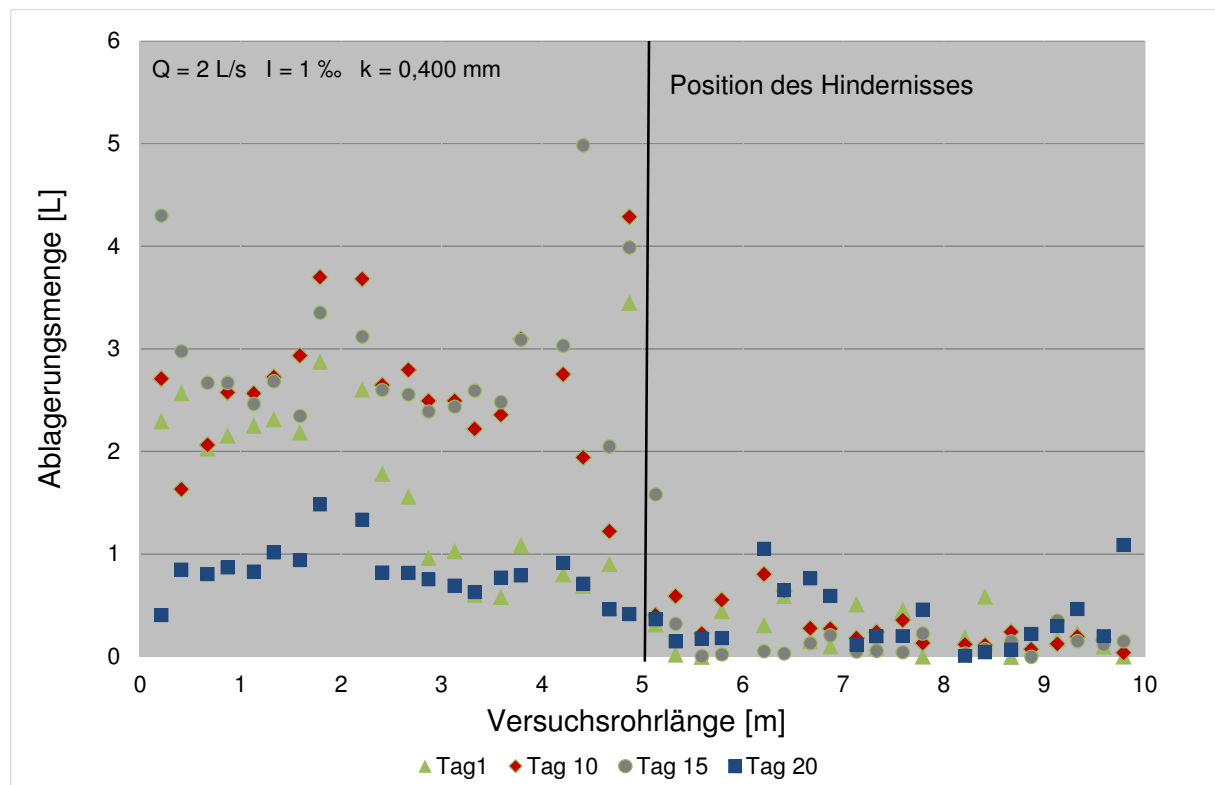


Abbildung 64: Entstehung von Ablagerungen in Versuchsrohr 2 ($k=0,4$ mm) durch ein Hindernis bei Meter fünf (Versuchsreihe 49, $I_s=1$ ‰, $Q=2$ L/s). Zu erkennen sind die erhöhten Ablagerungen vor dem Hindernis, während darauffolgend nahezu keine Ablagerungen vorhanden sind. Tag 20 zeigt die Ablagerungsmengen nach Entfernen des Hindernisses

Abbildung 64 zeigt zunächst den Verlauf der Ablagerungsbildung in Versuchsrohr 2 mit einer Sandrauheit von 0,4 mm über die gesamte Rohrlänge von zehn Metern. Gut zu erkennen ist das mittig platzierte Hindernis, vor dem sich ein Großteil der Ablagerungen im Rohr bildet. Diese nahmen, mit bis zu 10 Liter Ablagerungen pro Meter bereits nach einem Tag deutliche Ausmaße an. Wie Abbildung 64 weiter zu entnehmen ist, pendeln sich die Ablagerungen nach etwa zehn Tagen auf ein nahezu konstantes Niveau von 15 L/m ein. Unterhalb des Hindernisses konnten nur einzelne Faserstoffablagerungen festgestellt werden, welche jeweils unter einem Liter pro Meter lagen. Wie schon in den vorhergegangenen Untersuchungen fehlten diese Ablagerungen in Rohr 1 (Natursteininfliese) komplett, sodass sich hier die Ablagerungsbildung auf den Abschnitt oberhalb des Hindernisses beschränkte.

Die Ablagerungsbildung verlief dabei in allen drei Versuchsrohren identisch. Zunächst verfangen sich an dem Stein größere Faserstoffe und Hygieneartikel. Gut zu erkennen war, dass an der Ablagerungsmengenspitzen kurz von dem Hindernis bei Meter vier bis fünf. Diese führten zu einer Verlangsamung der Fließgeschwindigkeit im Versuchsrohr und somit zu einem Anstieg des Füllstands. Im Folgenden kam es zu einer schnellen Sedimentation von mitgeführten Schwebstoffen, die einen Großteil der Ablagerungsmenge ausmachten.

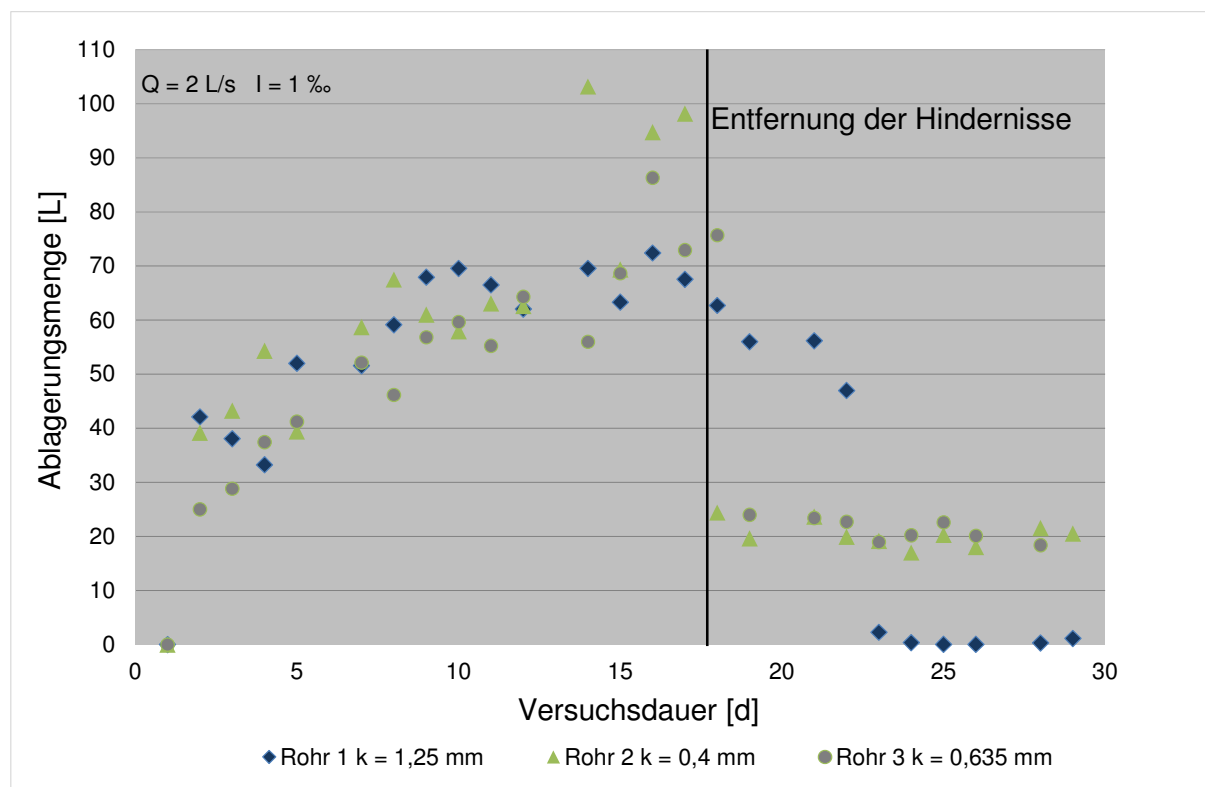


Abbildung 65: Ablagerungsmengen über den Versuchszeitraum von 28 Tagen in den drei Versuchsrohren (Versuchsreihe 49, $I_s=1 ‰$, $Q=2 \text{ L/s}$). An Tag 17 bzw. 18 wurden die Hindernisse aus den Versuchsrohren entfernt. Im Anschluss stellten sich ähnliche Ablagerungsmengen wie ohne ein Hindernis ein

Zusätzlich sind in Abbildung 65 die Ablagerungsmengen über die Versuchsdauer von 28 Tagen für alle drei Versuchsrohre dargestellt. Gut zu erkennen ist hier der schnelle Anstieg der Ablagerungsmengen innerhalb der ersten Versuchswoche. In Versuchsrohr eins und zwei nehmen die Ablagerungen innerhalb eines Tages deutlich ab und verteilen sich, wie aus der vorherigen Abbildung 64 an Tag 20 deutlich wird, gleichmäßig im Versuchsrohr. Im Vergleich zu den anderen beiden Rohren hatten sich die Ablagerungen im Rohr mit der Natursteinfliese bereits soweit verfestigt, dass sich diese nicht mehr ohne äußere Einwirkung lösten. Deshalb wurden an Versuchstag 22 die Ablagerungen von den Rändern gelöst, wodurch diese sowie der Rest der Ablagerungen innerhalb von Minuten aus dem Versuchsrohr ausgetragen wurden. In den Versuchsrohren mit den Sandpapieren stellten sich ohne weiteres Einwirken die gleichen Ablagerungsmengen wie auch in den anderen Versuchsreihen ein. Die gesamten

Ablagerungsmengen waren dabei identisch zu den vorhergegangenen Versuchsreihen mit identischen Randbedingungen. Die Ablagerungsmengen lagen hier ebenfalls in Summe über das gesamte Versuchsrohr (10 m) bei etwa 20 Litern für Sandpapiere und für die Natursteinfliese bei nahezu null.

Insgesamt lässt sich feststellen, dass Hindernisse einen erheblichen Einfluss auf die Ablagerungsbildung haben. Es wurde ein recht großes Hindernis gewählt, um einen eventuellen Austrag aus dem Versuchsrohr zu verhindern. Allerdings können auch kleinere Hindernisse schon zu einer deutlichen Behinderung des Abflusses in Abhängigkeit zum Rohrquerschnitt führen. Bei einer Verlängerung der Reinigungs- bzw. Kontrollintervalle könnten Hindernisse demnach schnell zu einer hydraulischen Überlastung des Systems führen. Bis auf in Versuchsrohr 1 konnte keine Verfestigung der Ablagerungen innerhalb von 20 Tagen festgestellt werden, sodass es ausreichte, das Hindernis aus dem Kanal zu entfernen.

5.2.7 Saisonale Veränderung der Ablagerungscharakteristik

Es wurde im Laufe von Phase II (06/14 bis 04/15) nahezu ein volles Jahr untersucht. Daher können für das Einzugsgebiet Bochum-Ölbachtal Aussagen über die Veränderung der Ablagerungen zu verschiedenen Jahreszeiten getroffen werden. Hierzu wurde das Sielhautwachstum und im Anschluss das visuelle Erscheinungsbild der Ablagerungen genauer betrachtet. Bei allen Versuchen fiel ein deutlich verringertes Sielhautwachstum über die Wintermonate auf. Während in den Sommermonaten Biofilme mit einer Dicke von mehreren Millimetern am Rand zu beobachten waren, konnten vor allem in den Monaten November bis Januar kaum bis gar keine Veränderungen in der Dicke festgestellt werden. Es haftete lediglich eine dünne Schicht aus sehr feinem Sediment an den Rändern der Rohre. Dagegen wurde die Sielhautdicke im Sommer zum Teil so stark, dass diese mehrfach in einer Versuchsreihe ausgetragen wurde. Für einen visuellen Eindruck sind in Abbildung 66 die Sielhaut im mit Natursteinfliesen ausgekleidetem Rohr Mitte Oktober und im Februar dargestellt. Die Randbedingungen sind jeweils mit einem Durchfluss von 2 L/s und einem Gefälle von 1 ‰ gleich. Hier können deutlich die Unterschiede in der Dicke und dem Erscheinungsbild erkannt werden. Des Weiteren ist in der linken oberen Ecke der linken Aufnahme gut das Ablösen der Sielhaut zu erkennen. Weiter ist auf den beiden Aufnahmen gut der Unterschied in der Ablagerungscharakteristik im restlichen Rohr zu deuten. Scheinbar hat die Sielhaut auch einen indirekten Einfluss auf die restliche Ablagerungsmenge. Wie in der Aufnahme links zu sehen, sind deutliche Ablagerungen auch an der Sohle des Rohres zu erkennen. Im direkten Vergleich fehlen diese in der rechten Aufnahme nahezu vollständig. Bei der Berechnung der Fließgeschwindigkeit waren diese im Oktober mit im Durchschnitt 0,54 m/s auch mehr als doppelt so hoch

wie im Februar mit 0,19 m/s. Dennoch bildeten sich scheinbar in Folge des vermehrten Sielhautaufkommens auch mehr Ablagerungen. Dies stimmt mit Literaturquellen wie Schröder & Zanke (2003) überein, die der Sielhaut einen großen Stellenwert für die betriebliche Rauheit zuschreiben.



Abbildung 66: Links: Deutliches Biofilmwachstum Mitte Oktober sowie in Folge des Biofilm auch vermehrtes Auftreten von Ablagerungen. Rechts: Kaum Biofilmwachstum in den Wintermonaten. Im Vergleich zu den Sommermonaten ist nur ein dünner Sedimentfilm am Rand zu erkennen.

Neben dem Sielhautwachstum veränderte sich auch die Zusammensetzung der Ablagerungen. Hierzu sind vier verschiedene Aufnahmen von verschiedenen Versuchseinstellungen aufgeführt. Es handelt sich jeweils um eine Aufnahme je Jahreszeit. Alle Aufnahmen stammen aus der Mitte von Versuchsrohr zwei und sind zum Ende einer Versuchsreihe aufgenommen worden.

Aufnahme	Beschreibung
	<p>Sommer:</p> <p>Ablagerungszusammensetzung: Größtenteils mineralisch</p> <p>Deutliches Sielhautwachstum vorhanden</p>

	<p>Herbst:</p> <p>Ablagerungszusammensetzung: Größtenteils organischer Anteile mit Blättern und Hygieneartikeln</p> <p>Nachlassendes Sichelhautwachstum</p>
	<p>Winter:</p> <p>Ablagerungszusammensetzung: Viele organische Anteile mit wenigen feinen mineralischen Anteilen</p> <p>Kaum bis gar kein Sichelhautwachstum festzustellen.</p>
	<p>Frühjahr:</p> <p>Ablagerungszusammensetzung: Viele organische Anteile mit feinen mineralischen Anteilen</p> <p>Zunehmendes Sichelhautwachstum festzustellen.</p>

Auffällig waren die jahreszeitlich spezifischen Ablagerungen. In den Sommermonaten bestanden die Ablagerungen vor allem aus Essenresten, aber auch Kronkorken, Zigarettenresten sowie Dosen und Flaschenresten. Letztere waren nur in der Zeit der Fußballweltmeisterschaft präsent und ab Anfang Oktober nicht mehr zu finden. Der organische Anteil aus Laub und Aststücken nahm dagegen zu. In der zweiten Aufnahme sind gut eine Vielzahl von Blättern zu erkennen. Wie Dosen und Flaschen

verhielten sich auch größere Äste und führten des Öfteren zu Betriebsausfällen. Diese Störstoffe wären Hindernissen im Rohr gleichzusetzen. Im Gegensatz zu den anderen Jahreszeiten war der Betrieb in den Wintermonaten am stabilsten. Die Ablagerungen in den Versuchsrohren beinhalteten hauptsächlich Hygieneartikel sowie eine Vielzahl von Putzlappen. Hinzu kommt, dass die Ablagerungen augenscheinlich homogener ausfielen. Weiterhin fiel in den Wintermonaten eine teilweise erhöhte Leitfähigkeit des Abwassers in Folge des Einsatzes von Streusalz auf. Bei den abschließenden Versuchen im Frühjahr konnte mit zunehmend steigenden Temperaturen auch eine ansteigende mikrobielle Aktivität festgestellt werden.

5.2.8 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 nach dem ersten Konzentrationsanstieg (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 Versuchsröhre 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 Versuchsröhre transportiert werden, bei Regen stark an. Da der Abwasserstrom durch die Versuchsröhre jedoch konstant eingestellt ist, steigt lediglich die Feststoffkonzentration, nicht aber die Transportkapazität, so dass es zu einer vermehrten Ablagerung in den Versuchsröhren kommt. Normalisiert sich die Feststoffkonzentration nach einem Niederschlag wieder, ist die Transportkapazität des Abflusses ggf. nicht mehr vollständig ausgeschöpft, sodass es an Stelle von Sedimentation zu einer Erosion der zuvor gebildeten Ablagerungen kommt.

Deutlich wird der Einfluss der Niederschläge bzw. der Zuflussmenge zur Kläranlage auf die Versuchsergebnisse in Abbildung 67. 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.

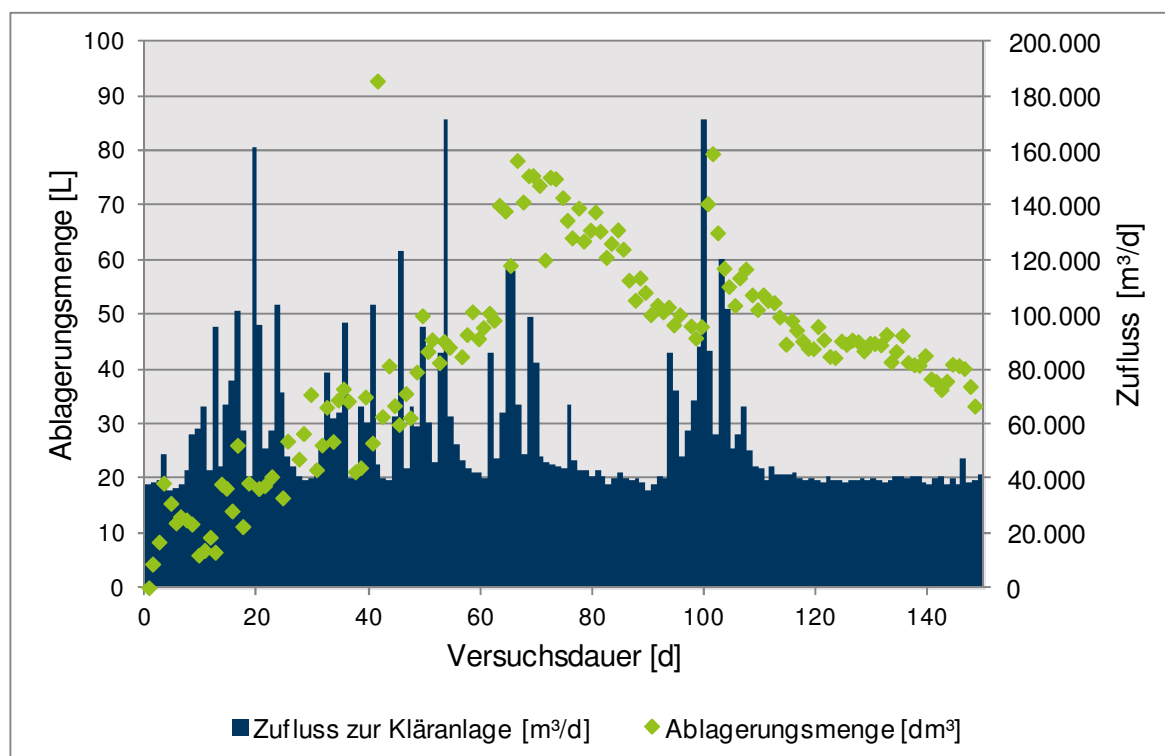


Abbildung 67: Entwicklung der Menge aller Ablagerungen im Testrohr und Tageswerte der Zuflüsse zur Kläranlage Ölbachtal (Versuchsreihe 20, $Q=2$ L/s, $I_S=1$ ‰, $k_S=0,4$ mm)

Der Einfluss von Niederschlägen auf die Ablagerungsdynamik wird auch in Abbildung 68 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.



Abbildung 68: 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, $I_S=1$ ‰, $k_S=0,4$ mm)

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 konnte. 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 Abtragung, 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 Sohl-schubspannung 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 Spül-versuches aufgezeichneten Videodaten zur Auswertung genutzt. Die Videokamera wurde mittig unter dem Testrohr aufgestellt, so dass die Ablagerungen und die Verän-derungen deutlich erkennbar waren. An diesen etwa 10 cm breiten Teilstücken wurde auf eine Auskleidung mit Sandpapier verzichtet (Abbildung 69). Drei Zeitpunkte wur-den 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 Teil-chen werden mengenmäßig nicht mehr vollständig ersetzt.
- visuell 3: Scheinbare Ablagerungsfreiheit. Alle Feststoffe sind in Bewegung.



Abbildung 69: Versuchrohr mit Anpassung im Schleifpapier

Die Bestimmung der maßgebenden Zeitpunkte anhand der Parameter AFS/TS, CSB und Trübung erfolgte durch eine Auswertung der Konzentrationsganglinien. Theore-tisch 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.

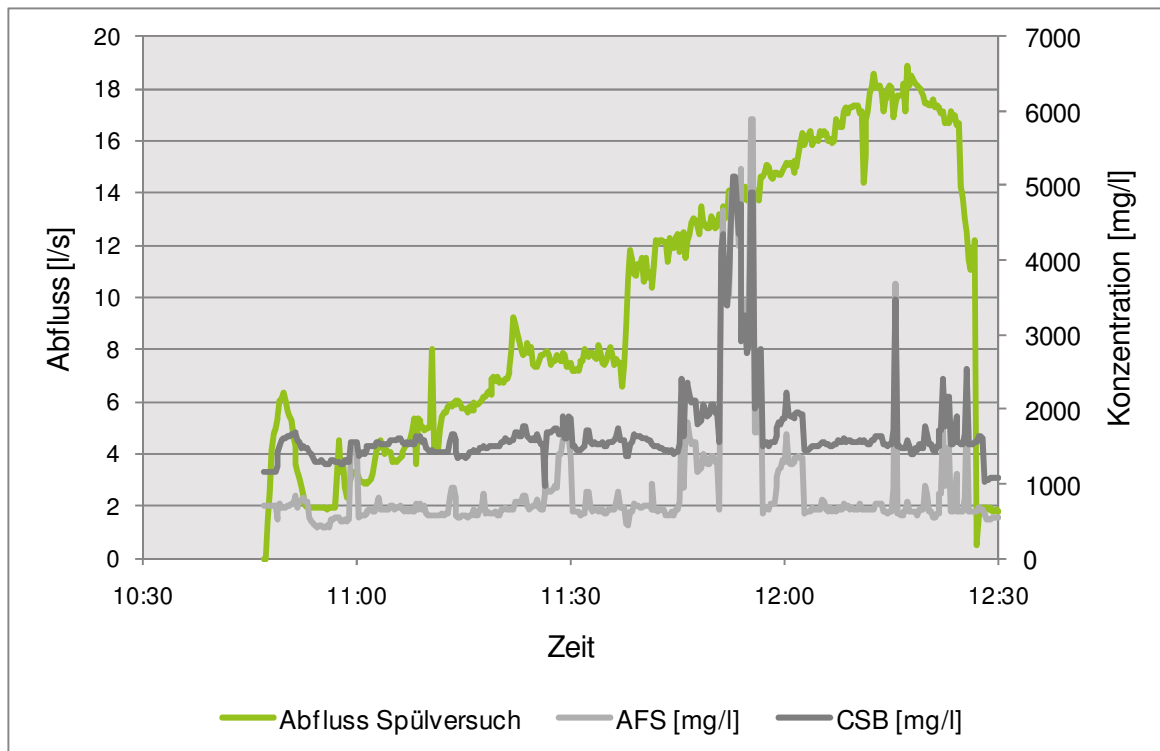


Abbildung 70: AFS- und CSB-Konzentrationen während eines Spülversuchs (Versuchsreihe 15, $Q=2$ L/s, $l_s=2,5$ ‰, $k_s=0,4$ mm)

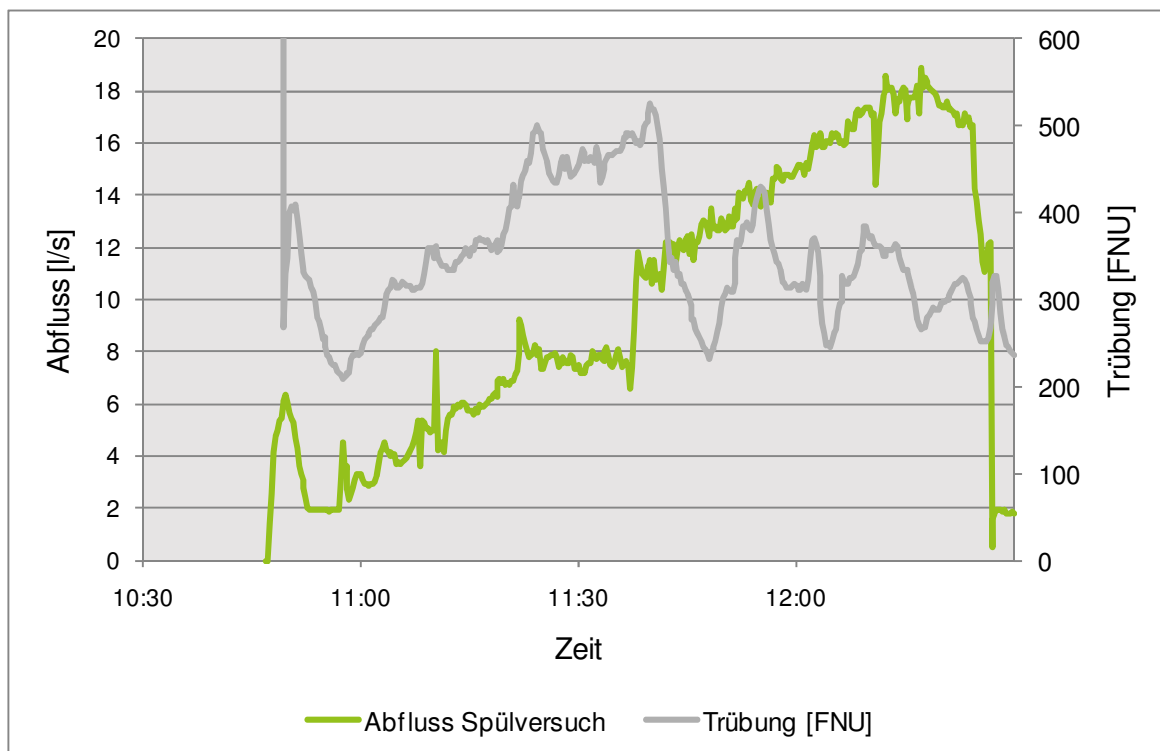


Abbildung 71: Verlauf der Trübungsmessung während eines Spülversuchs (Versuchsreihe 15, $Q=2$ L/s, $l_s=2,5$ ‰, $k_s=0,4$ mm)

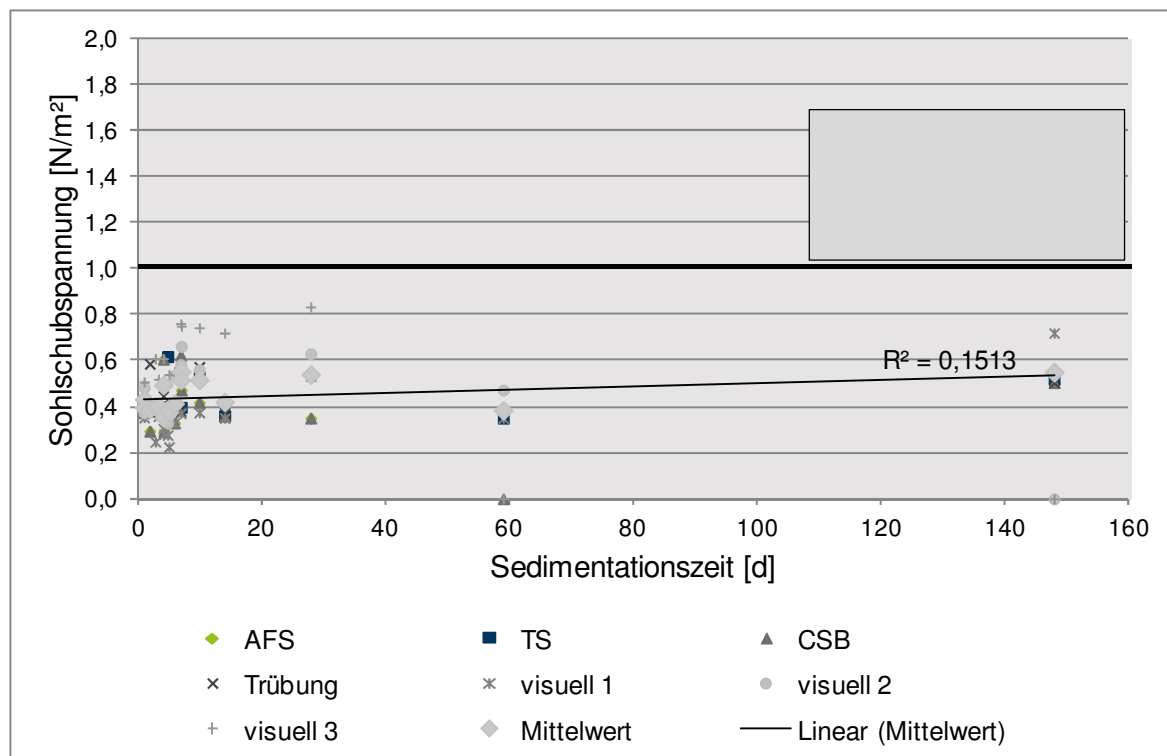


Abbildung 72: Erosionsschubspannung für verschiedene Kriterien (Versuchsreihen 11, 13, 14, 16, 17 und 20, $Q=2$ L/s, $I_s=1$ ‰, $k_s=0,4$ mm)

In Abbildung 70 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 (Abbildung 71) belegen. Aus diesem Grund wurden sämtliche Ergebnisse für die sieben betrachteten Kriterien in einer Grafik zusammengefasst (Abbildung 72).

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 $\tau=1,0$ N/m² liegen. Diese Grenze gewährleistet nach dem Arbeitsblatt DWA-A 110 (DWA, 2006) weitgehend ablagerungsfreie Kanäle.

Abbildung 72 zeigt, dass die Werte für die Erosionsschubspannung teilweise unterhalb der Schubspannung $\tau=0,3$ N/m² 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.

5.3 Identifikation von Einflussfaktoren auf die Ablagerungsbildung und Bewertung der einzelnen Einflüsse

Abschließend soll aus den praktischen Versuchen eine Bewertung und Beurteilung der Einflussfaktoren durchgeführt werden. Hierzu sind zunächst die identifizierten Einflussfaktoren aufgelistet und diese sollen im Folgenden kurz erläutert werden:

- Versuchsdurchfluss / Schmutzfracht
- Gefälle / Fließeigenschaften
- Rauheit / Oberflächenbeschaffenheit
- Abwassereigenschaften
- Niederschlag
- Hindernisse
- Gerinneprofil
- Biofilme (Sielhaut)

Versuchsdurchfluss / Schmutzfracht

Der Abfluss spielt für die Ableitung von Abwässern eine wichtige Rolle. Er wird jedoch von nahezu allen identifizierten Einflussfaktoren beeinflusst und kann daher nur schwer als ein alleinstehender Parameter betrachtet werden. In der Mischwasserkanalisation haben vor allem der Niederschlag und die anthropogenen Aktivitäten einen Einfluss auf die Abflussmenge. Gleichzeitig werden durch das Gefälle und das Gerinneprofil die Fließgeschwindigkeit und somit auch die Fließeigenschaften verändert.

Gefälle / Fließeigenschaften

Das Gefälle sollte nach Möglichkeit so gewählt werden, dass sich keine Ablagerungen in den Kanälen bilden und es gleichzeitig zu keinem Fließwechsel in den Fließeigenschaften kommt. In Phase I wurde ein rechnerisch ablagerungsfreier Zustand bei 13,5 ‰ berechnet. Bei Versuchen mit zehn Promille Gefälle traten jedoch immer noch deutliche Ablagerungen in den Versuchsrohren auf.

Rauheit / Oberflächenbeschaffenheit

Wie sich in den Versuchen zeigte, lässt sich durch eine angepasste Rauheit zu Beginn des Betriebs die Ablagerungsbildung beeinflussen. Insgesamt zeigt sich die Tendenz, dass bei vergleichsweise hohen anfänglichen äquivalenten Sandrauheiten die geringsten Ablagerungsmengen in den Versuchsrohren beobachtet wurden. Einen entscheidenden Einfluss hat dabei sehr wahrscheinlich nicht die absolute Rauheitshöhe, sondern vielmehr die Rauheitsart nach DIN 4760 (1982). So wie auch die

Texturanalysen zeigen, haben gerade ausgeprägte Sägezahnprofile, wie sie bei den Sandpapieren zu erkennen sind, einen negativen Einfluss auf die Ablagerungsbildung. Ein Sägezahnprofil fungiert ähnlich eines Klettverschlusses, an dem sich Faserstoffe verhaken und nur schwer wieder abgetragen werden können. Dieser Effekt konnte bei der Natursteinfliese nicht beobachtet werden, weshalb hier die Ablagerungsmengen im Allgemeinen geringer ausfielen.

Abwassereigenschaften / -zusammensetzung

Bei den Abwassereigenschaften handelt es sich um einen wichtigen Parameter für die Ablagerungsmenge und deren Charakteristik. Finden sich im Abwasser viele sedimentierbare Stoffe wie Sand, können diese mitunter zu hohen Ablagerungsmengen führen. Dies ist auch bei der Versuchsstrecke der Fall gewesen. Neben den absetzbaren Stoffen sind beispielsweise Fette von großer Bedeutung bei der Ablagerungsverfestigung. Des Weiteren können auch Baumaßnahmen mit Einleitung von Betonbestandteilen dazu führen, dass sie in Kanälen aushärten. Ein Beispiel hierfür findet sich in der nachfolgende Abbildung 73, welche einen Kanalquerschnitt zeigt, der dem IKT zur Verfügung gestellt wurde.



Abbildung 73: Durch eine Baumaßnahme schichtenweise zugesetztes Steinzeugrohr

Hier hat sich schichtenweise mehr als die Hälfte des Rohrquerschnitts im Zuge einer Baumaßnahme zugesetzt. Eine solche Ablagerung ließe sich nicht mehr durch herkömmliche Reinigungsmaßnahmen entfernen.

Niederschlag

Während der praktischen Versuche konnte festgestellt werden, dass sich Regenereignisse auf die Ablagerungssituation in Kanälen stark auswirken. Vor allem nach längeren Trockenperioden und in Kanälen mit einem geringen Abfluss tragen stärkere Regenereignisse große Mengen an Feststoffen in die Kanalisationen ein. Diese können, wenn sie nicht bis zur Kläranlage transportiert werden, in den Kanälen sedimentieren und zu Verstopfungen führen. Zudem werden auch im Kanal befindliche Ablagerungen durch größere Abflüsse im Kanal erodiert und in Richtung Kläranlage bewegt. Dieser Effekt trat auch bei den durchgeführten Erosionsversuchen auf. Durch die erhöhte Pumpenleistung wurden mehr Feststoffe von der Sohle in die Versuchsröhre gespült. Durch die erhöhte Fließgeschwindigkeit im Versuchrohr wurden ab einem gewissen Zeitpunkt die meisten Ablagerungen in Bewegung gesetzt.

Hindernisse

Wie auch bei den Erhebungen des IKTs festgestellt, kann es durch Hindernisse zu erheblichen Beeinträchtigungen in Kanalnetzen kommen. Deshalb muss diesen eine besondere Aufmerksamkeit geschenkt werden. Bei den Versuchen bildeten sich innerhalb eines Tages Ablagerungshöhen, die in etwa der Höhe des Hindernisses entsprachen. Nach dem Hindernis konnten durch den Fließwechsel keine oder nur wenige Ablagerungen festgestellt werden. Für die Einführung einer bedarfsorientierten Kanalreinigung können Hindernisse daher erhebliche Probleme hervorrufen. Wenn Hindernisse längere Zeit nicht entdeckt werden, kann es bei Regenereignissen schnell zur hydraulischen Überlastung von Kanälen kommen. Beispiele für Hindernisse werden im Kapitel 5.2.6 genannt.

Gerinneprofil

Profilformen bieten eine Möglichkeit die Ablagerungsbildung zu beeinflussen. Hier sind vor allem Ei- oder Doppelquerschnitte von Vorteil, da sie bei Trockenwetterabflüssen immer noch ausreichend hohe Fließgeschwindigkeiten und Wasserspiegel sicherstellen. Des Weiteren ergeben sich durch Rohrstöße oder Umlenkungen im Kanalrohr Reibungsverluste oder Totzonen, welche die Ablagerungsbildung fördern können. In der ATV-A 110 (2006) werden diese Verluste als die bedeutendsten für die betriebliche Rauheit beschrieben. Gleichmaßen tragen Sonder- oder Schachtbauwerke zu Reibungsverlusten bei.

Biofilme (Sielhaut)

Durch Biofilme wird das Kanalrohr zum einen vor Abrasion geschützt, zum anderen beeinflussen diese die Rauheit und führen unter Umständen zu vermehrten Ablagerungsmengen. Im Kanal werden vor der Kläranlage Abwasserinhaltsstoffe umgewandelt. Je nach Milieubedingungen können dabei unerwünschte Stoffe wie Schwefelwasserstoff entstehen, die den Kanal schädigen. Aus diesem Grund müssen ausreichende Fließgeschwindigkeiten im Kanal eingehalten werden. Zudem stellt der Biofilm den maßgeblichen Anteil der remobilisierten Schmutzfracht bei Regenereignissen dar und kann somit zur Belastung von Kläranlage und Gewässer beitragen.

5.3.1 Beurteilung der erfassten Einflussfaktoren

Nachdem alle Einflussfaktoren beschrieben wurden, wird im folgendem eine Gewichtung der einzelnen Parameter für die Entstehung von Ablagerungen vorgenommen.

In Tabelle 26 ist zu erkennen, dass einige Faktoren sehr stark von anderen abhängig sind. Im Fall des Abflusses muss beachtet werden, dass bei den durchgeführten Versuchen mit realem Abwasser gearbeitet wurde. Für das untersuchte Einzugsgebiet Bochum-Ölbachtal konnten einige grundsätzliche Erkenntnisse gewonnen werden. Beispielsweise führen starke Regenintensitäten nach langer Trockenperiode sowie Hindernisse in Mischwasserkanalisationen zu erhöhten Ablagerungsmengen. Diese wurden nach einer gewissen Zeit durch den normalen Trockenwetterabfluss wieder ausgetragen. Gleichermaßen führte ein größerer Abfluss in Trockenwetterperioden zu erhöhten Ablagerungsmengen. Des Weiteren führen erhöhte Biofilmaktivitäten, in den Sommermonaten, zu einer Veränderung der Rauheit im Kanal, wodurch sich erhöhte Ablagerungsmengen ergeben.

Es muss beachtet werden, dass es sich mit der Kläranlage Bochum-Ölbachtal nur um eine untersuchte Einleitungsstelle handelt. Gerade die Abwasserzusammensetzung kann entscheidende Einflüsse auf die Ablagerungsmenge und –charakteristik haben. Im vorliegenden Fall sind durch erhöhte Sandfrachten zur Versuchsanlage auch höhere Ablagerungsmengen zu beobachten gewesen. Es befinden sich im untersuchten Abwasser nur wenige bis gar keine verfestigenden Stoffe, sodass auch bei längeren Versuchsreihen kaum steigende Festigkeiten festgestellt wurden.

Tabelle 26: Einflüsse auf die Ablagerungsbildung aus den praktischen Versuchen (DN 300).

Nr.	Einflussfaktor	Abschnitts- verweis	Einfluss auf die Ablage- rungsmenge	Beeinflus- sung durch andere Fak- toren
1	Hoher Versuchsdurchfluss	5.2.5	++	2, 3, 5, 6, 7, 8
	Geringer Versuchsdurchfluss	5.2.5	-	
2	steiles Gefälle	5.2.2	--	
	flaches Gefälle	5.2.2	+	
3	glatte Oberflächenbeschaffenheit	5.2.4	-	8,4
	raue Oberflächenbeschaffenheit	5.2.4	+	
4	Hoher Feststoffanteil	5.2.7	++	5
	niedriger Feststoffanteil	5.2.7	-	
5	hohe Niederschlagintensität	5.2.8	+++	
	geringe Niederschlagintensität	5.2.8	+	
6	Hindernisse	5.2.6	+++	
	keine Hindernisse	5.2.6		
7	enges Gerinneprofil	DWA-A 110	--	
	weites Gerinneprofil	DWA-A 110	+	
8	viel Biofilm (Sielhaut)	5.2.7	++	1, 2, 3, Temperatur
	wenig Biofilm (Sielhaut)	5.2.7	--	

5.3.2 Ausblick für weitere praktische Forschungsvorhaben

Durch den Betrieb der Versuchsanlage auf der Kläranlage Bochum-Ölbachtal konnten fundierte Erkenntnisse zur Entstehung von Ablagerungen und deren Veränderung über einen kurzen bis mittleren Versuchszeitraum gesammelt werden. Innerhalb des Forschungsverbundes war es das Ziel, ein möglichst breites Spektrum von Versuchsparametern in einem möglichst realitätsnahen Umfeld abzudecken. Hierzu zählt vor allem der Einsatz von unbehandeltem Abwasser. Insbesondere die Wahl der richtigen Pumpe war sehr wichtig. Gut geeignet waren Drehkolbenpumpen oder ausreichend große Tauchpumpen. Speziell mit Drehkolbenpumpen konnten zum Ende des Projektes gute Erfahrungen gemacht werden. Zwar kam es auch hier zu Betriebsstörungen, allerdings deutlich seltener. Es sind vor allem Steine und größere Lappen problematisch, da sich diese am Drehkolben verkeilen. Das Entfernen von Störkörpern war bei den Drehkolbenpumpen deutlich einfacher als bei einer Kreiselpumpe. Auch der Einsatz einer Tauchpumpe mit oder ohne Schneidwerk ist denkbar. Sollte ein Schneidwerk eingesetzt werden, werden die Ablagerungen entsprechend verändert, was die Ergebnisse verfälschen würde.

5.4 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. Gleichzeitig wird die Feststoffkonzentration im Überstandswasser mittels einer TS-Sonde gemessen. 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 Erosionsmessgerät, welches dem EROSIMESS (Liem et al., 1997) nachempfunden wurde, für In-Situ-Untersuchungen im Dresdner Kanalnetz.

5.4.1 Material und Methoden

5.4.1.1 Verwendetes Material

Der Versuchsaufbau wurde teilweise dem EROSIMESS-Erosionsmessgerät (Abbildung 74) 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 (Abbildung 74). 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.

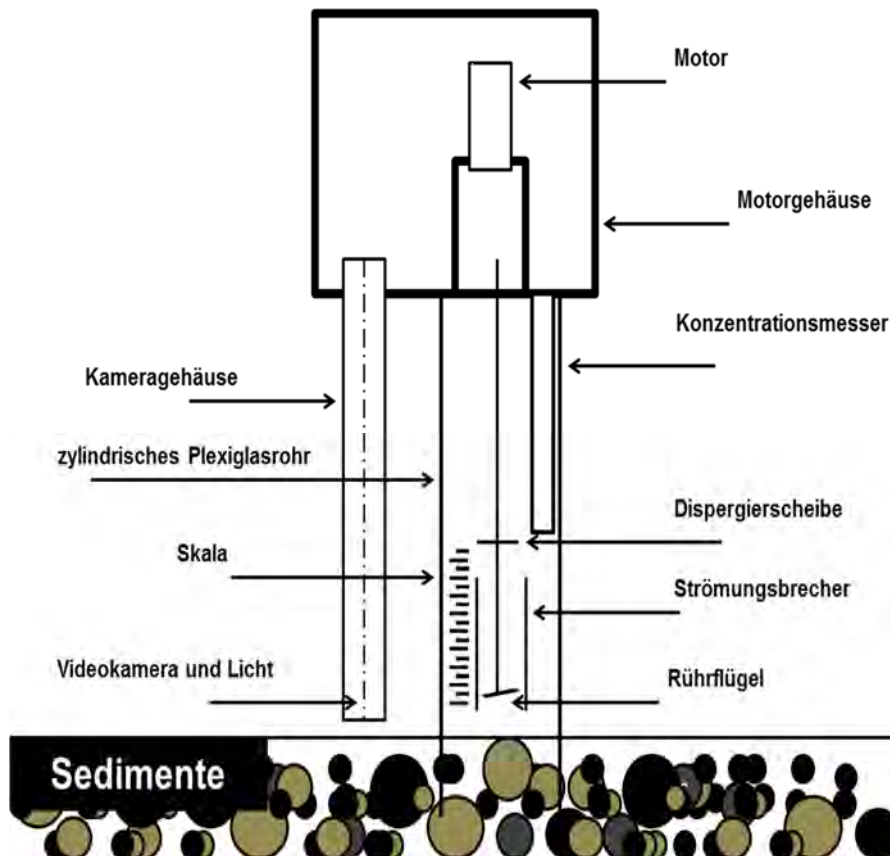


Abbildung 74: Schematische Funktionsskizze des eingesetzten Erosionsmessgerät (EROSIMESS) (Liem et al., 1997)

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 hohen Organikanteil zurückzuführen.



Abbildung 75: Plexiglasbehälter zur Messung des Erosionswiderstandes von Sedimenten

Da das auf der Versuchsanlage Ölbachtal zur Verfügung stehende Abwasser aufgrund des geringen mineralischen Anteils 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 % so gering war, dass Faulprozesse die Sedimentstabilität nicht erkennbar negativ beeinflussten.

5.4.1.2 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

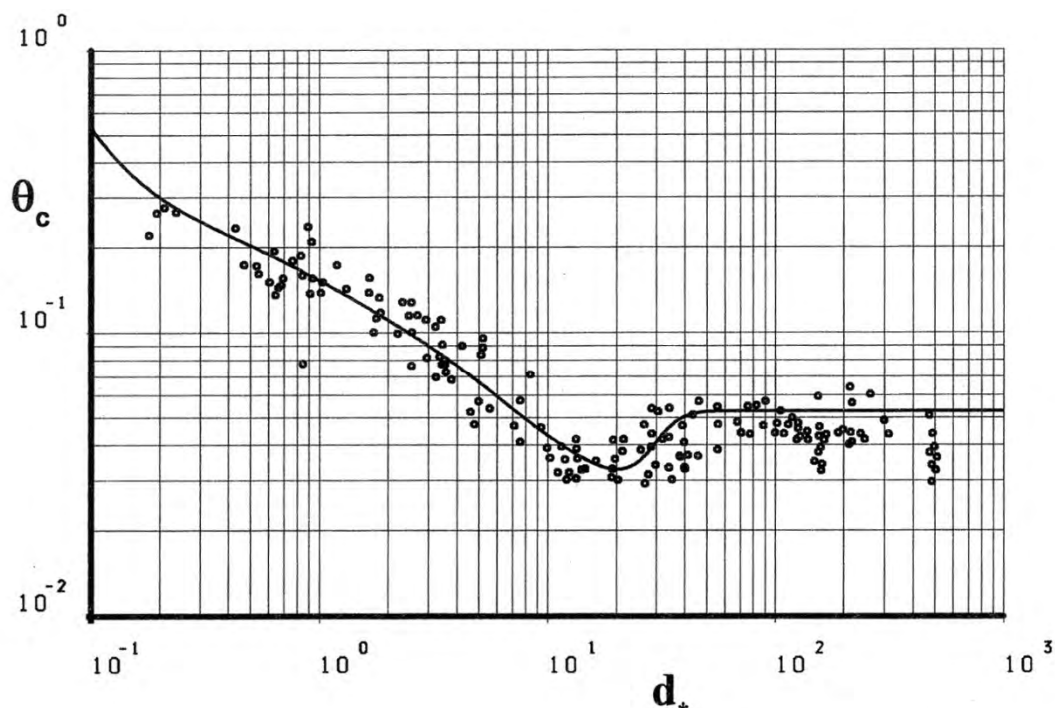


Abbildung 76: Kritische Schleppspannung θ_c nach Gleichung (3.5) und dimensionslose Korngröße nach Gleichung (3.6) (Schröder und Zanke, 2003)

Die explizite Kurve für den Bewegungsbeginn nach Abbildung 76 lässt sich für praktische Belange durch einen Polygonzug beschreiben (Schröder und Zanke, 2003):

	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	$\rightarrow \theta_c = 0,0026 \cdot d^{*0,8}$
	$42 < d^*$		$\rightarrow \theta_c = 0,052$

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))

v : Viskosität von Wasser bei $10^\circ C$ 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:

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

Die hier dargestellten Formeln geben 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 (Abbildung 78).

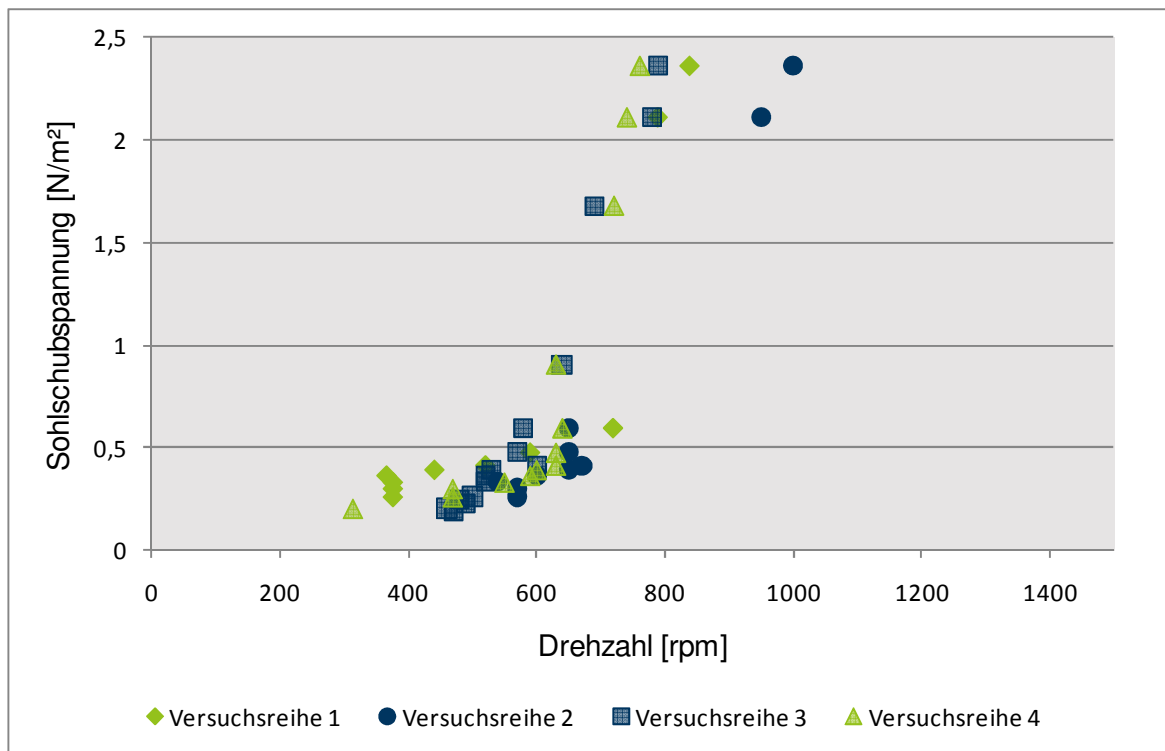


Abbildung 77: Ergebnisse der Erosionsversuche mit Sand verschiedener Korngrößen

Für diese Werte, die einer gewissen Streuung unterliegen, wurde eine mathematische Funktion gesucht, die die Ergebnisse möglichst gut beschreibt. Für die in Abbildung 77 dargestellten Ergebnisse der Erosionsversuche wurde eine Kurve ausgewählt, die sich aus zwei Exponentialfunktionen zusammensetzt:

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

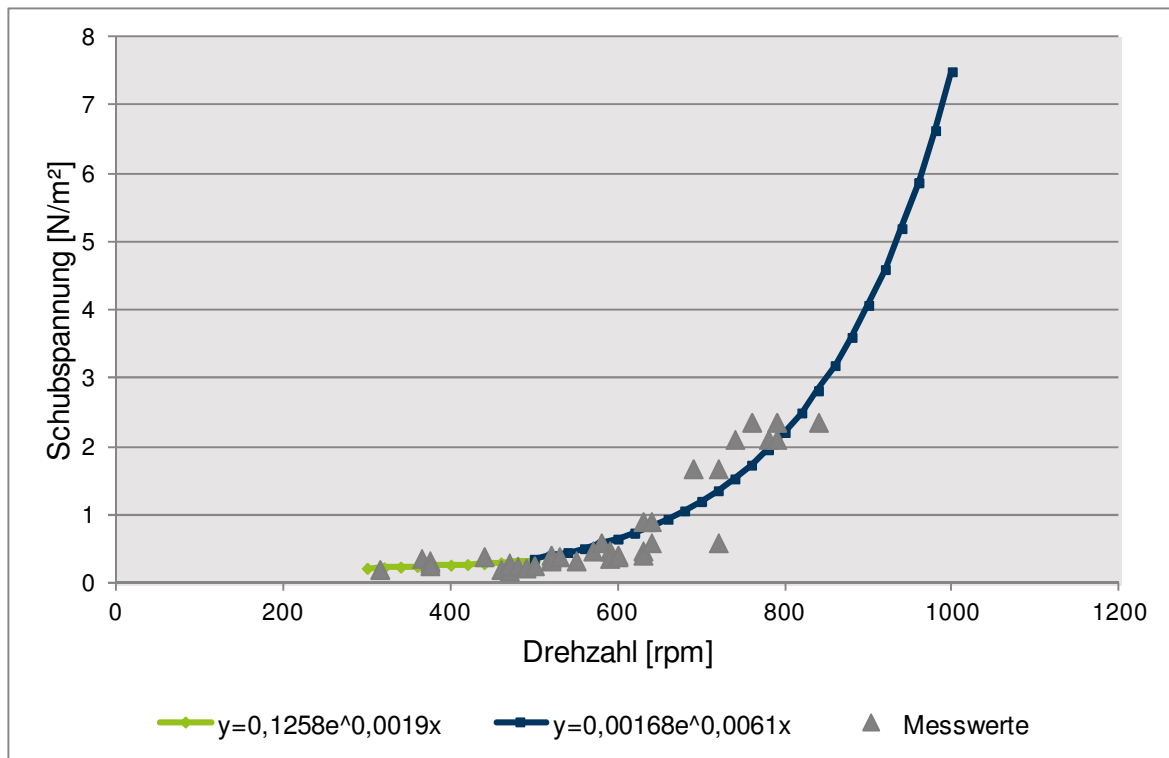


Abbildung 78: Ergebnisse der Kalibrierung

5.4.2 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. Abbildung 79 und Abbildung 80 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.

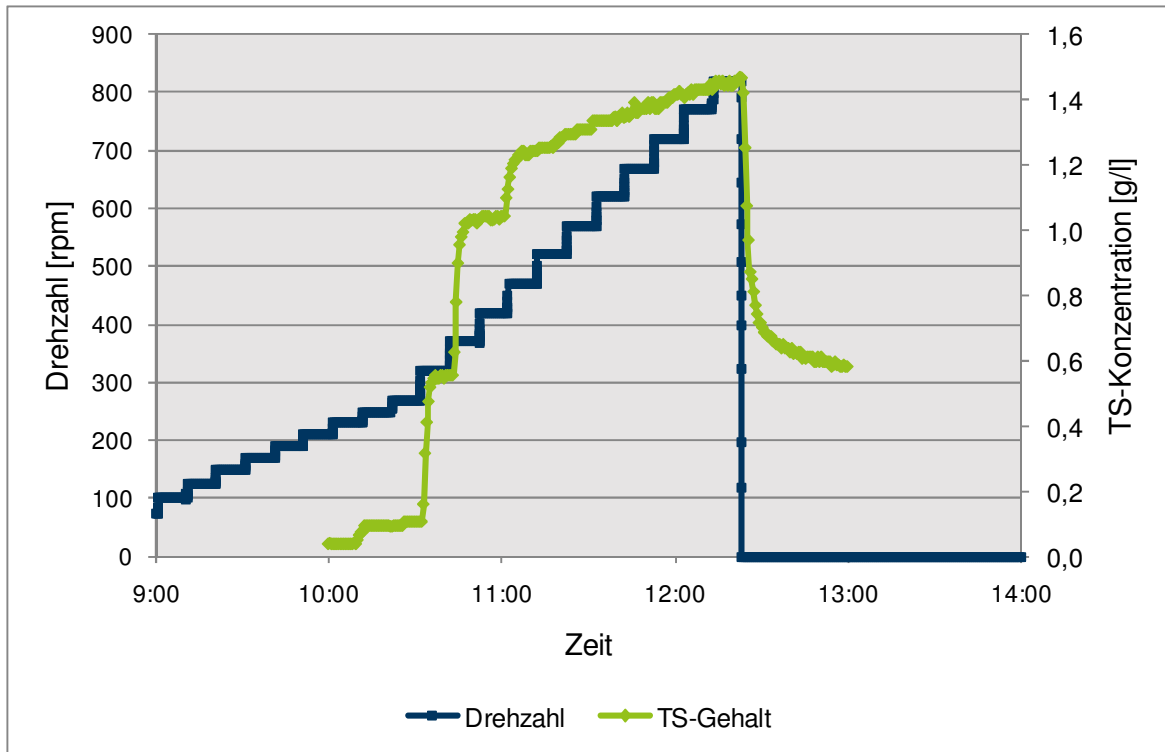


Abbildung 79: Drehzahl und TS-Konzentration bei einem Erosionsversuch mit überwiegend organischem Sediment

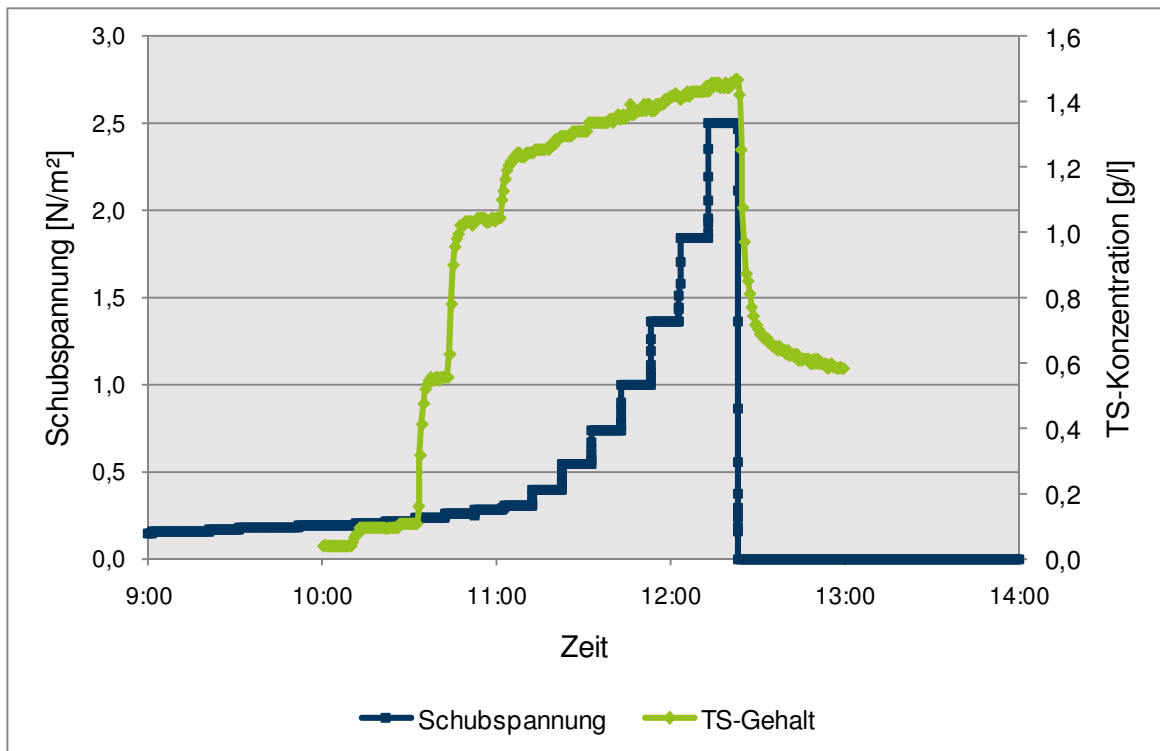


Abbildung 80: Sohlschubspannung und TS-Konzentration bei einem Erosionsversuch mit überwiegend organischem Sediment

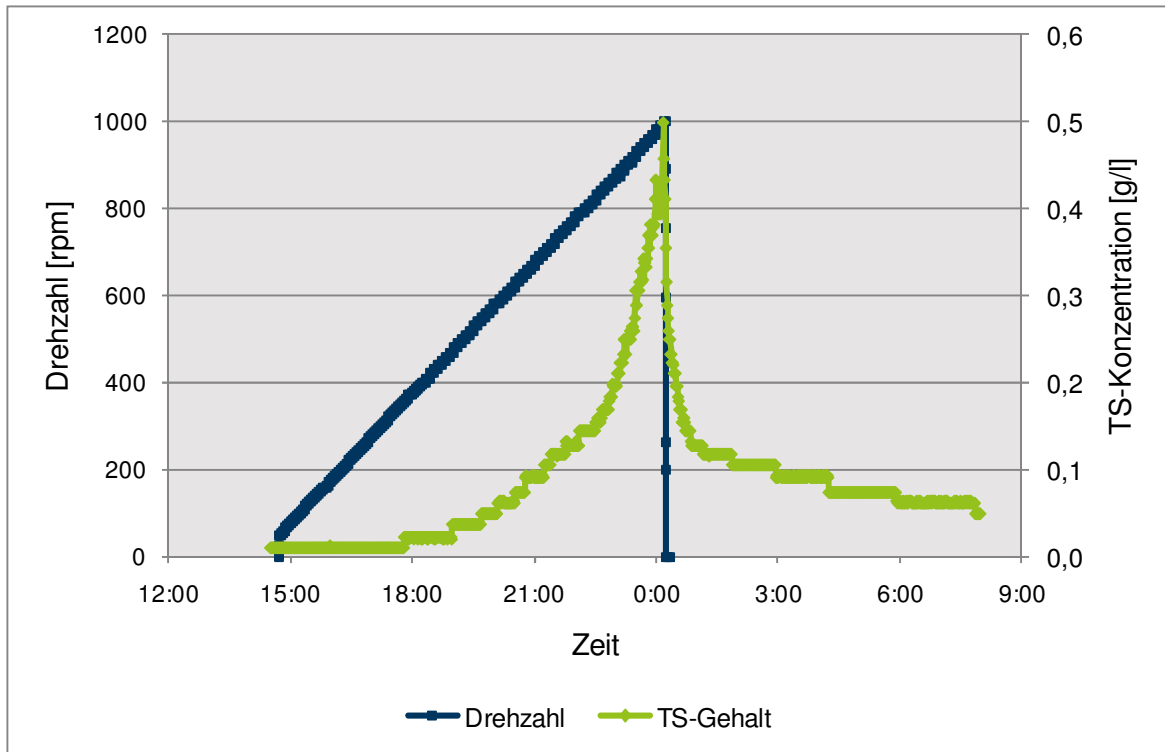


Abbildung 81: Drehzahl und TS-Konzentration bei einem Erosionsversuch mit überwiegend mineralischen Sediment

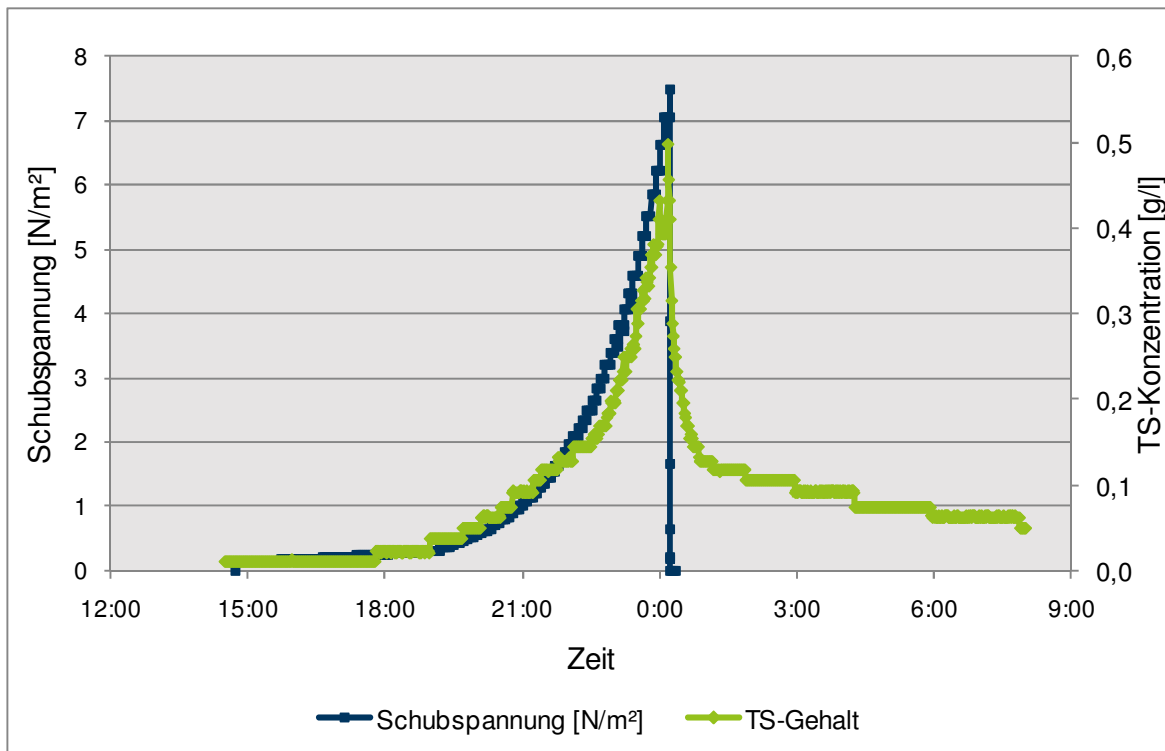


Abbildung 82: Sohlschubspannung und TS-Konzentration bei einem Erosionsversuch mit überwiegend mineralischem Sediment

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 (Abbildung 81) und korreliert sehr stark mit der ebenfalls exponentiell steigenden Schubspannung (Abbildung 82). 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 $7,5 \text{ N/m}^2$ 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 $0,1 \text{ g}_{\text{TS}}/\text{L}$ angestiegen sind (Abbildung 83). Es zeigt sich, dass der Erosionswiderstand tendenziell mit steigender Sedimentationsdauer anwächst, jedoch können die Sedimente auch schon innerhalb der ersten Tage hohe Festigkeiten aufweisen.

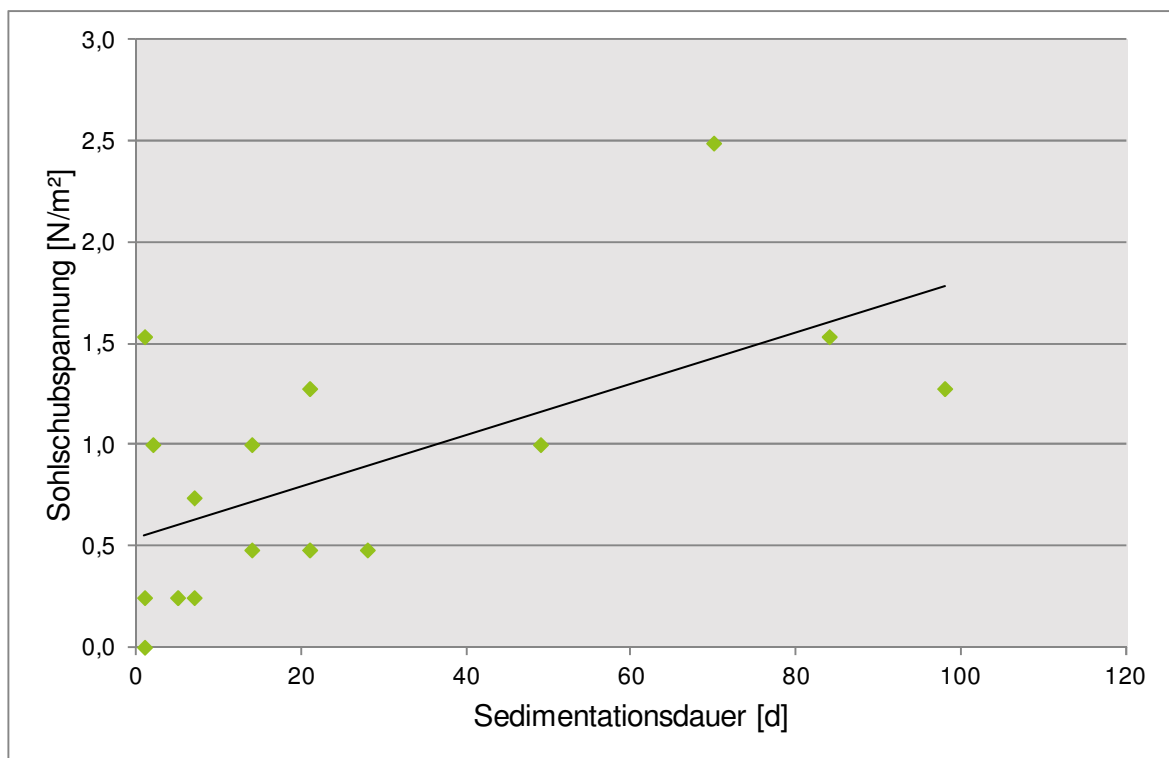


Abbildung 83: Sohlschubspannungen von überwiegend mineralischen Sedimenten in Abhängigkeit von der Sedimentationsdauer (als Grenzwert für die Erosion wurde eine TS-Konzentration von $0,1 \text{ g}_{\text{TS}}/\text{L}$ angenommen)

5.5 Schwefelwasserstoffrohr

Da die Kanalteststrecke durch den Standort unter freiem Himmel und aufgrund der zahlreichen Öffnungen sehr gut durchlüftet war, waren Schwefelwasserstoffmessungen hier nicht erfolgversprechend. 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“ gute Ergebnisse erzeugt werden konnten. Die Versuche des aktuellen Projekts sollten insofern über die damaligen Versuche hinausgehen, als dass sich die Temperatur und der Sauerstoffgehalt des zufließenden Abwassers beeinflussen ließen und als dass durch den Einbau weiterer Sonden mehr Parameter erfasst werden konnten. Während im ersten Projekt nur der Schwefelwasserstoffgehalt in der Luft gemessen wurde, wurden nun auch die Eigenschaften des Abwassers stärker untersucht. Neben den Standardparametern Temperatur, Sauerstoff, pH-Wert, AFS, CSB und CSB_{fit} 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.

5.5.1 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 (Abbildung 84). 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 den 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_{filtr} 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 H₂S-Konzentration berechnet wird. Dabei kam folgende, werksseitig einprogrammierte Formel zur Anwendung:

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

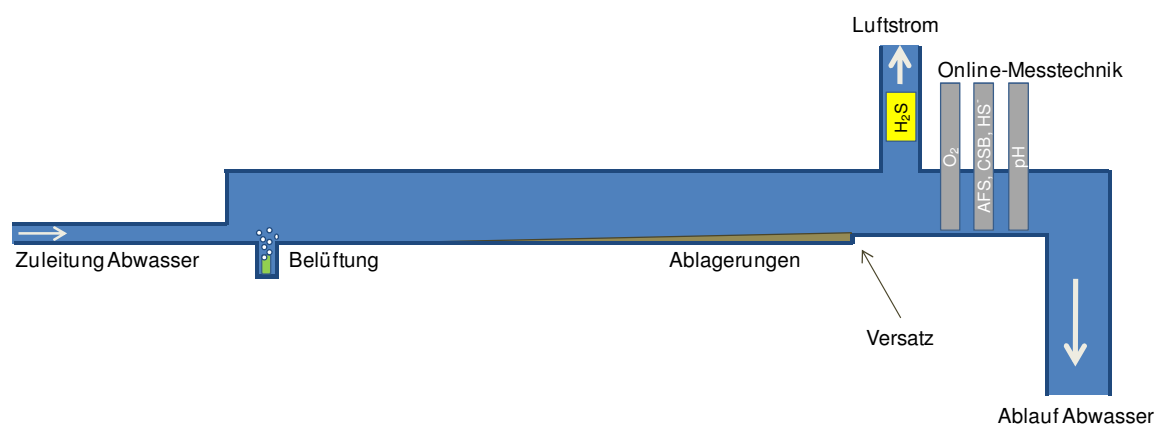


Abbildung 84: Prinzipskizze des Versuchsrohrs zur Schwefelwasserstoffbildung

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 27: 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

5.5.2 Auswertung und Ergebnisse der Phase I

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 waren Wartungsarbeiten 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 Abbildung 85. 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.

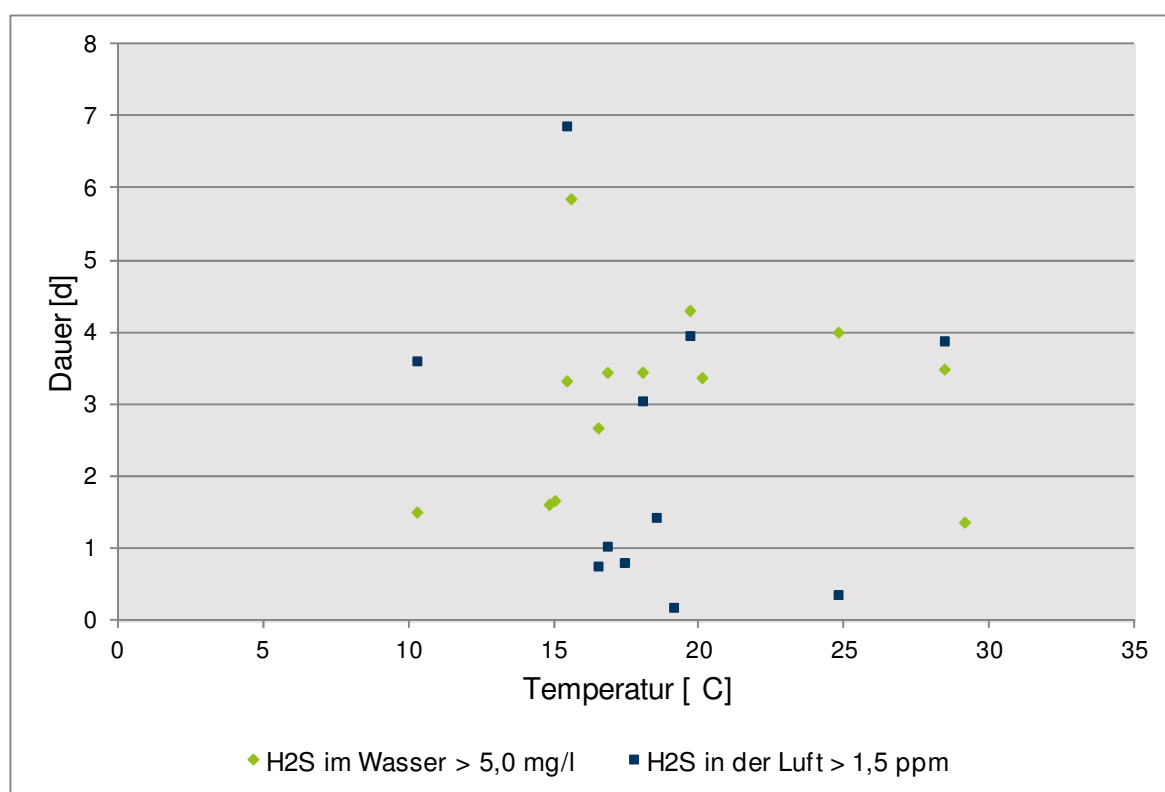


Abbildung 85: Dauer bis Grenzwerte für von 5,9 mg_{H₂S}/l (im Wasser) bzw. 1,5 ppm_{H₂S} (in der Kanalluft) überschritten werden in Abhängigkeit von der Temperatur (Phase I)

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 Abbildung 86 lässt sich erkennen, dass die H₂S-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 Versuchsrohres kein Schwefelwasserstoff mehr gemessen wurde.

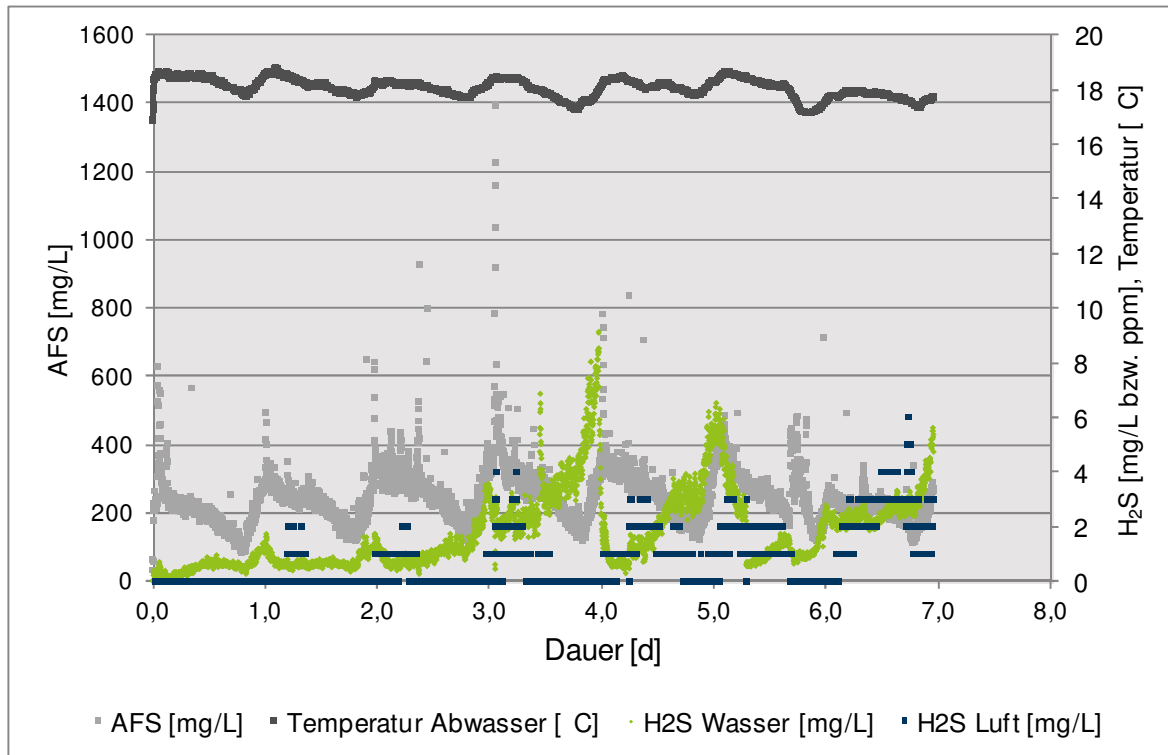


Abbildung 86: Verlauf von Schwefelwasserstoff, AFS und Temperatur über die Versuchsdauer

Gleiches passierte, wenn die Abwasserzufuhr unterbrochen wurde. Abbildung 87 zeigt eine Versuchsreihe mit zwei Ausfällen der Zulaufpumpe (zwischen dem 25. und 28.03.) Deutlich ist zu sehen, dass die H₂S-Produktion stoppte, da keine weiteren Sulfate für die Umsatzprozesse zu Schwefelwasserstoff zur Verfügung standen.

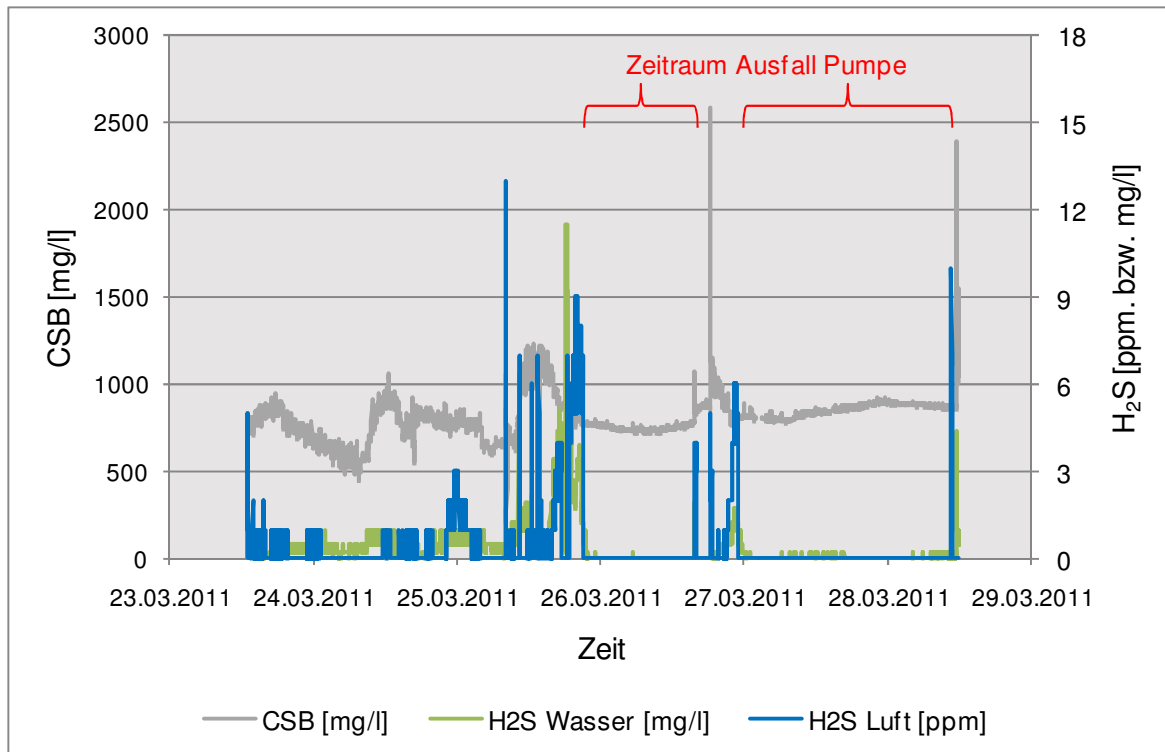


Abbildung 87: Verlauf der H₂S- und CSB-Konzentrationen

5.6 Untersuchungen zur Schwefelwasserstoffbildung in Phase II

5.6.1 Material und Methoden

Im Rahmen der Projektphase II wurden zwei Versuchsaufbauten genutzt und in mehreren Durchläufen beschickt. Hierzu zählten zum einen Batchversuche mit Substrat und Impfschlamm aus der Kanalisation sowie zum anderen ein Versuchsrohr. Mit diesem soll eine möglichst reale Form einer Abwasserleitung (Freispiegelkanal) gewährleistet werden. Hierdurch sollen die Erkenntnisse aus Phase I über die H₂S-Bildung erweitert und mit den Werten aus Literatur sowie dem H₂S-Potential aus Modellberechnungen verglichen werden.

5.6.1.1 Beschreibung der Batchversuche

Mit den Batchversuchen können zum einen Aussagen über den möglichen Biogasertrag eines Substrates und zum anderen über die anaerobe biologische Abbaubarkeit getroffen werden. In den Versuchen sollte das H₂S-Potential aus Sielhaut und Sediment analysiert werden. Für die Konzentration in der Gasphase werden ppm oder mg/L als Einheit verwendet. Die Konzentrationsangaben sind nicht direkt übertragbar, da die Gaskonzentration nach der Gasgleichung für ideale Gase umgerechnet wird. Die Einheit ppm ist eine prozentuale Angabe der Gaskonzentration in 10⁻⁴% (bzw. 10⁻⁶ Teile pro Million). Die Umrechnung in eine mengenspezifische Konzentrationsangabe

in der Gasphase erfolgt über Gleichung (5.10) unter Einbeziehung von Molmasse, Temperatur und Druck.

$$C_{\text{mg/L}} = \frac{M \cdot p \cdot C_{\text{ppm}}}{R \cdot T \cdot 10} \leftrightarrow C_{\text{ppm}} = \frac{R \cdot T \cdot C_{\text{g/m}^3} \cdot 10}{M \cdot p} \quad (5.10)$$

- mit: $C_{\text{mg/L}}$ = Gaskonzentration [mg/L]
 M = Molmasse [g/mol] ($M_{\text{H}_2\text{S}}=34,089$ g/mol)
 p = Referenzdruck [bar] ($p_{\text{Luft}}=1,01324$ bar)
 C_{ppm} = Gaskonzentration [ppm]
 R = Molare Gaskonstante [8,314472 J/mol·K]
 T = Referenztemperatur [K] (T [K] = T [°C] + 273,15)

Material und Methoden

Batchversuche sind diskontinuierliche Verfahren, bei denen nur eine einmalige Befüllung mit Substrat erfolgt. Alle Ansätze wurden dabei als Triplikatansätze nach der VDI-Richtlinie 4630 durchgeführt, wobei die Versuchsanordnung DIN EN ISO 11734 entsprach. Es handelte sich bei diesem Versuch um eine Gasvolumenmessung mittels Gasdruckmessgerät, wodurch das Gasvolumen indirekt erfasst wird. Zur Veranschaulichung sind in Abbildung 88 Bestandteile des Versuches aufgeführt.

Zu Beginn der Versuche wurden das Substrat und der Impfschlamm zu unterschiedlichen Anteilen zusammengeführt. Dabei wurden unter anderem der pH-Wert und die Leitfähigkeit gemessen. Weiter sind die Flaschen mit Stickstoff (TYP) ausgespült worden, um den Sauerstoffgehalt in den Probenflaschen möglichst gering zu halten. Mit einer mittelviskosen Silikonpaste (Bayer, Baysillone®) wurden die Flaschen luftdicht verschlossen. Während des gesamten Versuchszeitraums befanden sich die Batchansätze im Wasserbad, in dem diese kontinuierlich auf $20,5 \pm 0,5$ °C gehalten wurden. Der Wert wurde gewählt, um die Vergleichbarkeit mit anderen Versuchen (beispielsweise Liu et al. (2015)) zu gewährleisten.

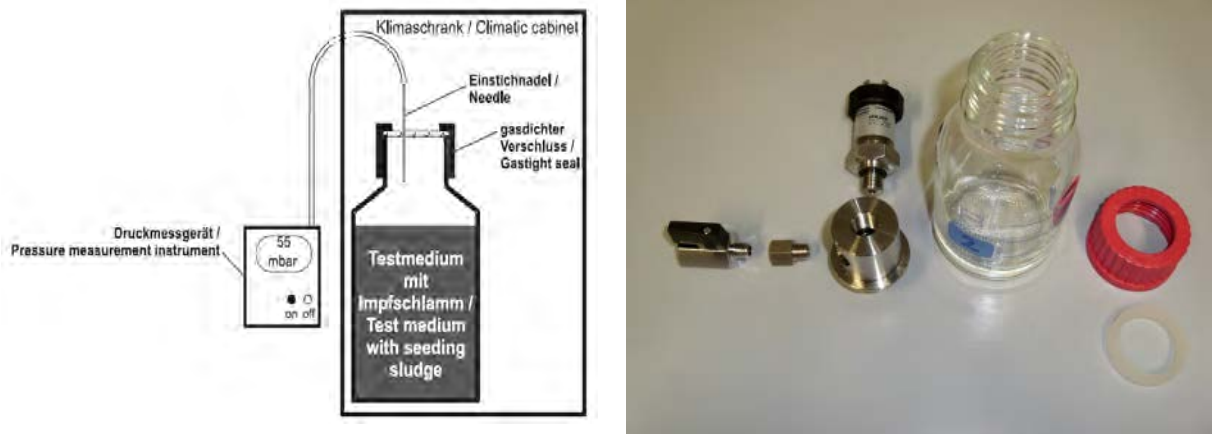


Abbildung 88: Links: Schematische Darstellung eines angeschlossenen Batchversuchs mit kontinuierlicher Druckaufzeichnung nach DIN EN ISO 11734 (Gasvolumenmessung mittels Gasdruckgerät) (VDI 4630, (2012)). Rechts: Kugelhahn mit Adapter für die Probenahme; Drucksonde zur Datenaufzeichnung, Probenflasche (in der Abbildung 250 ml), Schraubverschluss mit Gummidichtung

Mit Beginn jeder Versuchsreihe wurde die Druckänderung sowohl täglich erfasst als auch online in einem fünf Minuten Intervall aufgezeichnet. Die Versuchsdurchführung beinhaltet nach VDI 4630 (2012) ein Abbruchkriterium, das vorsieht, die Versuchsreihe zu beenden, wenn die täglich gebildete Biogasmenge nur noch 1% der insgesamt gebildeten Biogasmenge entspricht. Nach dieser abbauspezifischen Standzeit wurden jeweils zwei der drei Batchflaschen zur Gas- und Parameteranalyse genommen. Eine dritte wurde zur Sicherheit zunächst im Kühlschrank aufbewahrt.

5.6.1.2 Verwendete Impfschlämme und Substrat

Als Substrat wurde Abwasser aus dem Ablauf des Sandfangs der Kläranlage Bochum-Ölbachtal vom 14.10.2014 verwendet. Mit einem Bogensieb (Siebweite: 200 μm) wurde das Abwasser von Grobstoffen befreit. Dieses wurde im Anschluss in ausreichender Menge eingefroren, um so eine größtmögliche Vergleichbarkeit herzustellen. Eine Analyse des Substrates ist in Kapitel 5.6.1.2 zu finden. Als Impfschlamm wurden Sielhaut und Sediment aus der Kanaltteststrecke sowie die Ablagerungen aus dem H_2S -Versuchrohr verwendet. Nach VDI 4630 (2012) soll die organische Trockensubstanz des Impfschlammes 50% der Trockensubstanz überschreiten und die organische Masse des Impfschlammes sollte zwischen 1,5 – 2 Gew.-% des Gäransatzes ausmachen. Neben der zugegeben Menge an Substrat und Impfschlamm sind in Tabelle 28 die Ergebnisse von TR und oTR sowie die zugegebene Menge des Substrats angegeben. Da bei den Ablagerungen aus dem H_2S -Versuchrohr nicht direkt zwischen Sielhaut oder Sediment unterschieden werden kann, kann hier keine genauere Unterteilung vorgenommen werden.

Tabelle 28: Trockenrückstand (TR) und organischer Trockenrückstand (oTR) des Impfschlammes und des eingesetzten Substrats der Batchversuche

Impfschlamm	Zugabe [kg]	TR [g/kg]	oTR [%TR]	$\frac{oTR_{\text{Substrat}}}{oTR_{\text{Impfschlamm}}}$ [-]
Abwasser	0,5	0,8	51	-
Sediment (D1)	0,2	740	8	1,72
Sielhaut	0,1	400	13	3,92
Ablagerung aus dem H₂S Versuchrohr	0,1	0,7	63	231,29

Als Impfschlämme wurden Sediment, Sielhaut und Ablagerungen verwendet. Hiermit wurden 19 Versuchsreihen durchgeführt. Bei den Versuchen mit Sediment standen zu Beginn der Versuche die Laborergebnisse aus. Deshalb wurde zunächst mit 200 g Inoculum gearbeitet, um das nach VDI-Richtlinie geforderte Verhältnis sicherzustellen. In Tabelle 29 sind die im Einzelnen durchgeführten Versuche mit den verwendeten Mengen aufgeführt.

Tabelle 29: Auflistung der durchgeführten Batchversuche mit variierender Impfschlammzugabe

Num-mer	Impfschlamm	Menge [g]	Substrat [ml]	Anzahl
1	Blindprobe ohne Impfschlamm	-	500	5
2	Sielhaut aus Versuchsreihe 35	100	500	6
3	Sediment aus Versuchsreihe 35	200	500	6
4	Ablagerungen aus H ₂ S Versuchrohr	100	500	2

5.6.2 Material und Methoden H₂S-Versuchsrohrs

Zur Erweiterung der Ergebnisse aus der Phase I wurde ein weiteres Versuchrohr auf der Lehrstuhlversuchsanlage im Ölbachtal aufgebaut. Der Aufbau ähnelt stark dem aus Phase I. Für einen Vergleich sind Unterschiede in der nachfolgenden Tabelle dargestellt.

Tabelle 30: Unterschiede im Versuchsaufbau zwischen Phase I und II

Parameter	Phase I	Phase II
Rohrlänge und Durchmesser	1,5 m, DN 150	5,0 m, DN 75
Durchfluss	100 – 150 l/h	300 – 1100 l/h
Versatz (Schadstelle)	ja	nein
Betrachtete Parameter	Temperatur	Durchfluss / Temperatur
Aufgezeichnete Parameter	Durchfluss, pH-Wert, Sauerstoff, H ₂ S in der Flüssigkeit und im Medium, CSB, Nitrat	
sonstige Modifikation	Thermostat zur Temperaturregelung	Vorlagefass mit 20 m Vorlageschlauch
Medium	Abwasser Ablauf Vorklärung der Kläranlage Bochum-Ölbachtal	

Der schematische Aufbau der Teststrecke ist in Abbildung 89 dargestellt. Das Rohr hat einen Nenndurchmesser von DN 75 und eine Länge von 5 m. Der Durchfluss wird über eine Gardena-Tauchpumpe Classic 7500 und einen zwischengeschalteten Dimmschalter gesteuert. Bei voller Stromzufuhr konnte ein Durchfluss von durchschnittlich 650 L/h bzw. über 1000 L/h erreicht werden. Zwischen Pumpe und Testrohr wurde zudem ein Wasserbad installiert, um das Abwasser im Winter leicht erwärmen zu können. Das Abwasser durchfloss somit weitere 20 m Schlauch. Die hydraulische Aufenthaltszeit bei einem Schlauchdurchmesser von $\frac{3}{4}$ Zoll lag im Durchschnitt bei 40 Sekunden. Im Rohr selber betrug die Aufenthaltszeit etwa eine Minute. Zur Überprüfung des Durchflusses und zur Entnahme von Sielhautproben befanden sich im Versuchsrohr Probenahmestellen, welche mit einer Verschraubung luftdicht verschlossen werden konnten. Die Sonden wurden am Ende der Teststrecke positioniert, um die CSB- und O₂- Gehalte am Ende der Reaktionen bestimmen zu können. Sobald die Temperatur im Laufe der Versuchsreihen wetterbedingt unter 10 °C sank, wurde sie mit Hilfe eines Wasserbades erhöht. Die Kalibrierung der Messsonden erfolgte zu Beginn der ersten Versuchsreihe und wurde bei merklich abweichenden Messungen wiederholt.

Die verwendete pH-Sonde konnte mit Hilfe der Zweipunktkalibrierung (pH 4,00 und 7,00) kalibriert werden. Das Rohr wurde kontinuierlich mit Abwasser durchspült. Lediglich zur Reinigung wurde der Durchfluss kurzzeitig unterbrochen. Der Versuchsaufbau wurde mehrmals wöchentlich begutachtet. Dazu gehörten das Dokumentieren der Messwerte und eine Reinigung der Sonden, der Pumpe und des Rechens. Nach

jedem Versuchsdurchlauf wurde das Rohr zusätzlich mit Hochdruck von Biofilm und Sediment befreit. Die verwendeten Sonden und Geräte sind in Tabelle 31 aufgeführt.

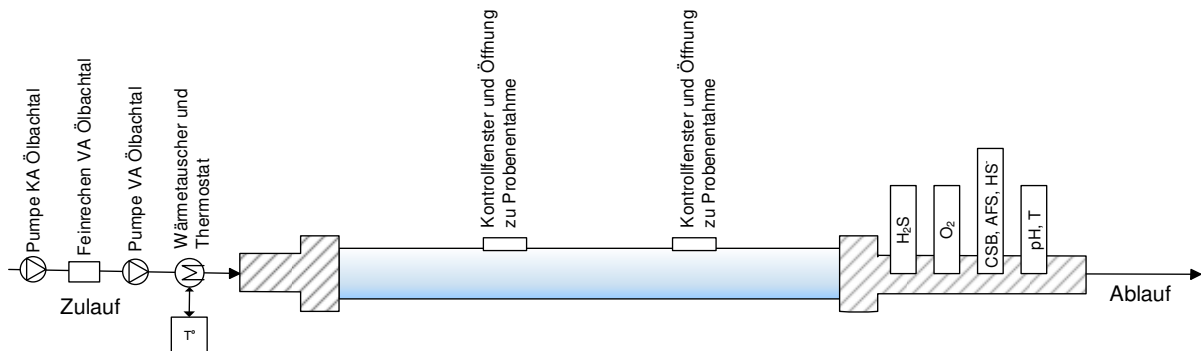


Abbildung 89: Schematische Darstellung des Versuchsrohrs mit einer Länge von 5 m und einem Durchmesser von DN 75. Die Onlinemesstechnik befindet sich am Ende der Versuchseinstellung

Tabelle 31: Versuchsbeschreibende Parameter und Auflistung der verwendeten Messsonden

Parameter	Einheit	Name und Hersteller	Medium der Messung
Lufttemperatur: T_L	°C	OdaLog2 (App-Tek)	Abluft
Schwefelwasserstoff: H_2S	ppm		
Durchfluss: Q	L/h	Promag 30A/33A (Endress und Hauser)	Abwasser
Gefälle: I	‰	Manuelle Messung	
Abfiltrierbare Stoffe: AFS	mg/L	spectro::lyser (S::can)	Abwasser
Chemischer Sauerstoffbedarf: CSB	mg/L		
Hydrosulfid-Ionen: HS^-	mg/L bzw. ppm		
Sauerstoffgehalt: O_2	mg/L	Oxi 601 (WTW)	Abwasser
pH-Wert pH	-	SensoLyt 700 (WTW)	Abwasser
Wassertemperatur: T_w	°C		

5.6.2.1 H₂S-Messung in der Gasphase

Für die H₂S-Messung in der Kanalatmosphäre wurde ein H₂S-Datenlogger verwendet. Er ermöglichte eine kontinuierliche Messung und einen Online- oder Datenlogger-Datenabruf (Weismann und Lohse, 2007). Abbildung 90 zeigt hierzu das verwendete OdaLog Messgerät der Firma AppTek (A1-CBISS, 2011).



Abbildung 90: Verwendeter Gaslogger zur Onlineaufzeichnung der Schwefelwasserstoffkonzentration in der Abluft AppTek (A1-CBISS, 2011)

Bei dem H₂S-Datenlogger handelt es sich um einen elektrochemischen Sensor, der den Wert der Gasmenge über ein Mikroamperemeter in ein elektrisch messbares Signal umwandelt. Bei der Messung werden chemische Eigenschaften wie Reaktivität, Oxidier- und Reduzierbarkeit ausgenutzt.

Der Aufbau einer elektrochemischen Sonde ist in Abbildung 91 dargestellt. Die Sonde besteht aus zwei Elektroden (einer Mess- und einer Gegenelektrode), die durch einen flüssigen Elektrolyt (eingedickte Flüssigkeit als Ionenleiter) voneinander getrennt sind. Die Elektroden sind von einem gasdurchlässigen und elektrolytundurchlässigen Sensorgehäuse umgeben und durch einen äußeren Stromkreis miteinander verbunden.

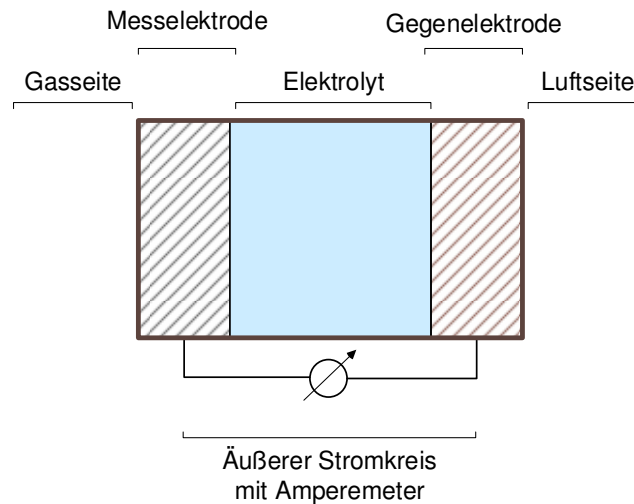


Abbildung 91: Schema einer elektrochemischen Messsonde

Das zu messende Gas breitet sich im Sensor aus und fließt zur Messelektrode. Es kommt zu einer chemischen Reaktion. Je nach Gas wird dies oxidiert (z. B. oxidiert Kohlenmonoxid zu Kohlendioxid) oder reduziert (z.B. wird Sauerstoff zu Wasser reduziert). Abhängig von der Reaktion ist die Richtung der Elektronen durch den äußeren Stromkreis vorgegeben (Tabelle 32). Der Elektronenfluss erzeugt einen elektrischen Strom, der proportional zur Gaskonzentration ist und gemessen werden kann. In Abhängigkeit von der vorangegangenen Kalibrierung kann der elektrische Strom umgerechnet und die Gaskonzentration ausgegeben werden (Dräger, 2009; INDISCI.de, 2014). In diesem Fall erfolgte die Kalibrierung im Labor für Siedlungswasserwirtschaft und Umwelttechnik mit einer Konzentration von 100 ppm H_2S .

Tabelle 32: Elektronenfluss der Elektronen (nach INDISCI.de, 2014)

Oxidation	Elektronenfluss von Messelektrode zu Gegenelektrode durch den externen Kreislauf (Messelektrode: Anode, Gegenelektrode: Kathode)
Reduktion	Elektronenfluss von Gegenelektrode zu Messelektrode durch den externen Kreislauf (Messelektrode: Kathode, Gegenelektrode: Anode)

In Abbildung 92 ist die Messung von H_2S schematisch dargestellt. Das H_2S -Molekül erreicht die Messelektrode (hier Anode). Zusammen mit einem Wassermolekül kommt es zu einer Oxidation von H_2S . Das abgespaltene Elektron fließt durch den äußeren Stromkreis zur Gegenelektrode (hier Kathode). Im Elektrolyt bilden sich an der Anode Schwefelsäure und H^+ -Ionen. An der Kathode wird wieder Sauerstoff aus der Umgebungsluft mit den H^+ -Ionen zu Wasser reduziert (Jessel, 2001).

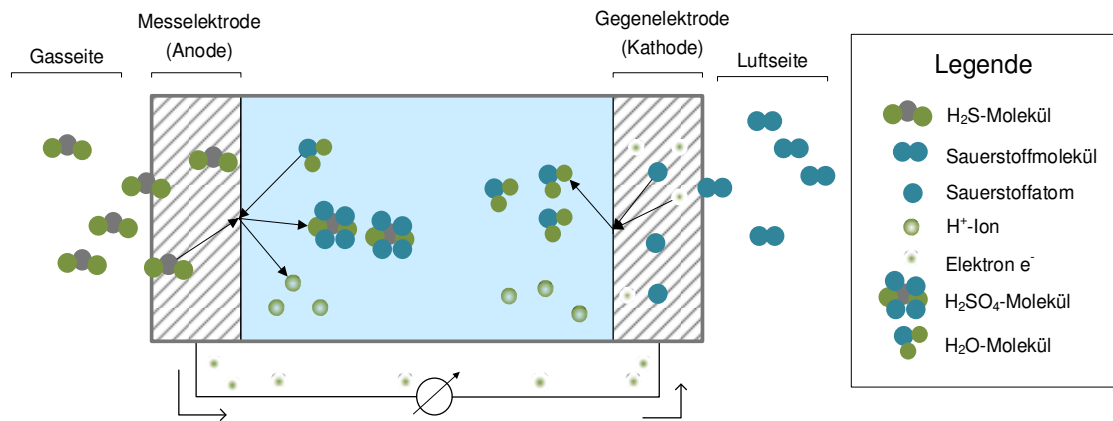


Abbildung 92: Prinzip der elektrochemischen Messung von H_2S (nach Jessel, 2001)

5.6.2.2 Messung in der Wasserphase

Die Messung der H_2S -Konzentration im Abwasser kann entweder über eine Probenahme mit Analyse (mikrocoulometrische Titration) oder über eine In-situ-Messung mit einer Unterwassersonde erfolgen (Weismann und Lohse, 2007).

Die eingesetzte spectro::lyser Sonde (S::can) erfasst die Abwasserparameter mittels einer spektrometrischen Messung über einen Messweg von 1-100 mm. Der Wellenlängenbereich beträgt dabei 220 bis 720 nm mit einer optischen Zweistrahl Ausführung. Mit der S::can-Sonde ist es möglich, mehrere Parameter gleichzeitig zu messen. In diesem Fall sind dies CSB filtriert und homogenisiert (CSB), H_2S (H_2S -Abwasser) in der Wasserphase, abfiltrierbare Stoffe (AFS) und Nitrat. Bei der Kalibrierung der Sonde wird zwischen globaler und lokaler Kalibrierung unterschieden. Die globale Kalibrierung entspricht einer voreingestellten Kalibrierung der Firma S::can. Die Werte beeinflussen sich jedoch gegenseitig. Ist ein Messwert sehr hoch, wird die Messung eines anderen Parameters beeinträchtigt. Wird die Messung als zu hoch eingestuft, kann eine lokale Kalibrierung durchgeführt werden. Dafür werden Abwasserproben zu verschiedenen Zeitpunkten genommen und der Messsonde im Nachhinein wieder zugewiesen. Zusammen mit der globalen Kalibrierung wird die Messgenauigkeit mit der lokalen Kalibrierung erhöht. Bei der Wahl der Zeitpunkte für die lokale Kalibrierung fielen im Tagesgang markante Punkte auf, an denen der Verlauf der Konzentrationen von CSB und AFS gut beschrieben wurden. Dazu gehörten die Morgenstunden (9 Uhr), in denen die Werte eher niedrig waren, die Mittagszeit (12 Uhr), zu der die Kurven anstiegen, und die Stunden am Nachmittag (15 Uhr), in denen die Konzentrationskurven wieder abflachten.

5.6.3 Versuchsplan der H₂S-Teststrecke

In Anlehnung an Phase I wurde der Versuchsplan so aufgestellt, dass die Zeit bis zur Einstellung von konstanten H₂S-Konzentrationen berücksichtigt wurde. Da die Versuche in den Wintermonaten durchgeführt wurden, sind im Versuchsplan sowohl das Datum als auch die Temperatur aufgeführt. Zu Beginn wurde zunächst ein Testlauf von zehn Tagen durchgeführt, um die Funktion der Versuchsanlage zu testen. Im Anschluss wurden insgesamt fünf Versuchsreihen durchgeführt, bei denen der Einfluss unterschiedlicher Durchflüsse untersucht werden sollte. Im Vergleich zu Phase I wurden diese deutlich höher gewählt. Dabei entspricht ein Durchfluss von 300 L/h einer Teilfüllung von 30 %. Bei einem Durchfluss von 600 L/h ist das Rohr zu 50 % gefüllt. Drei dieser Versuchsreihen hatten eine Dauer von mehr als 30 Tagen. Gründe hierfür waren zum einem die geringe Temperatur des Abwassers, durch die die Entstehung von H₂S deutlich längere Zeiträume in Anspruch nahm. Zum anderen sollte mit Durchlauf fünf kontrolliert werden, wie sich die H₂S-Bildung bei einer etablierten Biofilmgemeinschaft verhält.

Tabelle 33: Übersicht der durchgeführten H₂S-Rohr-Versuche mit entsprechend variierten Parametern

Durchlauf	Datum (Dauer) [d]	Mittlerer Durchfluss [L/h]	Mittlere Temperatur [°C]
Testlauf	14.11.'14-24.11.'14 (10)	520	14,3 ± 0,4
Durchlauf 1	24.11.'14-19.12.'14 (30)	590	13,3 ± 1,9
Durchlauf 2	05.01.2015-15.01.2015 (10)	290	12,7 ± 2,9
Durchlauf 3	15.01.2015-23.01.2015 (8)	390 ± 65	12,4 ± 2,0
Durchlauf 4	23.01.2015-27.02.2015 (34)	600 ± 360	11,2 ± 2,3
Durchlauf 5	27.02.2015-18.05.2015 (85)	370 ± 40	10,7 ± 0,8

5.6.4 Statische Modelle

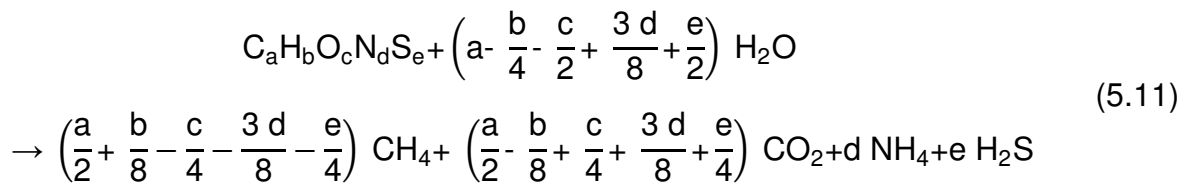
Um die erzeugten Ergebnisse besser einordnen zu können, wurden insgesamt drei verschiedene statische Modelle auf die Ergebnisse angewendet. Diese sind in der Tabelle 34 aufgeführt. Nachfolgend werden die einzelnen Modelle genauer beschrieben.

Tabelle 34: Übersicht der statischen Modelle mit jeweiliger Berechnungsgrundlage

Modell	Berechnungsgrundlage	Prozessart
Boyle et al. (1977)	Elementare Zusammensetzung (C,H,O,N,S)	-
Hvitved-Jacobsen et al. (2002)	Substratgehalt, Temperatur, A/V	Batch, Druckleitung, Freispiegelleitung
Peu et al. (2012)	Elementare Zusammensetzung (S, C)	Batch

Modell nach Boyle et al. (1977)

Für dieses Modell wird die elementare Abwasserzusammensetzung in Abhängigkeit von Kohlenstoff (C), Stickstoff (N), Sauerstoff (O) und Schwefel (S) benötigt. So kann die theoretisch maximale Gasausbeute von Methan (CH₄), Kohlendioxid (CO₂), Ammonium (NH₄) und Schwefelwasserstoff (H₂S) über die Berechnung nach Boyle (1977) ermittelt werden. Die Formel basiert auf der Gleichung von Buswell und Müller (1952). Zusätzlich werden Schwefel und Stickstoff berücksichtigt (siehe Gleichung 5.11).



Der spezifische H₂S-Ertrag kann mit dem Ertragskoeffizienten in Gleichung 5.12 auf jedes Substrat bezogen werden. Der Ertrag gibt an, wie viel Liter H₂S maximal aus einem Gramm oTR entstehen.

$$Y_{H_2S, oTR} = \frac{e \cdot 22,14}{a \cdot 12,011 + b \cdot 1,008 + c \cdot 15,999 + d \cdot 14,007 + e \cdot 32,065} \tag{5.12}$$

Es kann des Weiteren davon ausgegangen werden, dass die Inhaltsstoffe des Abwassers einen spezifischen Biogasertrag haben. Aus den Fetten entsteht die höchste Biogasmenge.

Tabelle 35: Theoretische Biogasausbeute beim Abbau verschiedener Stoffgruppen (Lübken et al., 2010)

Substratbestandteil	Theoretische Biogasausbeute [mL/g _{oTR} abgebaut]
Glucose	747
Essigsäure	700
Propionsäure	908
Kohlenhydrate	794
Proteine	650
Fette	1337

Es muss immer davon ausgegangen werden, dass ein Teil des Substrates (CSB) in Höhe von 3-10 % in Biomasse umgewandelt wird. Darüber hinaus gelten Abbauraten von 85 % für tierische Fette und Kohlenhydrate und 50-70 % für pflanzliche Fette und Proteine (VDI 4630, 2006) als realistisch.

Für die Bilanzierung eines Batchversuches muss eine Verbindung der Gaskonzentration in der Gas- und Flüssigphase hergestellt werden. Hierzu wird im Allgemeinen das Gesetz nach Henry genutzt. Dieses sagt aus, dass die Konzentration eines im Wasser gelösten Gases (c_i) bei konstanter Temperatur proportional zum Partialdruck ist, der oberhalb der Wasseroberfläche herrscht (p_i). Die Proportionalität wird mit der Henry-Konstanten k_H [mol/(m³·bar)] beschrieben (Mortimer und Müller, 2014).

Wird der Umgebungsdruck erhöht, geht mehr Gas in Lösung, wodurch sich das System ausgleicht (Mortimer und Müller, 2014). In der Literatur sind verschiedene Angaben zur Henry-Konstante für H₂S zu finden, die Tabelle 36 zu entnehmen sind.

$$c_i = k_H \cdot p_i \cdot 34,089 \quad (5.13)$$

mit: c_i = Konzentration des im Wasser gelösten Gases [mg/L]

k_H = Henry-Konstante [mol/m³·bar]

p_i = Partialdruck oberhalb der Wasseroberfläche [bar]

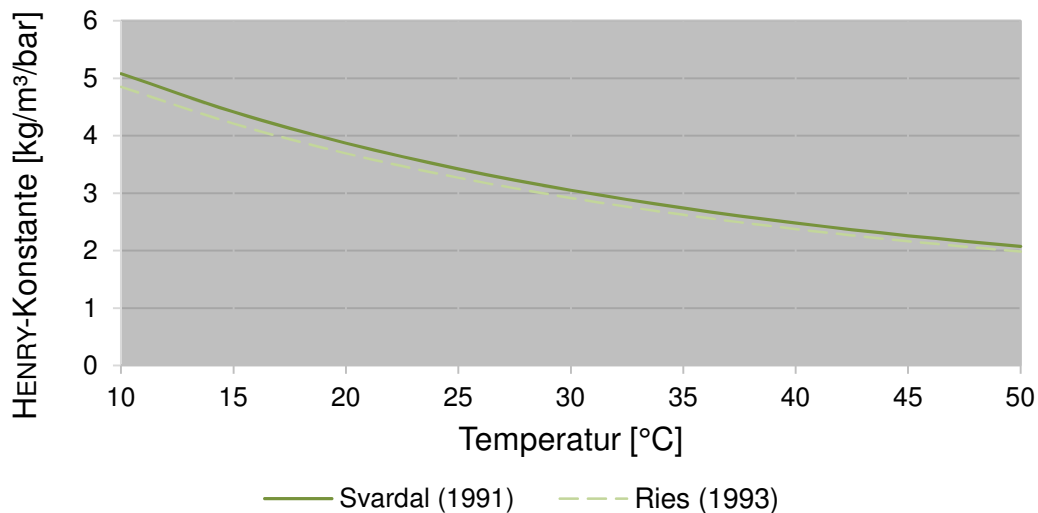
Partialdruck [bar] = Gasanteil [%] · Gesamtdruck [bar]

34,089 = Molare Masse Schwefelwasserstoff [g/mol]

Tabelle 36: Auflistung der Henry-Konstanten

Temperatur [°C]	Henry –Konstante [mol/(m ³ ·bar)]	Quelle
20	115,81	Saračević, 2009
25	102,2	Donner, 2009

Ebenso gibt es Funktionen, die die Henry-Konstante in Abhängigkeit von der Temperatur beschreiben. Zwei Modelle entstammen Svardal (1991)¹ und Ries (1993)² deren in Abbildung 93 dargestellt sind. Deutlich zu erkennen ist die abnehmende Löslichkeit mit zunehmender Temperatur. Die gezeigten Werte decken sich ebenfalls sehr gut mit denen aus Tabelle 36. Bei einer molaren Masse von 34 g/mol für H₂S wird für 20 °C eine Henry-Konstante von etwa 3,9 kg/(m³·bar) berechnet.

**Abbildung 93: Henry-Konstante in Abhängigkeit von der Temperatur nach Svardal (1991) und Ries (1993)****Modell nach Hvitved-Jacobsen et al. (2002)**

Hvitved-Jacobsen et al. (2002) entwickelten im Jahr 2002 ein Modell mit dem Namen Wastewater Aerobic/Anaerobic Transformations in Sewers (WATS). Dieses beschreibt aerobe und anaerobe Prozesse, in die Kohlenstoff- und Schwefelbakterien involviert

¹ $k_{H,H_2S} = M_{H_2S} \cdot 10^{\frac{1851}{T[K]} - 10,337 + 0,0105 \cdot T[K]}$, Molekulargewicht von H₂S: 34,089 g/mol

² $k_{H,H_2S} = \frac{32,064 \cdot 4,67 \cdot 10^{\frac{1,761 \cdot T[°C]}{116,94 + T[°C]}}}{22,41}$

sind. Bei dem Modell handelt es sich um eine dynamische Modellierung von Druckleitungen und Freispiegelleitungen, jedoch kann auch die H₂S-Rate im stationären Zustand beschrieben werden. Laut Nielsen et al. (2006) kann dies sowohl auf Druckleitungen als auch auf Freispiegelkanäle angewandt werden.

Mit der Gleichung von Tanaka und Hvitved-Jacobsen (2001) kann die H₂S-Rate in Abhängigkeit von Substrat, Temperatur und Biofilmfläche berechnet werden.

$$r_S = k \cdot \sqrt{S_S + X_{S,a}} \cdot \frac{A}{V} \cdot 1,03^{(T-20)} \quad (5.14)$$

mit: r_S = H₂S-Bildungsrate [mgs/(m²·h)]

k = Ertragskonstante nach Abwasserherkunft [gs/(g_{CSB}·m²·h)]

$k_{\text{kommunales Abwasser}}$ = 0,001-0,002

$k_{\text{kommunales und industrielles Abwasser}}$ = 0,003-0,006

$k_{\text{Abwasser aus der Lebensmittelindustrie}}$ = 0,007-0,01

S_S = gelöstes Substrat [g_{CSB}/m³]

$X_{S,a}$ = partikuläres, leicht hydrolysierbares Substrat [g_{CSB}/m³]

A/V = Oberflächen-Volumen-Verhältnis [m²/m³]

T = Temperatur [°C]

Modell nach Peu et al. (2012)

Peu et al. führten im Jahr 2012 Versuche zur Vorhersage der H₂S-Konzentration in Biogasen bei der anaeroben Faulung durch. Verwendet wurden 37 organische Substrate aus verschiedenen Bereichen. Neben der Entwicklung von Gleichungen zur Berechnung des H₂S-Potentials wurde herausgefunden, dass mit einem Kohlenstoff-Schwefelverhältnis von unter 40 die H₂S-Konzentration unter 2 % gehalten werden kann.

Mit Gleichung 5.15 kann der maximale H₂S-Gehalt des Biogases berechnet werden. Sie basiert auf der Gesamtmenge des Schwefels im Substrat im Verhältnis zum Biogaspotential des Substrates. Es wird davon ausgegangen, dass Kohlenstoff und Schwefel ähnliche Abbaubarkeiten aufweisen. Daher basiert die Formel auf dem Verhältnis zwischen Schwefel und Kohlenstoff im Substrat.

$$H_2S_{\max} = \frac{S \cdot TR}{1000 \cdot 32} \cdot 22,4 \cdot 100 \quad (5.15)$$

mit: H_2S_{\max} = maximaler H_2S -Anteil im Biogas [%]

S = Schwefelgehalt [g_S/kg_{TR}]

TR = TR -Gehalt [g/kg]

BBP = biochemisches Biogaspotential [NL/kg]

Für die Bestimmung des biochemischen Biogaspotentials kann auf die Gleichung von Boyle (1977) zurückgegriffen werden.

5.6.5 Ergebnisse und Datenauswertung

Nachfolgend werden die Analysen des Abwassers, sowie die Ergebnisse aus den Batchversuchen und dem Versuchsrohr aufgeführt. Zuerst wird das verwendete Abwasser charakterisiert. Daraufhin werden die H_2S -Ergebnisse der Batchversuche mit den Ergebnissen aus den statischen Modellen verglichen. Abschließend werden die Ergebnisse aus dem H_2S -Versuchsrohr dargestellt.

5.6.5.1 Zusammensetzung des verwendeten Abwassers

Als Substrat für die Batchversuche wurde ausschließlich das bereits beschriebene Abwasser verwendet. Es handelt sich dabei um den Trockenwetterzulauf der Kläranlage Bochum-Ölbachtal. Der Entnahmeort ist identisch zu dem des H_2S -Rohres. Die Ergebnisse der Elementaranalyse und der Laboranalyse des Abwassers sind in Tabelle 37 aufgeführt.

Tabelle 37: Substrateigenschaften in Form einer Labor- und einer Elementaranalyse des in den Batchversuchen verwendeten Abwassers

Laboranalyse		Elementaranalyse		
		prozentualer Anteil (auf 100% genormt) [Gew.-%]		
CSB _{hom} [mg/L]	530 ± 63	Kohlenstoff	C	50,5
Sulfatkonzentration [mg/L]	98	Wasserstoff	H	7,4
TR [g/kg]	0,83 ± 0,15	Sauerstoff	O	33,7
oTR [% _{TR}]	59 ± 7	Stickstoff	N	4,2
		Schwefel	S	4,2

5.6.5.2 Ergebnisse der Batchversuche

Aus den insgesamt 24 durchgeführten Versuchen sind in Abbildung 94 jeweils die Versuchsreihen mit der höchsten Gasausbeute dargestellt. Für die Auswertung der Batchversuche wird davon ausgegangen, dass sich die Gaszusammensetzung in den Probenflaschen über den gesamten Versuchszeitraum nicht verändert. Deshalb kann aus der abschließenden Gasanalyse auf die H₂S-Menge in der Flasche geschlossen werden. Da sich das Gas nur sehr langsam bildete, hatten die einzelnen Versuchsreihen zum Teil eine Dauer von über zwei Monaten. Hierdurch war nur eine begrenzte Anzahl von Versuchseinstellungen möglich. Die Versuche sind nach Impfschlamm (BP = Blindprobe, SH = Sielhaut, SED = Sediment, AB = Ablagerung), der Nummer des Durchlaufes und der verwendeten Drucksonde benannt. Die schwarzen Quadrate geben in der Abbildung den Zeitpunkt des Abbruchkriteriums nach VDI-Richtlinie 4630 an. Zusätzlich ist die entstandene Gasmenge bis zu diesem Zeitpunkt aufgetragen. Mit dem Zeitpunkt der Unterschreitung der Gasproduktion kann eine Aussage darüber getroffen werden, wie lange die mikrobielle Biomasse aktiv war bzw. wann das Substrat mikrobiologisch abgebaut war.

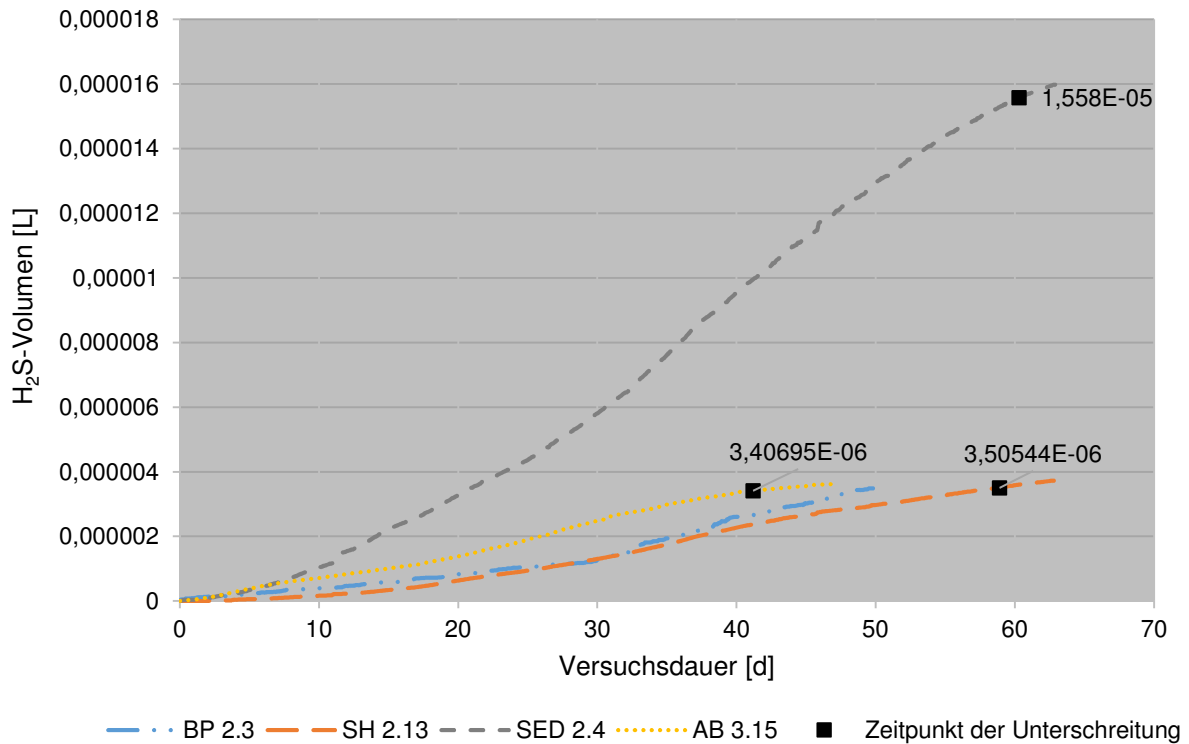


Abbildung 94: Gasentwicklung von drei unterschiedlichen Impfschlämmen sowie der Blindprobe. Zusätzlich ist der Zeitpunkt des Abbruchkriteriums mit einem Quadrat gekennzeichnet.

Am Auffälligsten ist die deutlich erhöhte H_2S -Produktion in dem untersuchten Sediment. Diese fällt zum Zeitpunkt des Abbruchkriteriums viermal höher aus als alle anderen Kurven. Zudem ist der Reinertrag aus Ablagerungen und Sielhaut nahezu identisch zum Ertrag aus reinem Abwasser. Um einen aussagekräftigen Bezug zwischen der Blindprobe und den eingesetzten Impfschlämmen herstellen zu können, werden im Folgenden die Erträge und Produktionsraten genauer verglichen.

Tabelle 38: Biogasmengen sowie Ertragsraten aus den vorausgehend beschriebenen Batchversuchen

	Dauer bis zur Unterschreitung [d]	Biogasmenge [L]	Vol.-%-H ₂ S [%]	H ₂ S _g [L]	oTR _{ab} * [mg]
BP 2.3	18,6	0,370	0,0017	$6,77 \cdot 10^{-6}$	n.n.*
SH 2.13	58,9	0,933	0,0004	$3,5 \cdot 10^{-6}$	5,0
SED 2.4	60,3	0,888	0,0009	$1,6 \cdot 10^{-5}$	21,3
AB 3.6	41,2	0,638	0,0005	$3,4 \cdot 10^{-6}$	n.n.*
Erträge im Gas		Produktionsraten im Gas			
	L_{H₂Sg}/mg_{oTR}	g_{H₂Sg}/g_{oTR}	g_{H₂Sg}/(m²·d)	mg_{H₂Sg}/(m²·h)	
SH 2.13	$7,0 \cdot 10^{-7}$	$8,5 \cdot 10^{-7}$	$9,0 \cdot 10^{-9}$	$3,8 \cdot 10^{-7}$	
SED 2.4	$7,3 \cdot 10^{-7}$	$8,9 \cdot 10^{-7}$	$3,9 \cdot 10^{-8}$	$1,6 \cdot 10^{-6}$	
AB 3.6	n.n.*	n.n.*	$1,3 \cdot 10^{-8}$	$5,2 \cdot 10^{-7}$	

*Probe war auf oTR-Basis nicht bilanzierbar

Die augenscheinlich großen Unterschiede zwischen dem Sediment und den anderen Proben sind bezogen auf die organische Trockensubstanz (oTR) bzw. auf die Biofilfläche nicht mehr vorhanden. Allerdings wurden im Batchversuch mit Sediment 21,3 mg_{oTR} im Gegensatz zu 4,9 mg_{oTR} in Batchversuchen mit Sielhaut abgebaut. Die Produktionsraten aus der Blindprobe sind bemerkenswert, da sie noch über denen der Sielhaut liegen. Der gemessene Volumenprozentanteil in der Blindprobe ist doppelt so hoch wie in den anderen Batchansätzen mit Impfschlamm. Somit sollte nicht nur sessile (festsitzende) Biomasse betrachtet werden, sondern auch planktonische (freischwebend), da hier das Nährstoffangebot deutlich besser ist. Entgegen der Literatur sind die Produktionsraten aus Versuchen mit Sielhaut nicht höher als bei den Versuchen mit Sediment. Die Erträge sind ähnlich einzuordnen, wobei die mikrobielle Masse im Sediment länger aktiv ist.

Zusätzlich kann über das Gesetz nach Henry die Gesamtmenge an H₂S in der Batchflasche berechnet werden. Im Zusammenhang mit dem Probenvolumen kann die H₂S-Masse ermittelt werden und in die tägliche Produktionsrate umgerechnet werden, die in Tabelle 39 aufgelistet werden.

Tabelle 39: H₂S-Produktionsraten der Batchversuche in Wasser und Gasphase

Versuch (Volumen)	Konzentration [mg/L]	tägliche Menge [mg/d]	Produktionsrate Wasserphase [mg/(m ² ·h)]	Produktionsrate Gasphase [mg/(m ² ·h)]	Produktionsrate Summe [mg/(m ² ·h)]
SH 2.13 (0,6 L)	1,6281	0,0166	0,0864	$3,8 \cdot 10^{-7}$	0,0864
SED 2.4 (0,7 L)	3,6632	0,0443	0,2307	$1,6 \cdot 10^{-6}$	0,2307
AB 3.6 (0,6 L)	2,0351	0,0296	0,1544	$5,2 \cdot 10^{-7}$	0,1544

Im Vergleich zu den Produktionsraten in der Gasphase wird in der Wasserphase deutlich mehr H₂S gebunden. Gerade in Batchversuchen, bei denen der Druck im Laufe des Versuches ansteigt, sollte dieser Aspekt mit berücksichtigt werden. In diesem Fall wird mit der Summe aus beiden Werten gerechnet. Dies ist auch sinnvoll, da einmal produzierter Schwefelwasserstoff mit großer Wahrscheinlichkeit durch Turbulenzen ausstripfen wird. Des Weiteren werden im Folgenden die in Tabelle 40 aufgeführten Mittelwerte aus allen Batchversuchsreihen zum Vergleich mit Literaturquellen aufgeführt.

Tabelle 40: Durchschnittliche Produktionsraten aus Gas- und Wasserphase aller Versuchsreihen in Bezug auf den verwendeten Impfschlamm

Impfschlamm	Produktionsrate mg/(m ² ·h)	Produktionsrate g/(m ² ·d)
Sielhaut	0,086	0,0021
Sediment	0,314 ± 0,14	0,0075
Ablagerung	0,107 ± 0,07	0,0026

5.6.5.3 Gegenüberstellung der Ergebnisse der Batchversuche mit den statischen Modellen

Dieses Kapitel dient zur Einordnung der durchgeführten Batchversuche mit den theoretischen Werten aus Modellansätzen, sowie Werten der Literatur. Für die Berechnung nach Hvitved-Jacobsen et al., Peu et al. wurde eine Ergebnistabelle (Tabelle 42) zusammengestellt, welche am Ende des Kapitels aufgeführt ist.

Boyle et al. (1977). Durch eine Elementaranalyse des Abwassers ist von einem theoretischen Biogaspotential von 0,969 L/g_{oTR} auszugehen (siehe Tabelle 41).

Tabelle 41: Anteile der Gase am Biogaspotential des verwendeten Abwassers für die Batch-Versuche nach Boyle et al. (1977)

Gase		Volumen [L/g _{oTR} abgebaut]	Anteil [Vol.-%]	Ertragsraten Y [g/g _{oTR} abgebaut]
Methan	CH ₄	0,526	54	0,377
Kohlendioxid	CO ₂	0,414	43	0,814
Schwefelwasserstoff	H ₂ S	0,0289	3	0,0445
Summe		0,969		

In den Versuchen mit Sielhaut wurden 0,714 L_{Biogas}/g_{oTR} gemessen, während die Biogaserträge mit Sediment bei 0,734 L/g_{oTR} lagen. Damit liegen die gemessenen Werte in einem durchaus realistischen Rahmen, da der Ansatz nach Boyle et al. (1977) von einem einhundert prozentigen Abbau des Substrates ausgeht. In der Realität ist ein Abbau von Abwasser von 85 % als realistisch anzunehmen. Bei Batchversuchen kam hinzu, dass Rohabwasser verwendet wurde, in dem eine Vielzahl inerte Stoffe enthalten waren. Werden die Gesamtsulfiderträge der Versuche mit Sediment und Sielhaut mit dem abgebauten oTR verglichen, können Erträge von 0,17 g_{H₂S}/mg_{oTR} für die Versuche mit Sielhaut und 0,51 g_{H₂S}/mg_{oTR} für Versuche mit Sediment berechnet werden. Nach Boyle et al. sind Erträge von 0,05 g_{H₂S}/mg_{oTR} zu erwarten. Damit liegen die theoretischen Werte deutlich unter den in den Batchversuchen berechneten. Es ist davon auszugehen, dass ein Großteil des Schwefels in den Impfschlämmen gebunden sein muss.

Hvitved-Jacobson et al. (2002)

Als Berechnungsgrundlage dient hier in erster Linie die Biofilmaufwuchsfläche. Diese wird bei den Batchversuchen als Flaschenboden angenommen. Damit ergibt sich bei einem Durchmesser von 10,1 cm eine Fläche von 0,008 m². Das Volumen in der Flasche beträgt für Versuche mit einer Zugabe von 100 g Impfschlamm (Sielhaut/Ablagerungen) 0,0006 m³ bzw. 0,0007 m³ bei Zugabe von 200 g Impfschlamm (Sediment). Hieraus ergibt sich ein A/V-Verhältnis von 13 und 11 m²/m³. Das verwendete Abwasser ist durch einen homogenisierten CSB von 530 g_{CSB}/m³ charakterisiert. Hvitved-Jacobson et al. (1998) geben für einen homogenisierten CSB 600 g_{CSB}/m³ typische Werte für gelöstes Substrat von 0-50 g_{CSB}/m³ und ein partikuläres,

leicht hydrolysierbares Substrat von 50-100 $\text{g}_{\text{CSB}}/\text{m}^3$. Für die Berechnung wurde deshalb, für gelöstes Substrat ein Wert von 30 $\text{g}_{\text{CSB}}/\text{m}^3$ und für leicht hydrolysierbares Substrat ein Wert von 70 $\text{g}_{\text{CSB}}/\text{m}^3$, gewählt. Die abwasserspezifische Ertragskonstante k kann zur Kalibrierung des Modells genutzt werden. Da im Einzugsgebiet der Kläranlage Bochum-Ölbachtal keine größeren Industrieeinleiter vorhanden sind, wurde hier mit 0,0015 ($\text{g}_S/(\text{g}_{\text{CSB}} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{h})$) für mittelstark belastetes kommunales Abwasser gerechnet. Alle weiteren Parameter können Tabelle 42 entnommen werden.

Laut Modell ergeben sich Werte zwischen 0,106 $\text{mg}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$ (Zugabe von 100 g Impfschlamm (Biofilm/Ablagerungen)) und 0,121 $\text{mg}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$ (Zugabe von 200 g Impfschlamm (Sediment)). In den Batchversuchen wurden Werte von 0,086 $\text{mg}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$ für Sielhaut, 0,314 $\text{mg}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$ für Sediment und 0,107 $\text{mg}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$ für Ablagerungen gemessen. Für die Batchversuche mit Ablagerungen und Sielhaut stimmen die Ergebnisse des Modells sehr gut überein.

Peu et al. (2012)

In Anlehnung an die Berechnungsmethode nach Boyle et al. (1977) werden auch hier die Schwefelmasse und das Biogaspotential BBP benötigt. Laut Analyse bestehen 4,2 % des TR aus Schwefel. Daher ergeben sich für die Schwefelmasse pro kg TR des Abwassers 42 $\text{g}_S/\text{kg}_{\text{TR}}$. Der TR-Gehalt des Abwassers liegt bei 0,83 $\text{g}/\text{kg}_{\text{TR}}$. Pro abgebautem kg oTR entstehen 969 L Biogas. Für das Biogas ergibt sich ein maximaler H_2S -Gehalt von 0,0025 %. Somit sind nach diesem Ansatz zum ersten Mal höhere Werte für H_2S zu erwarten, als tatsächlich gemessen wurden.

Tabelle 42: Übersicht der Ergebnisse der Batchversuche mit Gegenüberstellung zu den statischen Modellen

Ansatz	Eingangswerte	Theoretischer Wert	Reale Messung	Abweichung
Hvitved-Jacobsen et al.	gelöstes und partikuläres Substrat: 100 g _{CSB} /m ³ Verhältnis zwischen Fläche und Volumen: 13,11 m ² /m ³ Temperatur: 20,5 °C	$r_{H_2S} = 0,0,106 \text{ mg}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$ (100 g) für Sichelhaut und Ablagerung $r_{H_2S} = 0,121 \text{ mg}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$ (200 g) für Sediment	Sichelhaut: 0,086 mg/(m ² ·h) Sediment: 0,314 mg/(m ² ·h) Ablagerungen: 0,107 mg/(m ² ·h)	22% -67% -0,1%
Peu et al.	Schwefelgehalt: 42 g _S /kg _{TR} TR-Gehalt des Abwassers: 0,83 g/kg biochemisches Potential (nach Boyle): 969 L/kg	$H_2S_{\text{max}} = 0,0025\%$	H_2S_{max} (BP 2.3): 0,0017% H_2S_{max} (SH 2.13): 0,0004% H_2S_{max} (SED 2.4): 0,0009% H_2S_{max} (AB 3.6): 0,0005%	-40% -500% -170% -400%

In der Literatur können weitere Kenngrößen für die Entstehung von H₂S gefunden werden. Diese sind in Tabelle 43 in Abhängigkeit von ihrem Entstehungsort zusammengefasst.

Tabelle 43: Vergleich von Literaturkennwerten mit den Ergebnissen der Batchversuche

Kennwerte aus der Literatur [g _{H₂S} /(m ² · d)]	Durchschnittliche Produktionsrate
Sielhaut, r_{H₂S} = 0,002 g/(m²·d)	
1) 24,00	
2) 1,27	
3) 0,48-2,40 (bei = 200 mg/L)	
4) 6,00-26,00	
Sediment, r_{H₂S} = 0,008 g/(m²·d)	
5) 9,20 (Batchversuch)	
6) 12,80	
Quellen: 1) ATV-DVWK-M 154 (2003), 2) Hvitved-Jacobsen et al. (2002), 3) Guisasola et al. (2008), 4) Thistlethwayte (1972), 5) Liu et al. (2015), 6) Schmitt und Seyfried (1992)	

5.6.5.4 Betriebsprobleme mit dem H₂S-Testrohr

Da die Versuche zu Beginn der Wintermonate begonnen wurden, kam es jahreszeitlich bedingt zu einer Abkühlung des Abwassers. Dies hatte zur Folge, dass im Rohr kaum bis gar keine biologische Aktivität festzustellen war. Aus diesem Grund wurde ein Thermostat verwendet.

Ein Problem stellte die Online-Messtechnik, insbesondere die S::can-Sonde, dar. Nachdem ein Servicetechniker von S::can eine ausführliche Einweisung vor Ort vorgenommen hatte, konnten repräsentative Ergebnisse erzeugt werden. Deutlich wird allerdings auch, dass es sich um eine optische Messung handelt die keineswegs herkömmliche Laboranalysen ersetzen kann. Da die Messwerte der S::can-Sonde im Verlauf der Versuche des Öfteren sehr hohe Werte annahmen, wurden für den 09.02.2015 drei Proben des Abwassers genommen, um sie mit den Messwerten der S::can-Sonde zu vergleichen. Analysiert wurden in den Proben die CSB, AFS und Sulfatkonzentration um 9, 12 und 15 Uhr. Es ist zu erkennen, dass die Messwerte der S::can-Sonde über den Werten der Laborproben lagen. Bei AFS lagen die S::can

Werte 150 % über den im Labor gemessenen AFS-Werten. Bei den CSB-Werten wurden Abweichungen von 30 % gemessen.

Zusätzlich kam es nach einer gewissen Laufzeit der Versuchsreihe zu Drifts in den Messergebnissen. In Abbildung 95 ist gut zu erkennen, dass die Werte innerhalb von vier Tagen deutlich zunehmen. Aus diesem Grund wurden die Ergebnisse der Online-Sonde trendbereinigt.

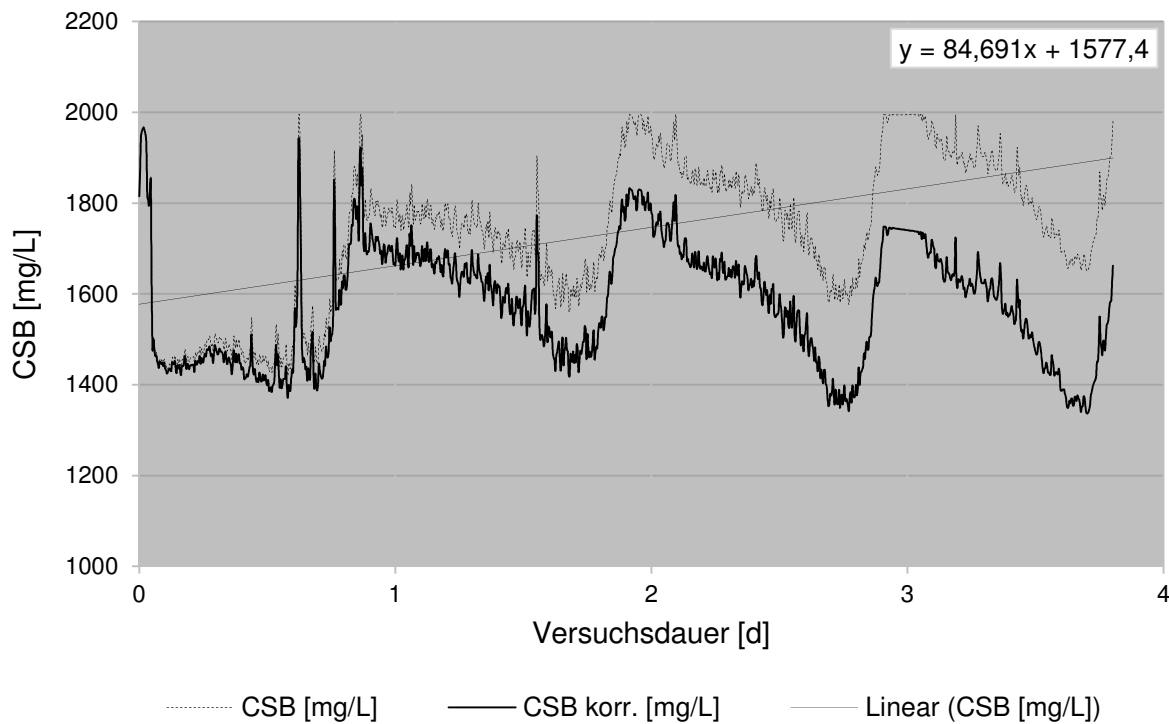


Abbildung 95: Anpassung der Sondenergebnisse durch Trendbereinigung

Ein großer Vorteil der Online-Messtechnik ist, dass es möglich ist, eine Vielzahl von Messergebnissen kostengünstig zu erzeugen. Dabei sind leichte Abweichungen vertretbar. Durch die Messungen war es sehr gut möglich, die täglichen Schwankungen im Zulauf des Testrohres aufzuzeichnen und gegebenenfalls Störfälle im Zulauf besser zu erkennen.

Im Folgenden wird exemplarisch die Versuchsreihe fünf genauer beschrieben. Dabei wurde bei Versuchsreihe fünf das Testrohr über einen Versuchszeitraum von mehr als 60 Tagen betrieben, um dem Biofilm ausreichend Entwicklungszeit zu geben. Diese Versuchsreihe wurde im März gestartet und endete Mitte Mai. Während dieser Zeit stieg die Abwassertemperatur von anfangs 11 °C bis auf 17 °C, wodurch die mikrobiologische Aktivität deutlich anstieg.

5.6.5.5 Versuchsergebnisse

Die Versuchsreihe startete am 27.02.2015 um 15 Uhr und lief zunächst für 7 Tage. Der durchschnittliche Durchfluss wurde zu 390 ± 40 L/h eingestellt. Die mittlere Temperatur war mit etwa $10,7 \pm 0,8$ °C noch sehr gering. Der pH-Wert lag mit 7,8 unverändert im neutralen Bereich.

Durch eine intensive Reinigung der Online-Messtechnik konnten in dieser Versuchsreihe keine Messfehler festgestellt werden. In Abbildung 96 sind die H₂S- und CSB-Konzentrationen sowie der Durchfluss dargestellt. Die CSB-Konzentrationen verliefen über den gesamten Versuchszeitraum in einem Bereich 400 und 500 mg/L, wobei die Zulaufspitzen wieder in den Nachmittagsstunden zu verzeichnen sind. Im Vergleich zur vorherigen Versuchsreihe konnten durch eine Trendlinie keine deutlichen Drifts in der CSB-Konzentration festgestellt werden, weshalb hier auf eine Trendbereinigung verzichtet wurde.

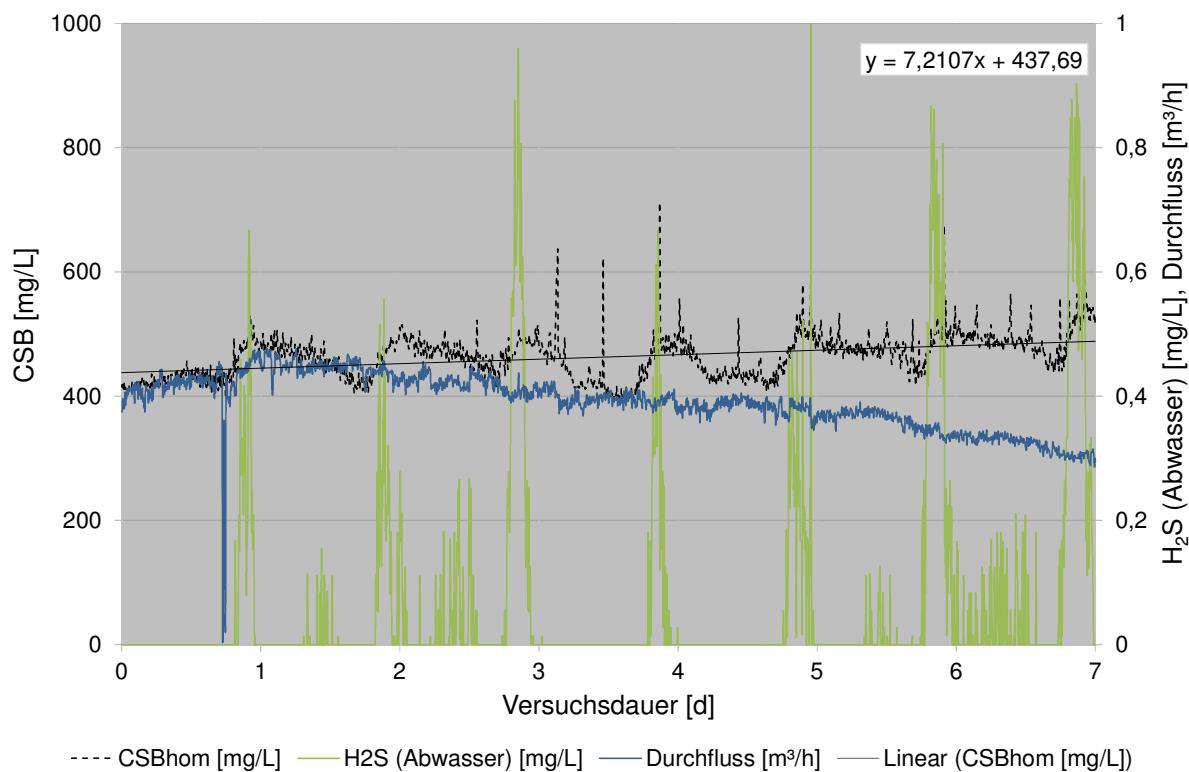


Abbildung 96: Teil 1 von Durchlauf 5. Innerhalb eines Tages ist H₂S im Abwasser messbar.

Zur Nachmittagszeit sind wieder Anstiege der H₂S- und CSB-Konzentrationen im Abwasser zu erkennen. Die Anstiege der H₂S-Konzentration auf 0,5 bis 1 mg/L sind sehr kurz. Anstieg und Abfall der Kurven dauern jeweils etwa 2,5 h. Die Anstiege der CSB-Konzentration auf den Tageshöchstwert von 500 bis 600 mg/L dauern etwa 7 Stunden, der Abfall auf den niedrigsten Tageswert (400 mg/L) etwa 17 Stunden. Die Höchstwerte beider Kurven überlagern sich zeitlich.

Da die H_2S -Konzentrationen in der Abluft sehr gering ausfielen, sind in Abbildung 97 die Konzentrationen für Schwefelwasserstoff in der Abluft und im Abwasser dargestellt. Hier wird deutlich, dass auf jeden steilen und gleichzeitig kurzen Anstieg der Konzentration im Abwasser ein länger dafür aber weniger steiler Anstieg in der Abluft zu verzeichnen ist. Eine mögliche Erklärung könnte sein, dass das H_2S zwar relativ schnell in Testrohratmosphäre ausstrippt, dann aber nur langsam über die H_2S Messung in der Abluft abziehen kann. Im Gegensatz dazu wird das im Wasser gelöste H_2S relativ schnell nach der Bildung wieder ausgetragen.

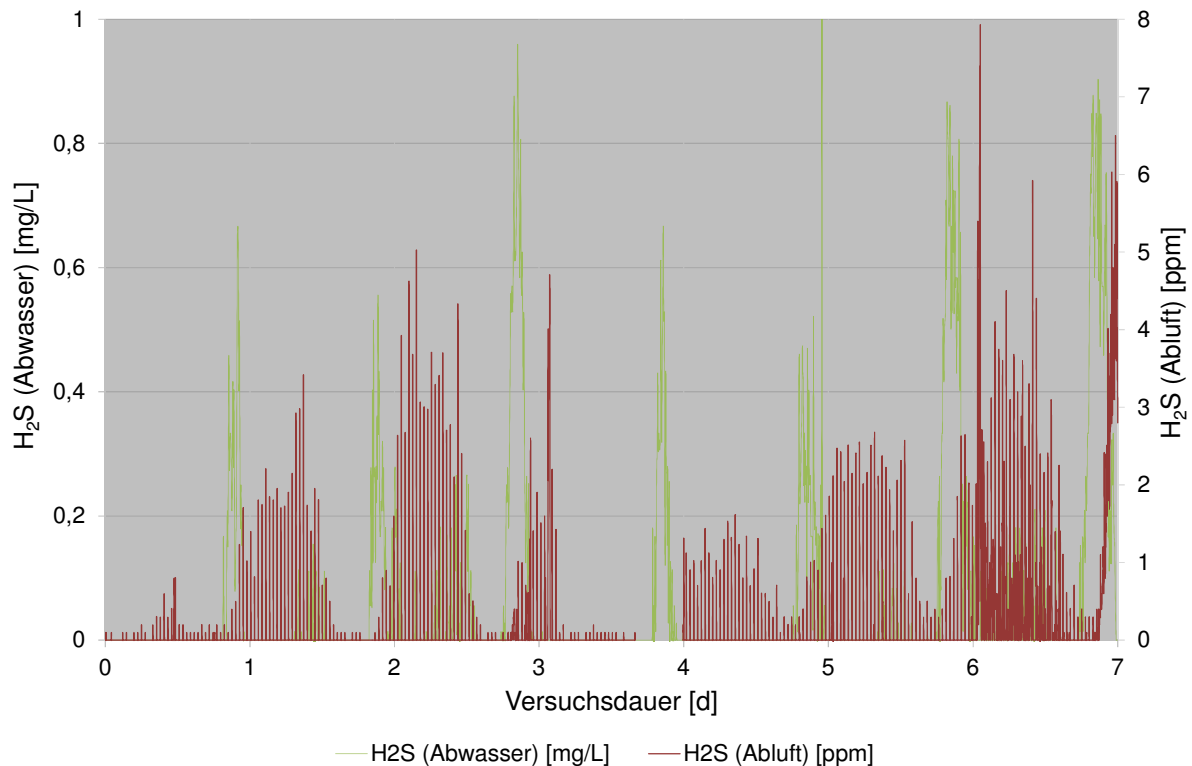


Abbildung 97: Gegenüberstellung von H_2S in Wasser und Abluft. An allen Messtagen kommt es zunächst zu einer Konzentrationsspitze im Abwasser. Darauf folgt eine längere Plateauphase in der Abluft auf.

Da in den durchgeführten Versuchen kaum noch relevante H_2S -Konzentrationen gemessen wurden, wurde das Versuchsrohr nach Abschluss des Durchlaufs weiter betrieben. Ab Versuchstag 50 sind die Daten wieder in Abbildung 98 aufgeführt. Zu diesem Zeitpunkt lag die mittlere Abwassertemperatur bei $14,8 \pm 0,6$ °C und die der Abluft bei $19,3 \pm 0,8$ °C. Die Mittlere CSB-Konzentration lag bei 580 ± 100 mg/L. Diese lag damit in etwa in dem Bereich wie zu Beginn der Messreihe. Im Vergleich zur CSB-Konzentration hat sich allerdings die H_2S -Konzentration in der Abluft im Mittel auf 45 ppm erhöht. Wie auch aus Abbildung 98 hervorgeht, liegt die Konzentration damit nahezu über den gesamten untersuchten Zeitraum über einer Konzentration von 1,5 ppm für eine signifikante H_2S -Konzentration. Des Weiteren kann eine Abhängigkeit zwischen dem Durchfluss und der H_2S -Konzentration festgestellt werden.

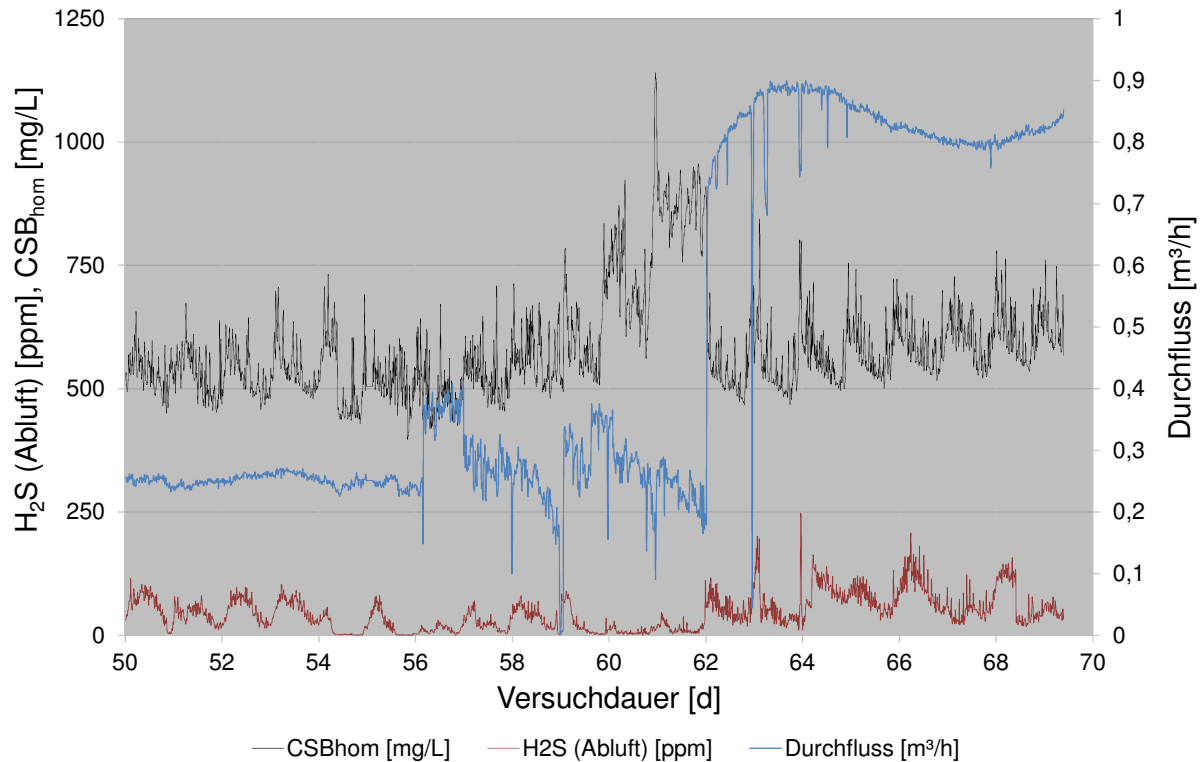


Abbildung 98: Schwefelwasserstoffkonzentration im Ablauf in Abhängigkeit von CSB-Konzentration und dem Durchfluss

Hierzu sind in Abbildung 99 die H₂S-Konzentrationen in Abluft und Abwasser sowie der Zeitpunkt der Durchflusserhöhung aufgeführt. Es wird deutlich, dass sobald der Durchfluss auf 0,800 m³/h gesteigert wurde, die Schwefelwasserstoffkonzentrationen im Abwasser deutlich abfielen. Sie stiegen in der Abluft auf bis zu 250 ppm an. Scheinbar sind die durch den erhöhten Durchfluss erzeugten Turbulenzen ausreichend gewesen, um größere Schwefelwasserstoffkonzentrationen ausstripfen zu lassen. Der entgegengesetzte Effekt kann in Abbildung 98 an Versuchstag 60 bis 62 festgestellt werden, an denen der Durchfluss leicht abfiel.

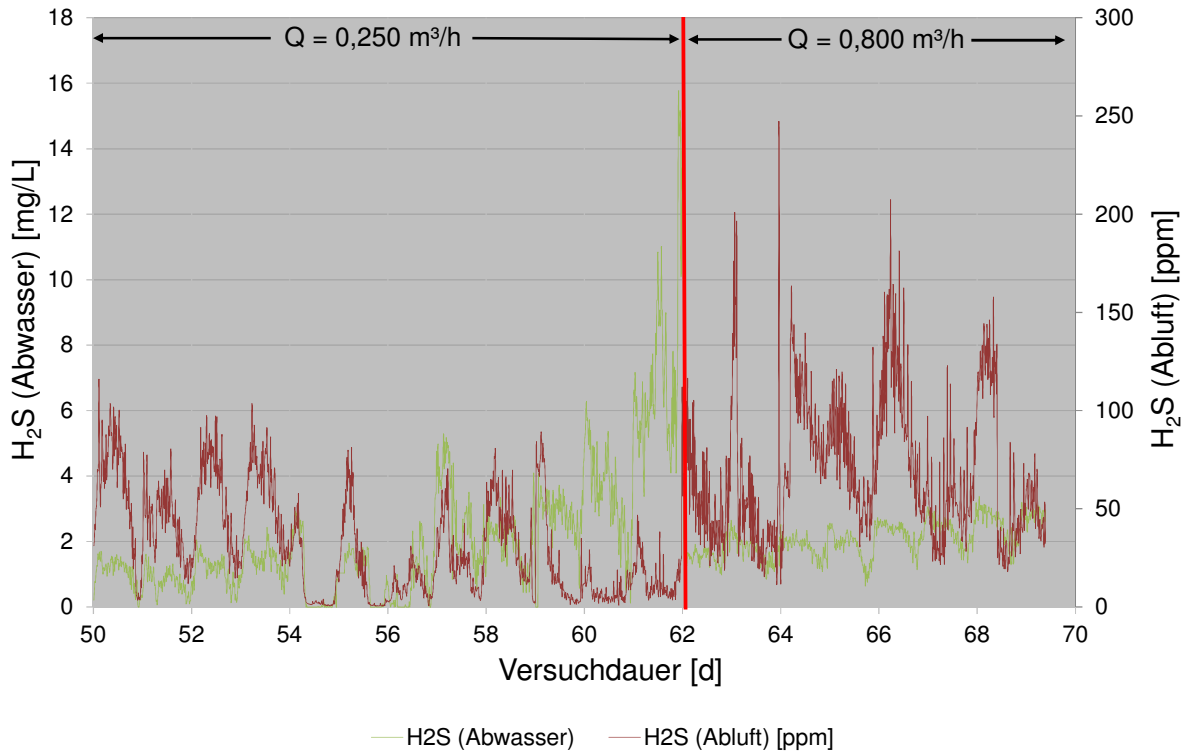


Abbildung 99: H₂S-Konzentration in Abwasser und Abluft in Abhängigkeit zum Durchfluss. Mit zunehmenden Durchfluss steigt die Konzentration des H₂S in der Abluft und sinkt im Abwasser

Zusammenfassend zeigen die Diagramme in Abbildung 98 und Abbildung 99, dass sich nach einem Zeitraum von 50 Tagen in dem untersuchten Versuchsrohr erhöhte H₂S-Konzentrationen einstellten. Diese lagen deutlich über den Werten, die in Phase I gemessen wurden. Durch diese Versuche lässt sich zeigen, dass ab Temperaturen von etwa 15 °C mit einer erhöhten Schwefelwasserstoffbildung zu rechnen ist.

5.6.5.6 Dauer bis zur Entstehung von Schwefelwasserstoff im Versuchsrohr

Tabelle 44 zeigt die Dauer bis zur Messung signifikanter Konzentrationen in den Durchläufen 3, 4 und 5 nach Reinigung des Rohres.

Tabelle 44: Entstehung relevanter Mengen von H₂S in der Abluft und im Abwasser. Bei allen Durchläufen lag das entstandene H₂S im Wasser unter dem Schwellenwert.

Durchlauf	Q [L/h]	T [°C]	Abwasser	Abluft
3	390 ± 65	12,4 ± 2,0	2,29 mg/L nach 5,83 d (140h)	5 ppm nach 4 d (96 h)
4	600 ± 360	11,2 ± 2,3	2,86 mg/L nach 15,95 d (382 h)	33 ppm nach 2 min
5	390 ± 40	10,7 ± 0,8	1,21 mg/L nach 4,95 d (119 h)	2 ppm nach 0,95 d (23 h)

Im Abwasser lagen die Maxima zwischen 1,21 und 2,86 mg/L. Es ist auffällig, dass es in den Durchläufen mit einem durchschnittlichen Durchfluss von 390 L/h nur etwa 5-6 Tage dauert, bis die maximalen Werte gemessen werden können. In Durchlauf 4 mit einem Durchfluss von durchschnittlich 600 L/h sind es etwa 16 Tage bis zur Messung des Maximalwertes. Dagegen ist die Versuchsdauer bis eine signifikante H₂S-Konzentration in der Abluft gemessen wird sehr unterschiedlich. Diese liegt in Durchlauf 3 und 5 bei ein und vier Tagen. In Durchlauf 4 wird der Wert hingegen sofort gemessen.

Da hohe Temperaturen die Sulfidbildung begünstigen, war zu erwarten, dass in dem Durchlauf mit der höchsten Temperatur (Durchlauf 3 mit 12,4 °C) die höchsten Sulfidkonzentrationen zu messen sind. Im Vergleich mit Durchlauf 5 mit 10,7 °C kann die These bestätigt werden. Insgesamt betrachtet wurden die höchsten H₂S-Konzentrationen jedoch in dem Durchlauf mit dem höchsten Durchfluss gemessen. Gründe für die kurze Dauer bis zu einer signifikanten H₂S-Messung in der Abluft könnten sein, dass die Bildung von H₂S nicht nur in den Sedimenten und den Sielhäuten, sondern auch im Abwasser selbst stattfindet. Dies kann unter anderem mit der Gasproduktion in den Blindproben der Batchversuche verglichen werden.

5.6.5.7 Bewertung der Wandschubspannung und der Fließgeschwindigkeiten

Da es sich zeigt, dass mit zunehmenden Durchfluss auch die Dauer bis zur Entstehung von Schwefelwasserstoff verlängert wird, sollen hier die Wandschubspannungen und Geschwindigkeiten kontrolliert werden. Die mittlere Schubspannung wurde in Abhängigkeit zum hydraulischen Radius (Gleichung 3.7) berechnet. Gemessen wurden für die Durchläufe 3 und 5 Ablagerungshöhen von 10 mm und ein Wasserfüllstand von 20 mm. In Durchlauf 4 waren Ablagerungen von ebenfalls 10 mm und ein Wasserfüllstand von 50 mm zu messen.

Tabelle 45: Berechnung der Geschwindigkeiten v [m/s] und mittleren Schubspannungen τ [N/m²] der Durchläufe 3, 4 und 5

Durchlauf	Q [L/h]	v [m/s]	r_{hyd} [m]	τ [N/m ²]
3	390 ± 65	0,15-0,21	0,008	0,08
4	600 ± 360	0,03-0,13	0,017	0,17
5	370 ± 40	0,16-0,20	0,008	0,08

Die Fließgeschwindigkeit zur Schwefelreduktion liegt nach DWA-M 168, 2010 bei 0,8 m/s. Diese Geschwindigkeiten werden in keinem der Durchläufe erreicht. Die kritische Geschwindigkeit v_{krit} , bei der die Bildung von H₂S begünstigt wird, von 0,5 m/s wird ebenfalls in allen Durchläufen unterschritten. Gleiches gilt für die geforderten Schubspannungen zur Sielhautvermeidung von 3,35 N/m² (DWA-M 168, 2010). Die beiden Aufnahmen in Abbildung 99 die Ablagerungen im Versuchsrohr bei Beendigung von Versuchsreihe 3. Deutlich zu erkennen sind im linken Bild Ablagerungen im gesamten Bereich, in dem Abwasser floss. Im rechten Bild kann ein Biofilmbewuchs an den Rändern des Rohres erkannt werden. Dies zeigt, dass sich trotz der niedrigen Temperaturen kleiner 15 °C Biofilm aufbaute, jedoch die Entstehung von H₂S gehemmt wird.



Abbildung 100: Links: Blick in das Versuchsrohr zum Ende der Versuchsreihe 3 mit Ansammlung von Ablagerungen. Rechts: Draufsicht auf die entstandenen Ablagerungen, mineralisches Sediment in der Mitte des Rohres und Sielhaut an den Rändern.

5.7 Zusammenfassung der praktischen Untersuchungen

Die Ablagerungsbildung in der Kanaltteststrecke 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 eine Sielhaut aus, die mit dafür verantwortlich ist, dass sich kaum neue Faserstoffe ansammelten. Sielhaut führte bei der untersuchten Natursteinfliese zur Bildung von Ablagerungen. 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 Ablagerunginseln aus Faserstoffen hin zu einer gleichmäßigen, bis zu mehreren Zentimeter dicken, schwarzen Sedimentschicht.

Diese Entwicklung schlägt sich auch in dem in Kapitel 5.2 geschilderten Verlauf der Ablagerungsmengen nieder. Zu Beginn schwanken die Ablagerungsmengen noch sehr stark, da die einzelnen Ablagerunginseln 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.

Während der Versuchsreihen zeichnete sich ab, dass die Ablagerungsbildung mit zunehmender Versuchsdauer langsamer erfolgt. 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 diese 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 und durch das Versuchsrohr hinaus geschoben.

Neben hohen Ablagerungen kann es kurze Zeit (innerhalb von 1-2 Tagen) nach einer Reinigung wieder zu messbaren Schwefelwasserstoffkonzentrationen kommen. Dies ist darauf zurückzuführen, dass die Ansiedlung von Desulfurikanten sehr schnell erfolgt. Zusätzlich war bei den durchgeführten Batchversuchen festzustellen, dass auch ohne Zugabe von zusätzlichem Impfschlamm aus Abwasser relevante Mengen von Schwefelwasserstoff entstehen.

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 ($<1 \text{ N/m}^2$).

6 Betriebsorientierte Untersuchungen

6.1 Ziele und Vorgehensweise

Ziel der betriebsorientierten Untersuchungen war es, zunächst im Rahmen einer Ist-Analyse bei Kanalnetzbetreibern die betrieblichen Abläufe, typischen Schwachstellen und möglichen Synergiepotentiale in der Kanalreinigung zu beschreiben, zu analysieren und mögliche Verbesserungspotenziale zu erkennen. Die Ist-Analyse orientiert sich an dem nach (Zustands-, Prozess- und Wirkungsanalyse zur Entwicklung einer bedarfsorientierten Reinigungsstrategie für Kanalnetze, 2008) entwickelten Prozessmodell (Abbildung 101).

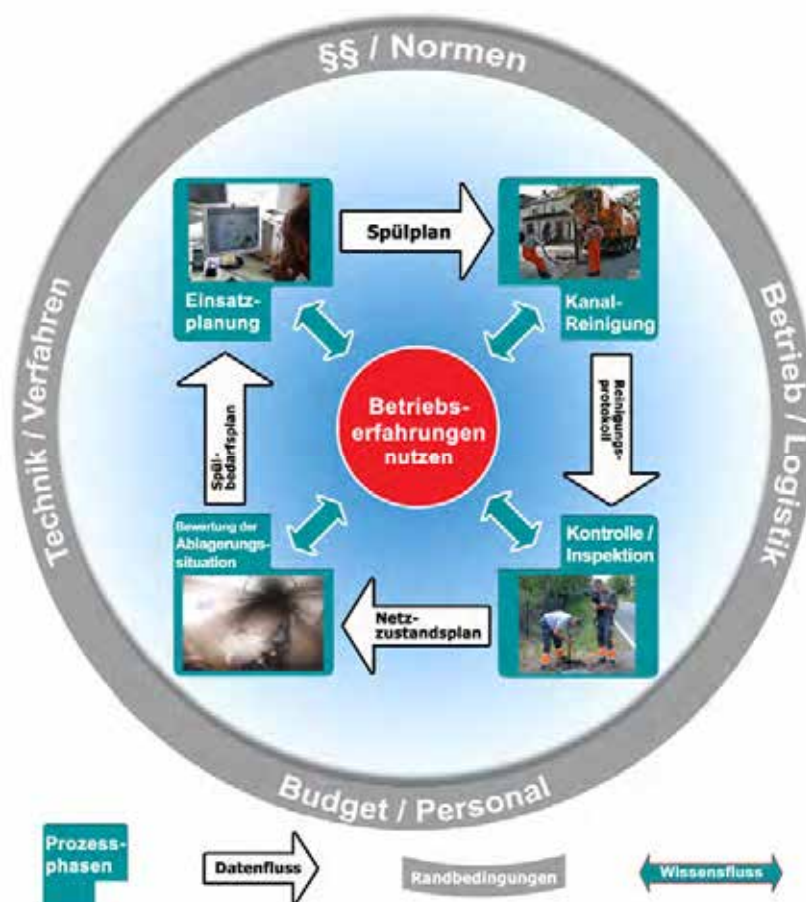


Abbildung 101: Prozessmodell für die Umsetzung der bedarfsorientierten Kanalreinigung (Zustands-, Prozess- und Wirkungsanalyse zur Entwicklung einer bedarfsorientierten Reinigungsstrategie für Kanalnetze, 2008)

Die Erkenntnisse der Projektarbeit wurden in Expertenworkshops und Betreibergesprächen hinsichtlich ihrer Relevanz für den Kanalbetrieb validiert. Auf dieser Basis wurden dann konkrete Maßnahmen zur Einführung einer bedarfsorientierten Kanalreinigung in den Modulen „Inspektion und Kontrolle“, „Bewertung der Ablagerungssituation“, „Einsatzplanung“, „Kanalreinigung“ und „Analyse typischer Schwachstellen im Netz“ vorgeschlagen. Für die dortigen Umsetzungsschwerpunkte

wurden dann in einer zweiten Phase des Projektes weitere Fallbeispiele in ausgewählten Kommunen ausgewertet und die Maßnahmenvorschläge auf dieser Basis überprüft und ggf. optimiert. Die Ergebnisse bildeten die Grundlage für die Erarbeitung bzw. Anpassung und Aktualisierung der in Kapitel 7 dargestellten Materialien zur Förderung des Wechsels zur bedarfsgerechten Kanalreinigung.

Die Wissensverbreitung wurde sowohl durch die Expertenworkshops im Rahmen des Projektes als auch ergänzende Veranstaltungen des IKT sichergestellt. Darüber hinaus wurden die Projektinhalte fortlaufend 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.

Ausgehend von den über 50 Teilnehmern der Info-Tage wurde der **Erfahrungskreis Kanalbetrieb** gegründet, an dem bereits mehr als 80 Netzbetreiber im Rahmen von Veranstaltungen teilgenommen haben. Aus diesem Kreis wurden im Laufe des gesamten Projektes geeignete Teilnehmer in die Expertenworkshops entsandt (vgl. Tabelle 46 und AP 5 nach Abbildung 11).

Tabelle 46: Teilnehmer an Veranstaltungen im Erfahrungskreis Kanalbetrieb

<ul style="list-style-type: none"> ▪ Abwasserentsorgung Salzgitter ▪ Abwassergesellschaft Gelsenkirchen ▪ badenova ▪ Entsorgungs- und Servicebetrieb Bocholt ▪ Entwässerungsbetrieb Straubing ▪ Entwässerungsbetrieb Würzburg ▪ Ertverband ▪ EWE WASSER ▪ Gelsenwasser ▪ Gemeinde Holzwickede ▪ Gemeinde Much ▪ Göttinger Entsorgungsbetriebe ▪ Immobilien- und Abwasserbetrieb Herford ▪ Infracor ▪ Ingolstädter Kommunalbetriebe ▪ Kasseler Entwässerungsbetrieb ▪ KMB Bensheim ▪ Kommunalwirtschaft Mittlere Bergstraße ▪ Lippeverband ▪ Münchner Stadtentwässerung ▪ Regionalgas Euskirchen ▪ Servicebetriebe Neuwied ▪ Stadt Ahaus ▪ Stadt Arnsberg ▪ Stadt Bad Salzuflen ▪ Stadt Bergisch Gladbach ▪ Stadt Bielefeld 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Stadt Bonn ▪ Stadt Bottrop ▪ Stadt Datteln ▪ Stadt Detmold ▪ Stadt Elmshorn ▪ Stadt Erkrath ▪ Stadt Gütersloh ▪ Stadt Hameln ▪ Stadt Ibbenbüren ▪ Stadt Meinerzhagen ▪ Stadt Monheim ▪ Stadt Münster ▪ Stadt Neukirchen-Vluyn ▪ Stadt Siegen ▪ Stadt Warburg ▪ Stadt Willich ▪ Stadt Witten ▪ Stadt Würselen ▪ Stadtbetrieb Entwässerung Bergkamen ▪ Stadtbetriebe Selm ▪ Stadtentwässerung Augsburg ▪ Stadtentwässerung Braunschweig ▪ Stadtentwässerung Dresden ▪ Stadtentwässerung Hagen ▪ Stadtentwässerung Hemer ▪ Stadtentwässerung Herne ▪ Stadtentwässerung Peine 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Stadtentwässerung Reutlingen ▪ Stadtentwässerung Stuttgart ▪ Stadtentwässerung Nürnberg ▪ Stadtentwässerungsbetrieb Lüdenschied ▪ Städtische Werke Magdeburg ▪ Stadtverwaltung Leichlingen ▪ Stadtwerke Aachen ▪ Stadtwerke Bad Oeynhausen ▪ Stadtwerke Bad Oldesloe ▪ Stadtwerke Kevelaer ▪ Stadtwerke Leer ▪ Stadtwerke Lennestadt ▪ Stadtwerke Rösrath ▪ Stadtwerke Speyer ▪ Stadtwerke Weiterstadt ▪ SWK SETEC ▪ TAV Bourtanger Moor ▪ Technische Werke Burscheid ▪ Technische Werke Freital ▪ Wasserverband Ithbörde ▪ Wilhelmshavener Entsorgungsbetriebe ▪ Wirtschaftsbetriebe Duisburg ▪ Wirtschaftsbetriebe Löhne ▪ Wolfsburger Entwässerungsbetriebe ▪ WTE Betriebsgesellschaft ▪ Zentraler Betriebshof Marl
---	---	---

Die weitere Vorgehensweise kann im Einzelnen wie folgt beschrieben werden:

Zunächst wurden im Rahmen von Betreiber-Interviews detaillierte Prozessanalysen anhand von Praxisbeispielen durchgeführt (Abbildung 102), u. a. bei: Entsorgungs- und Servicebetrieb Bocholt, Entwässerung Stadtbetrieb Bergkamen, Stadt Detmold, Stadtentwässerung Braunschweig, Stadtentwässerung Peine. Die Erfahrungen dieser Netzbetreiber dienten als Ausgangspunkt für die Vorbereitung von Themenveranstaltungen („Experten-Workshops“, AP 5), die sich an den vier charakteristischen Modulen der bedarfsorientierten Kanalreinigung orientieren (Abbildung 103):

- Workshop „Bedarfsorientierter Spülplan“ (Spülbedarfsplan)
Modul I: Inspektion und Kontrolle sowie
Modul II: Bewertung der Ablagerungssituation
- Workshop „Betriebsführungssysteme und Kanaldatenbanken“
Modul III: Einsatzplanung
- Workshop „Fahrzeug-Check für Hochdruckspül- und Saugfahrzeuge“
Modul IV: Kanalreinigung

Die Veranstaltungen dienten dem intensiven Erfahrungsaustausch der Abwasserbetriebe mit Blick auf die jeweiligen Prozesse. Handlungsoptionen wurden erkannt, Empfehlungen für eine effiziente Umsetzung erarbeitet und Best-Practice-Beispiele identifiziert. Im Workshop „Fahrzeug-Check für Hochdruckspül- und Saugfahrzeuge“ wurden darüber hinaus die Kriterien identifiziert, die mit Blick auf eine schonende und wirksame Kanalreinigung bei der Steuerung der Fahrzeuge zu beachten sind. Hierzu gehören insbesondere die fahrzeugspezifischen Minimal- und Maximaldrücke an der Pumpe, je nach Düsenauswahl, Schlauchlänge und Netzzustand.



Abbildung 102: Betreiber-Interview (links) und Startveranstaltung (Info-Tag) mit Priorisierung von Themenschwerpunkten durch die Teilnehmer (rechts)



Abbildung 103: Experten-Workshops: Ergebnispräsentation (links) und Prozessanalyse in Gruppenarbeit und Diskussion (rechts)

Ausgehend von den vorgenannten Veranstaltungen und Interviews wurde das Optimierung- und Synergiepotenzial für die einzelnen charakteristischen Phasen beschrieben und in Handlungsempfehlungen zusammengefasst.

Ergänzend zu den vorgenannten Modulen wurde eine Betreiber-Hotline „Störfälle im Kanalbetrieb“ eingerichtet, um typische betriebliche Schwachstellen und ggf. besondere Anlässe für die Kanalreinigung zu identifizieren (AP 4 – Modul V). Die Netzbetreiber wurden in den o. a. 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.

Umsetzungsphase

Für die dargestellten Maßnahmenmodule I-V wurden in der zweiten Phase des Projektes Umsetzungsschwerpunkte gewählt, entsprechende Fallbeispiele in ausgewählten Kommunen begleitet und die Maßnahmenvorschläge auf dieser Basis überprüft und ggf. optimiert.

Module	Ist-Analyse	Umsetzungsphase
Inspektion und Kontrolle	<ul style="list-style-type: none"> • Methoden Ablagerungserkennung • Ablagerungsdokumentation • Standardisierte Datenaufnahme • Schachterkennungssysteme 	<ul style="list-style-type: none"> • Optimierungspotenzial für die Datenaufnahme • Weiterentwicklung Muster-Protokoll
Bewertung der Ablagerungssituation	<ul style="list-style-type: none"> • Ablagerungsdaten • Erfassung der Ablagerungssituation • Einflussfaktoren für die Bewertung • Bewertungsschema 	<ul style="list-style-type: none"> • Einflussfaktoren für die Bewertung • Arbeitshilfe zur Bewertung
Einsatzplanung	<ul style="list-style-type: none"> • Betriebswissen aufbauen/sammeln • Anschaffung EDV-Systeme • Leistungsumfang/-grenzen • Kostenstruktur • Entscheidungshilfe 	<ul style="list-style-type: none"> • Marktübersicht EDV-Systeme • Anschaffung • Kostenstruktur (Fallbeispiele)
Kanalreinigung	<ul style="list-style-type: none"> • Überprüfung Leistungsfähigkeit • Fahrzeugspezifische Richt- und Grenzwerte • Schäden vermeiden, richtig Reinigen • Spülstrahlleistungsdichte • HD-Pumpe, HD-Düse, Vakuumpumpe • Lärmemissionen • Schulung zum Fahrzeugeinsatz 	<ul style="list-style-type: none"> • Leistungsprofil HD-Fahrzeug • Prüfprogramm HD-Fahrzeug • Erweiterter Prüfumfang
Störfall-Analyse	<ul style="list-style-type: none"> • Analyse typischer Schwachstellen • Störfallkataster • Dokumentation von Störfällen 	<ul style="list-style-type: none"> • Einführung und Entwicklung • Best-Practice • Störfallkatalog mit Handlungsempfehlungen

Abbildung 104: Projektphasen (I-Ist-Analyse, II – Umsetzungsphase): Handlungsschwerpunkte

In die Umsetzungsphase wurden zehn Netzbetreiber eingebunden, die Hälfte hiervon aus NRW. Darüber hinaus wurden weitere Netzbetreiber aus Bayern, Hessen, Rheinland-Pfalz und Baden-Württemberg in die Untersuchungen einbezogen, um auch einen Abgleich der Erfahrungen mit anderen Bundesländern zu erreichen.

Insgesamt fanden 26 vor Ort-Termine bei den Netzbetreibern statt (einschließlich Redaktionssitzungen für die Arbeitshilfen, vgl. Kapitel 7.2). Die Themenschwerpunkte sind in Tabelle 47 dargestellt.

Tabelle 47: Begleitung der Umsetzung, Themenschwerpunkte

Netzbetreiber	Termine	Themenschwerpunkte
Gladbeck	11.02.2014 15.04.2014 24.04.2014 06.08.2014	Kanalreinigung, BKR, Störfälle
Velbert	13.03.2014 31.03.2014 01.04.2014 06.08.2014 29.08.2014	Kanalreinigung, BKR, Störfälle, Einsatzplanung, EDV-Systeme, Spülfahrzeuge
München	20.05.2014 21.05.2014 22.05.2014 08.08.2014	Kanalreinigung, Ablagerungssituation, EDV-Systeme, Störfälle
Herne	12.06.2014 23.07.2014 07.08.2014	Kanalreinigung, Störfälle, Spülfahrzeuge
Gelsenkirchen	18.06.2014 26.08.2014	Kanalreinigung, Ablagerungssituation, Störfälle, Einsatzplanung, EDV-Systeme, Spülfahrzeuge (Duisburg, Wesel, Dülmen), Lärmemissionen; Saugleistung
Bottrop	27.06.2014 07.08.2014 29.08.2014	Kanalreinigung, BKR, Ablagerungssituation, Einsatzplanung, EDV-Systeme
Mainz	29.07.2014	EDV-Systeme
Kassel	11.08.2014 27.08.2014	Kanalreinigung, Einsatzplanung, EDV-Systeme
Pforzheim	25.09.2014	Spülfahrzeuge (Ludwigsburg, Mannheim, Stuttgart, Pforzheim), Lärmemissionen, Saugleistung
Stuttgart	30.07.2014	Störfall- und Beschwerdemanagement

Tabelle 48: Herstellerbefragung, Themenschwerpunkte

EDV-Hersteller	Termine	Themenschwerpunkte
CADMAP Consulting Ingenieurgesellschaft mbH	20.08.2014	Einsatzplanung, EDV-Systeme, Marktübersicht
Barthauer Software GmbH	Telefon-interview, Fragebogen	
DIG_MA Dienstleistungsges. mbH		
DW-Informationssysteme GmbH		
geoinform AG		
GreenGate AG		
HHK Datentechnik GmbH		
HST SYSTEMTECHNIK GMBH & CO. KG		
IBAK Helmut Hunger GmbH & Co. KG		
InfoDot GmbH		

Mettenmeier GmbH		
SBU		
tandler.com Ges. für Umweltinformatik mbH		
Fahrzeugaufbauhersteller		
Assmann GmbH	Telefon-inter- view	Lärmemissionen, Saugleistung, Fahrzeugaufbau
Kaiser AG		
KROLL Fahrzeugbau-Umwelttechnik GmbH		
MÜLLER Umwelttechnik GmbH & Co. KG		
Umwelttechnik Franz Janßen GmbH (Experteninterview – jedoch kein Hersteller)		
WIEDEMANN & REICHHARDT Maschinen- und Fahrzeugbau GmbH		
Düsenhersteller		
IBG HydroTech GmbH	Telefon-inter- view	Düsen, Düseneinsätze, Druckverluste
Enz Technik AG		
Brendle GmbH & Co. KG		
EHLE-HD Entwicklungs- & Vertriebsgesellschaft mbH		
USB DÜSEN GmbH		

Als Grundlage für die Erstellung von Marktübersichten und zum Abgleich der Anforderungen der Betreiber mit dem gegenwärtigen Marktangebot wurden relevante Produktgruppen identifiziert und ausgewählte Hersteller kontaktiert, die vorher durch die Netzbetreiber in den vor Ort-Terminen und Workshops benannt worden waren. Eine Übersicht gibt Tabelle 48. Mit insgesamt 24 Herstellern von EDV-Systemen, Fahrzeugen und Düsen wurden Telefoninterviews zu unterschiedlichen Themenschwerpunkten geführt. Für die Entwicklung der Marktübersicht EDV-Systeme wurde den EDV-Herstellern zusätzlich zu den Telefoninterviews ein Fragebogen (vgl. Abschnitt 6.4.3) zugesandt.

Zwischenergebnisse der Umsetzungsphase wurden auch in zwei Experten-Workshops den Netzbetreibern des Erfahrungskreises Kanalbetrieb vorgestellt (19.11.2013 und 04.09.2014) und Vorschläge für die weitere Ausrichtung der Untersuchungen aufgenommen. Sämtliche Ergebnisse werden im Abschluss-Workshop im Mai 2015 zusammengefasst.

6.2 Inspektion und Kontrolle

6.2.1 Ist-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 sog. „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 (Abbildung 105, oben). Folgende Fragestellungen wurden in diesem Workshop vertieft:

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

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 (Abbildung 105, unten).



Abbildung 105: 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).

Abbildung 106 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.

Reinigungsbefund											Bemerkungen sonstige bauliche Auffälligkeiten
im Schacht					im Kanal						
Deckel	Wandung	Steigisen	Rattenbefall	Wassereintritt	Geruch	Neu Fließ-/ Strömungsverhalten	Ablagerungsart Hindernisse	Ablagerungs- höhe	Ablagerungs- konsistenz	Entnahme- menge	
X	X	X									

<p>feinkörnig/ lose, grob/ breiig, steif/ fest/ tonig/ hart</p> <p>Ablagerungshöhe < 10% 10-15% > 15%</p> <p>300 bis 600 max: 3-6 cm 5-9 cm > 9 cm</p> <p> bis 1100 max: 11 cm 17 cm > 17 cm</p> <p>Wurzeln, Beton, Steine, Kies- Sand, Fette, Sichelhaut</p> <p>Langsam/ stehend 1, Langsam/ stehend 2, Verstopfung 3</p> <p>1 = ok 2 = erkennbar 3 = sehr stark</p>

Abbildung 106: Schema für die Dokumentation der Ablagerungserkennung, Auszug (Späth, 2011)

Im Dokumentationsprotokoll kann die Ablagerungssituation durch Zuordnung von definierten Kürzeln mit geringem Aufwand für das Betriebspersonal detailliert beschrieben werden. Beispielsweise kann die Ablagerungskonsistenz als f-feinkörnig/lose, g-grob/ breiig und h-steif/ fest/ tonig/ hart dokumentiert werden. Das wesentliche Kriterium „Ablagerungshöhe“ wird nennweitenabhängig durch Zuordnung in drei Klassen < 10 %, 10-15 % und >15 % dokumentiert.

Zur Früherkennung möglicher Störfälle werden im Rahmen der Sichtprüfung auch Rattenbefall, z. B. als Rattenkot an der Berme, und starke Geruchsentwicklung erfasst. Angaben zum Schachtzustand wie Undichtigkeiten und defekte Steigbügel werden in der Kategorie „im Schacht“ dokumentiert. Weitere Auffälligkeiten können als „Bemerkung“ hinterlegt werden. Synergien zwischen Kanalreinigung und Schachtinspektion sind so direkt nutzbar.

Ergänzend zur Ist-Analyse im Rahmen der o.a. Workshops wurden in einer bundesweiten Onlinebefragung unter Netzbetreibern die gängigen Methoden und Vorgehensweisen bei der Ablagerungskontrolle ermittelt. Die Ergebnisse der Befragung sind in Abbildung 107 dargestellt. Von mehr als 120 Teilnehmern der Umfrage

entfielen über die Hälfte der Antworten (59%) auf die Ablagerungskontrolle mittels Inaugenscheinnahme des Schachtgerinnes. Eine Ablagerungskontrolle der Haltung wird nur von 24% der Befragten durchgeführt. 17% führen Kanalreinigungsarbeiten ganz ohne vorherige Ablagerungskontrolle durch.

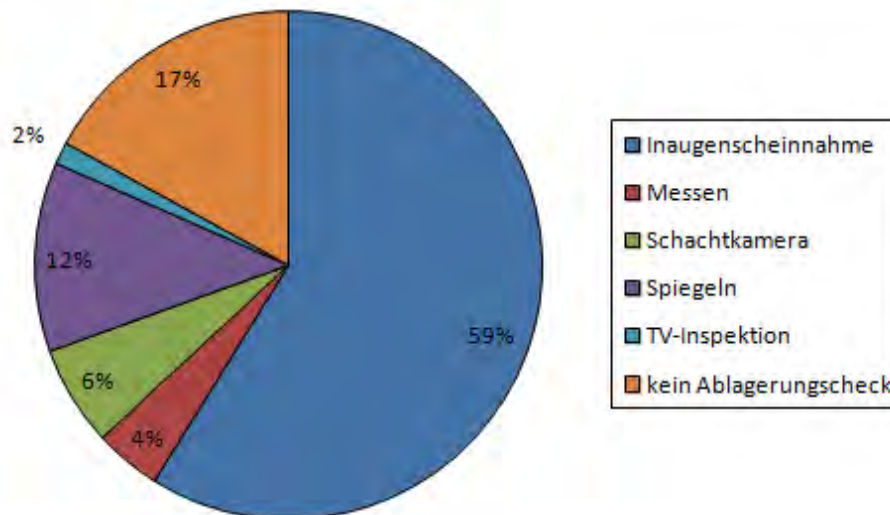


Abbildung 107: Onlinebefragung Ablagerungskontrolle (Treinen, 2014a)

Als **Ergebnis der Ist-Analyse** lassen sich folgende Hinweise und Empfehlungen zur Bewertung und Umsetzung des Moduls „Inspektion und Kontrolle“ zusammenfassen:

- 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 Einordnung 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.
- Grundsätzlich besteht beim Betriebspersonal gerade im Zusammenhang mit Optimierungsmaßnahmen bei der Inspektion und Kontrolle eine hohe Sensibilität mit Blick auf die künftigen Arbeitsaufgaben und hierfür notwendigen **Personalkapazitäten**. Die Konsequenzen eines Strategiewechsels sind ausreichend zu vermitteln. Ansonsten kann insbesondere Furcht vor möglichem Personalabbau zu einer Beeinflussung oder sogar Verfälschung von Ergebnissen führen.
- 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.

6.2.2 Umsetzungsschwerpunkte

Für die **Datenaufnahme der Kanalreinigungsarbeiten** gibt es derzeit keinen einheitlichen Standard. Da viele unterschiedliche Methoden und Strategien verfolgt werden, haben die Netzbetreiber i.d.R. eigene Vorgehensweisen und Formate bei der Datenaufnahme. Dies betrifft auch den Umfang der zu erfassenden Daten. Zur Unterstützung werden regelmäßig EDV-Systeme und mobile Datenein- und ausgabegeeignete Geräte eingesetzt. Vorhandene Schachterkennungssysteme, wie Barcodes oder Transponder, werden durch diese Systeme weitgehend abgelöst.

Das Hauptaugenmerk für die Entwicklung und Optimierung eines Standards zur Datenaufnahme liegt auf der Dokumentation der Ablagerungssituation als Basis für die anschließende Bewertung. Ziel in der Umsetzungsphase dieses Forschungsprojektes

war es somit zunächst, zu erkennen, welche der für die Ablagerungsbewertung bedeutenden Kriterien auch tatsächlich vor Ort mit vertretbaren Mitteln erfasst werden können. Anschließend war zu hinterfragen, wie sich die relevanten Daten dann auch in geeigneter Weise in eine Protokollvorlage überführen lassen. Die Form der Datenaufnahme (analog oder digital) spielte dabei nur eine untergeordnete Rolle.

Insgesamt wurden drei Netzbetreiber (in Velbert, Gladbeck, Herne) an jeweils zwei unterschiedlichen Terminen bei der Durchführung der Kanalreinigungsarbeiten begleitet. Unter Nutzung der jeweils aktuellen Version des in diesem Projekt entwickelten Ablagerungsprotokolls wurden **Optimierungspotenziale für die Datenaufnahme ermittelt** und auch das **Protokoll weiterentwickelt**. Die Ergebnisse wurden abschließend in Gesprächen mit drei weiteren Netzbetreibern (Münchner Stadtentwässerung (Treinen, 2014b), Stadt Bottrop (Treinen, 2014c) und KasselWasser (Treinen, 2014d)) auf Plausibilität überprüft und bestätigt.

Die wesentlichen Vorgehensweisen und Methoden der Datenaufnahme werden nachfolgend dargestellt und erläutert. Anschließend werden die Erkenntnisse in einem neuen Standard für eine einheitliche, praxisorientierte Datenaufnahme zusammengeführt.

6.2.3 Fallbeispiel 1: Technische Betriebe Velbert

Die Kanalreinigung wurde bei den technischen Betrieben der Stadt Velbert an zwei Tagen begleitet (van Laak, 2014a); es kamen zwei unterschiedliche Kanalreinigungsteams zum Einsatz. Grunddaten zum Kanalnetz und zum Kanalbetrieb in Velbert fasst Tabelle 49 zusammen.

Tabelle 49: Daten zum Kanalnetz und Kanalbetrieb, Technische Betriebe Velbert

Einwohnerzahl	83.000	
Fläche	74 km ²	
Kanalnetzlänge	319 km	
	Mischwasser	279,45 km
	Regenwasser	25,76 km
	Schmutzwasser	11,34 km
	Druckleitung	2,48 km
Schachtbauwerke	9.522 Stück	
Bedarfsorientierte Kanalreinigung	ja	
Reinigungsintervall	derzeit 4 Jahre	
Fahrzeuge	1 x Hochdruck-Spül- und Saugfahrzeug „Super 2000“	
	1 x Hochdruck-Spül- und Saugfahrzeug „Super 3000“	
	1 x Saugfahrzeug der Firma Hellmers	
	1 x TV-Inspektionsfahrzeug der Firma Fiat	
	1 x Kleinspülwagen der Firma Leistikow	
	1 x Pritschenwagen, Mercedes	
Schlauchmaterial	HD Gummi, 1/1/4 Zoll, Schlauchlänge 180 m	
Eingesetzte Düse	Rundumstrahlende Düse	
Druck am Fahrzeug	110 bar	
Inspektionsmethoden	Inaugenscheinnahme, Kanalspiegel, Schlauchanhaftungen	
Schachterkennungssystem	Nicht vorhanden	
EDV-System	Kanalinformationssystem S & K Tiffany (DW-Informationssysteme)	
Mobile Geräte	Laptops (fest installiert am Fahrzeug)	
Personal	12 Mitarbeiter	

Die Ablagerungskontrolle beschränkte sich bei ca. 80% der gereinigten Haltungen auf die Inaugenscheinnahme des Schachtgerinnes (Abbildung 108). Bei den übrigen Haltungen kam der mitgeführte Kanalspiegel zum Einsatz (Abbildung 109) oder es gab gar keine Kontrolle. Die Mitarbeiter wiesen darauf hin, dass sowohl die Anhaftungen am HD-Schlauch als auch die Geräusche beim Saugen Aufschluss über die Ablagerungsmengen und -zusammensetzung liefern können. Allerdings scheint dies sehr von der Erfahrung des jeweiligen Mitarbeiters abhängig und lässt sich kaum auf Dritte übertragen.



Abbildung 108: Inaugenscheinnahme des Schachtgerinnes (van Laak, 2014a)



Abbildung 109: Ablagerungskontrolle mit Kanalspiegel (van Laak, 2014a)

Für die Kanalreinigung wurde eine rundumstrahlende Düse verwendet und in der Regel ein Druck von 110 bar an der Pumpe eingestellt. Für Haltungen mit großem Gefälle wurden Druck und Durchfluss erhöht, um den Transport des Räumgutes zu sichern.

Nachfolgend sind die wesentlichen Erfahrungen und Erkenntnisse aus der Reinigungsbegleitung in Velbert dargestellt:

- Bei den gereinigten Kanälen handelte es sich ausschließlich um Mischwasserkanäle.
- Die Eigenschaften von Haltung, Schacht und Schmutzfang (Lage und Material) waren leicht erkennbar und protokollierbar.
- Überwiegend wurden Kanäle mit Verschmutzungsgrad $< 10\%$ gereinigt.
- Beim Fließ- bzw. Strömungsverhalten konnte ohne besonderen Aufwand optisch zwischen langsam, schnell und laminar, laminar unterschieden werden.
- Die Ablagerungskonsistenz war nicht oder nur eingeschränkt bestimmbar.
- Anzahl der Reinigungsgänge mit Druck und Durchfluss war gut protokollierbar.
- Rattenbefall war leicht zu erkennen und zu protokollieren.
- Weitere Defekte oder besondere Vorkommnisse wurden erkannt und differenziert protokolliert.
- Ablagerungsscheck mittels Inaugenscheinnahme ist gut möglich, allerdings müssen die Schachtnummern mit den Plänen auf dem Fahrzeug abgeglichen werden. Mobile Datenaufnahme kann hier weiterhelfen.
- Erfassen der Ablagerungshöhe schwierig: nur Schätzung möglich; Messung im Schacht technisch machbar, aber zu zeitaufwendig.

6.2.4 Fallbeispiel 2: Stadt Gladbeck

Die Kanalreinigung wurde in Gladbeck an zwei Tagen begleitet (van Laak, 2014b); es kam ein einzelnes Kanalreinigungsteam zum Einsatz. Grunddaten zum Kanalnetz und zum Kanalbetrieb in Gladbeck fasst Tabelle 50 zusammen.

Tabelle 50: Daten zum Kanalnetz und Kanalbetrieb, Stadt Gladbeck

Einwohnerzahl	76.000
Fläche	35,90 km ²
Kanalnetzlänge	212 km
Mischwasser	190 km
Regenwasser	10 km
Schmutzwasser	5 km
Druckleitung	7 km
Schachtbauwerke	ca. 4500
Regenrückhaltebecken	19 Stück
Stauraumkanal	1 Stück
Pumpwerke	7 Stück
Bedarfsorientierte Kanalreinigung	ja
Reinigungsintervall	2 Jahre
Fahrzeuge	2 x Hochdruck-Spül- und Saugfahrzeug Kroll 1 x Hochdruck-Spül- und Saugfahrzeug Müller 1 x Fahrzeug Senkkasten + Kleinkläranlagen
Schlauchmaterial	HD Gummi, 1/1/4 Zoll, Schlauchlänge 180 m
Eingesetzte Düse	Rundumstrahlende Düse
Druck am Fahrzeug	7-10 bar für Schacht-/Schmutzfänger (ohne Düse)
Inspektionsmethoden	Inaugenscheinnahme, Kanalspiegel
Schachterkennungssystem	Nicht vorhanden
EDV-System	Kanalinformationssystem S & K Tiffany (DW-Informationssysteme)
Mobile Geräte	Tablet-PCs
Personal	6 Mitarbeiter

Die Ablagerungskontrolle beschränkte sich fast ausschließlich auf die Inaugenscheinnahme des Schachtgerinnes. Der mitgeführte Kanalspiegel kam selten zum Einsatz.

Die Kanalreinigung wurde teilweise ohne Einsatz von Düsen, allein durch Spülung mit dem offenen Schlauch bei gleichzeitigem Absaugen ausgeführt, da die Mitarbeiter aus Erfahrung in einigen Bereichen von sehr geringen und leicht transportierbaren Ablagerungen ausgingen. Auf Rüst- und Umbauzeiten zwischen Schacht- und Haltungsreinigung wurde so weitgehend verzichtet. Auch die Schmutzfänger wurden in einigen Fällen, wie in Abbildung 111 dargestellt, ohne Düse mit einem Druck von 7-

10 bar gereinigt. Das beschriebene Vorgehen wird nach Aussage der Mitarbeiter ausdrücklich nur in besonders unkritischen Haltungen angewendet.



Abbildung 110: Mobile Datenerfassung in Gladbeck (van Laak, 2014b)



Abbildung 111: Schmutzfängerreinigung mit Freistrahl und Saugschlauch (van Laak, 2014b)

Nachfolgend sind die wesentlichen Erfahrungen und Erkenntnisse aus der Reinigungsbegleitung in Gladbeck dargestellt:

- Schachtnummern sind leicht protokollierbar, auch unterstützt durch Dateneingabe über mobile Tablet-PCs (Abbildung 110).
- Fast ausschließlich lag der Verschmutzungsgrad $<10\%$, nur einmal mittlerer Verschmutzungsgrad ($10-20\%$) und zweimal hoher Verschmutzungsgrad ($>20\%$).
- Beim Fließ- bzw. Strömungsverhalten konnte ohne besonderen Aufwand optisch zwischen langsam, schnell und laminar, laminar unterschieden werden.
- Die Ablagerungskonsistenz war nicht oder nur eingeschränkt bestimmbar.
- Anzahl der Reinigungsgänge mit Druck und Durchfluss war gut protokollierbar.
- Rattenbefall war leicht zu erkennen und zu protokollieren.
- Weitere Defekte oder besondere Vorkommnisse wurden gut erkannt und differenziert protokolliert.
- Erfassen der Reinigung von Schächten/Schmutzfängen problemlos möglich.
- Erfassen der Ablagerungshöhe schwierig: nur Schätzung möglich; Messung im Schacht technisch machbar, aber zu zeitaufwendig.
- Bei mittlerem oder hohem Verschmutzungsgrad ist die Konsistenz der Ablagerungen gut zu erkennen. Erkennen der Ablagerungskonsistenz steht in direktem Zusammenhang zur Ablagerungshöhe.

6.2.5 Fallbeispiel 3: Stadt Herne

Die Kanalreinigung wurde in Herne an zwei Tagen begleitet (van Laak, 2014c). Grunddaten zum Kanalnetz und zum Kanalbetrieb in Herne fasst Tabelle 51 zusammen.

Tabelle 51: Daten zum Kanalnetz und Kanalbetrieb, Stadt Herne

Einwohnerzahl	168.400
Fläche	51,41 km ²
Kanalnetzlänge	400 km
Mischwasser	388 km
Regenwasser	6 km
Schmutzwasser	6 km
Schachtbauwerke	11.000
Pumpwerke	2 Stück
Düker	3 Stück
Bedarfsorientierte Kanalreinigung	Umstellung erfolgt zurzeit
Reinigungsintervall	4 Jahre
Fahrzeuge	1 x Hochdruck-Spül- und Saugfahrzeug „Super 2000“ 1 x Hochdruck-Spül- und Saugfahrzeug (FFG) 1 x Kleinspülwagen (3.000 l)
Schlauchmaterial	HD Kunststoff, 1/1/4 Zoll, Schlauchlänge 180 m
Eingesetzte Düse	Rundumstrahlende Düse, Vorstrahlende Düse
Druck am Fahrzeug	100 – 120 bar in Fließrichtung, 140 bar gegen die Fließrichtung
Inspektionsmethoden	Inaugenscheinnahme, Kanalspiegel, Schlauchanhaftungen
Schachterkennungssystem	Nicht vorhanden
EDV-System	Betriebsführungssystem HST KANiO
Mobile Geräte	Tablet-PCs
Personal	27 Mitarbeiter

Die Ablagerungskontrolle beschränkte sich fast ausschließlich auf die Inaugenscheinnahme des Schachtgerinnes. Der mitgeführte Kanalspiegel kam nicht zum Einsatz. Nach Aussage der Mitarbeiter wird er nur bei Auffälligkeiten (z.B: Fließverhalten) zur Ablagerungskontrolle genutzt. Testweise wird ebenfalls eine Schachtzoomkamera (vgl. Abschnitt 4.3.2) eingesetzt, über deren Einsatz die Mitarbeiter positiv berichteten.

Für die Kanalreinigung wurde eine rundumstrahlende Düse verwendet und in der Regel ein Druck von 80 bis 120 bar an der Pumpe eingestellt. Bei Bedarf (schwere Verschmutzungen, etc.) können die Mitarbeiter in Herne auf eine vorstrahlende Düse zurückgreifen (Abbildung 112). Die Kanäle wurden in der Regel in Fließrichtung gereinigt. In Sonderfällen, bei Verstopfungen, bei Platzmangel oder bei Beseitigung von

Bauschutt (Abbildung 113), wird auch entgegen der Fließrichtung gereinigt. In diesen Fällen wird der Druck deutlich, bis auf 140 bar erhöht.



Abbildung 112: Vorstrahlende Düse für Einsatz bei starken Verschmutzungen und Verstopfungen (van Laak, 2014c)

Abbildung 113: Altrohrscherben durch Bau- maßnahme (van Laak, 2014c)

Nachfolgend sind die wesentlichen Erfahrungen und Erkenntnisse aus der Reinigungsbegleitung in Herne dargestellt:

- Bei den gereinigten Kanälen handelte es sich ausschließlich um Mischwasserkanäle.
- Schachtnummern waren leicht protokollierbar, da diese aus den Papierplänen zu jeder Zeit abgelesen werden konnten.
- Fast ausschließlich Verschmutzungsgrad <10%. Nur zweimal mittlerer Verschmutzungsgrad (10-20%).
- Beim Fließ- bzw. Strömungsverhalten konnte ohne besonderen Aufwand optisch zwischen langsam, schnell und laminar, laminar unterschieden werden.
- Geruchsbelästigungen in unmittelbarer Schachtnähe gut wahrnehmbar.
- Ablagerungskonsistenz war nicht oder nur eingeschränkt bestimmbar. Kies und Schotter waren durch Geräusche im Saugschlauch identifizierbar.
- Anzahl der Reinigungsgänge mit Druck und Durchfluss gut protokollierbar.
- Rattenbefall war leicht zu erkennen und zu protokollieren.
- Weitere Defekte oder besondere Vorkommnisse wurden erkannt und differenziert protokolliert.
- Schachtnummern waren mit Hilfe des Kartenmaterials konnten bereits während der Inaugenscheinnahme abgelesen und eingetragen werden.
- Erfassen der Reinigung von Schächten und Schmutzfängen problemlos möglich.

- Erfassen der Ablagerungshöhe schwierig: nur Schätzung möglich; Messung im Schacht technisch machbar, aber zu zeitaufwendig.

6.2.6 Protokollentwicklung

Die Entwicklung eines einheitlichen Standards zur Datenaufnahme ist nachfolgend dargestellt. Die Endversion steht als Arbeitshilfe zur Verfügung (vgl. Abschnitt 7.2 Tabelle 64). Die einzelnen Bestandteile werden erläutert und Hintergründe beschrieben. Die Entwicklungsstufen sind als Überblick auch in dargestellt.

Auf Grundlage der Begleitung der Kanalreinigung in den drei Fallbeispielen sowie der durchgeführten Betreibergespräche konnten folgende Kriterien identifiziert werden, die Hinweise zum künftigen Reinigungsbedarf geben:

- Ablagerungshöhe/-menge
- Fließ- und Strömungsverhalten
- Ablagerungskonsistenz
- Geruch
- Kanalzustand und –material
- Anzahl der Reinigungsgänge
- Störfall-/Schadensvermerk

Nachfolgend werden eine detaillierte Beschreibung der Kriterien und weitergehende Hinweise zu deren Erfassung gegeben. Dies betrifft insbesondere die Frage, inwieweit diese Kriterien vor Ort mit vertretbarem Aufwand erfasst werden können und aussagekräftige Daten liefern.

6.2.6.1 Ablagerungshöhe/-menge

Die Ablagerungshöhe ist i.d.R. nur schwerlich vom Betriebspersonal allein durch Inaugenscheinnahme, d.h. ohne zusätzliche Hilfsmittel wie Schachtzoomkamera oder Messhilfen, zu bestimmen. Bei reinen Schätzungen hängt die Qualität der Daten in hohem Maße von der Erfahrung des jeweiligen Mitarbeiters ab. Die Untersuchungen zeigten deutlich, dass eine Abstufung der Ablagerungshöhen in Zentimeterbereiche (wenig 0- 5 cm, mittel 5–10 cm und viel 10–30cm) in der Praxis nicht anwendbar ist. Außerdem bleibt bei einer solchen Einteilung das Fließverhalten im Kanal völlig unberücksichtigt. Beispielsweise sind bei einem Kanal DN 2000 Ablagerungshöhen von 10 cm relativ unbedenklich und haben nur einen geringen Einfluss auf das Fließ- und Strömungsverhalten. Dahingegen würden 10 cm Ablagerungshöhe bei einem Kanal

DN 300 eine 1/3 Füllung des Querschnitts bedeuten. Damit wäre die hydraulische Leistungsfähigkeit in diesem Falle stark herabgesetzt.

Vor diesem Hintergrund wird eine Unterteilung der Ablagerungshöhen in prozentuale Stufen vorgeschlagen:

- gering <10%,
- mittel 10-20%,
- viel >20%.

Darüber hinaus wurde angeregt, die Füllstände bzw. die Ablagerungshöhen anhand praxisnaher Beispiele zu visualisieren, um dem Betriebspersonal anschauliche Referenzbilder zur Situation im Kanal für die jeweilige (Ablagerungs-) Zustandsklasse an die Hand zu geben (s. Beispiel in Abbildung 114).

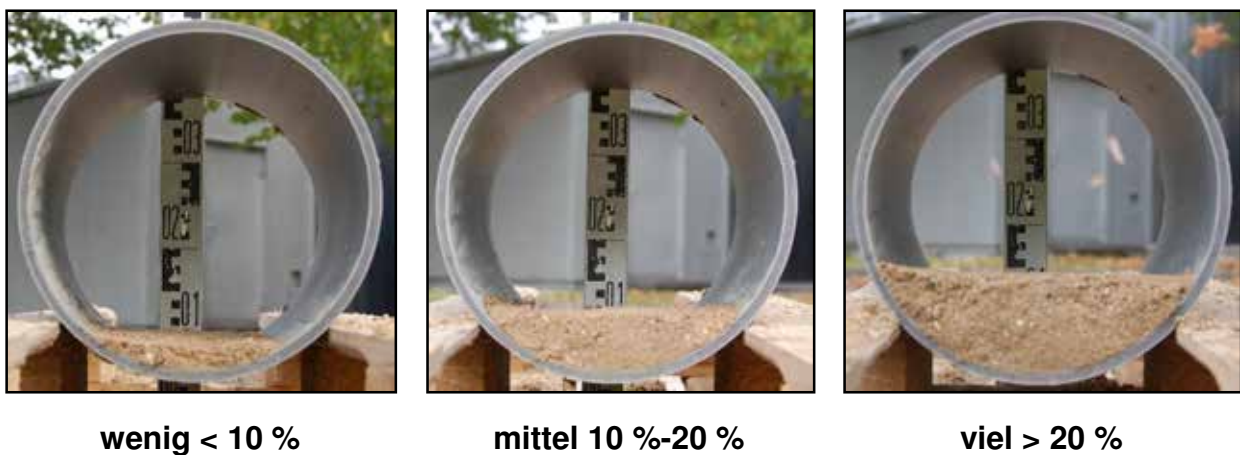


Abbildung 114: Bildbeispiel zur Bewertung der Ablagerungshöhe

6.2.6.2 Fließ- und Strömungsverhalten

Das Fließ- und Strömungsverhalten ist ein in besonderem Maße wichtiger Aspekt für die Bewertung der Ablagerungssituation. Dieser kann durch Inaugenscheinnahme des Schachtgerinnes oder mit Hilfe von technischen Hilfsmitteln wie Kanalspiegel oder Schachtzoomkamera für die gesamte Haltung erfasst werden. In den Experteninterviews wurde jedoch angemerkt, dass der Einsatz dieser technischen Hilfsmittel allein zu diesem Zweck einen nahezu unvermeidbaren zusätzlichen Zeitaufwand darstellt. Erfahrenes Betriebspersonal erklärte bei der Reinigungsbegleitung mehrfach, dass eine Inaugenscheinnahme des Schachtgerinnes bereits mit geringem Aufwand sehr aussagekräftige Ergebnisse liefert.

Eine stichprobenartige Betrachtung der gesamten Haltung kann allerdings helfen, die eigenen Einschätzungen aus der Schachtgerinne-Inspektion auf Plausibilität zu überprüfen.

Zur Einteilung des optischen Eindrucks werden folgende Begriffe für das Fließverhalten als sinnvoll und praxistauglich angesehen:

- gleichmäßig
- unruhig
- langsam

Ein unruhiges Fließverhalten lässt in der Praxis i.d.R. auf Ablagerungen schließen. Bei außergewöhnlich langsamem Fließen wird vielfach eine Inaugenscheinnahme der Kanalhaltung empfohlen, um Abflusshindernisse auszuschließen. Zur Bewertung des Fließverhaltens sollten auch hier Bildbeispiele vor Ort zur Verfügung stehen (Abbildung 115).



Abbildung 115: Bildbeispiele zur Bewertung des Fließ- und Strömungsverhaltens

6.2.6.3 Ablagerungskonsistenz

Zur Bewertung der Ablagerungskonsistenz wurde zunächst eine Unterteilung in die Bereiche feinkörnig, breiig und fest vorgeschlagen. Allerdings zeigte sich im Praxiseinsatz, dass eine zuverlässige Einschätzung der Ablagerungskonsistenz kaum umsetzbar ist, da z.B. die Sicht- und Lichtverhältnisse im Schacht bzw. in der Haltung einen erheblichen Einfluss auf den optischen Eindruck haben. Auch spielen Erfahrung und Schulung der Mitarbeiter eine Rolle. Alternativ wäre auch eine Probenentnahme denkbar, allerdings gilt dies als zu zeit- und kostenaufwändig. Als einfachere Methode, die allerdings weniger sicher und zuverlässig ist, gilt die aufmerksame Betrachtung der Sauggeräusche beim Absaugen der Ablagerungen, um zumindest grobe Feststoffe zu identifizieren.

Im Gesamtblick scheint aufgrund der dargestellten Unsicherheiten eine Dokumentation der Ablagerungskonsistenz wenig zielführend.

6.2.6.4 Geruch

Besonders in Bezug auf Anwohnerbeschwerden spielt das Thema Geruchsbelästigung eine wichtige Rolle. Daneben weist eine Geruchsentwicklung im Kanal auf Fäulnisprozesse und Risiken aus Schwefelsäure-Korrosion hin. Ob aus einer Haltung Geruch wahrzunehmen ist bzw. ob es sich um eine Geruchsbelästigung handelt, lässt sich relativ einfach beim Öffnen der Schachtabdeckung erkennen und wird im Protokoll entsprechend berücksichtigt.

6.2.6.5 Kanalzustand und -material

Material und Zustand einer Haltung können Einfluss auf die künftige Planung von Reinigungs- und Sanierungsmaßnahmen haben. Daher empfiehlt es sich, diese Daten auch im Zuge der Reinigungsarbeiten mit aufzunehmen. In der Folge sollte beispielsweise bei schlechtem Haltungszustand der Düsendruck reduziert werden, um die verbliebene Substanz zu schonen. Außerdem lassen sich so auch ergänzend zur TV-Inspektion frühzeitig Mängel und ggf. Reparatur- und Sanierungsbedarf erkennen.

Während der Reinigungsbegleitung wurde allerdings deutlich, dass ohne den Einsatz einer Schachtzoomkamera der Zustand der Haltung kaum oder gar nicht zu bestimmen ist (Abbildung 116). Zwar kann das Betriebspersonal bei Einsatz eines Kanalspiegels eine grobe Aussage treffen (gut/mittel/schlecht), jedoch ist diese sehr stark von der Einschätzung der Mitarbeiter abhängig und stellt keine sichere Datengrundlage für weitere Planungen dar. Es fiel außerdem auf, dass die Ablagerungssituation in der Haltung die Bewertung des Zustands stark beeinflusst. Das Material konnte in einigen Fällen auch vom Schacht aus oder mit einem Kanalspiegel bestimmt werden. Allerdings ist der Bedarf für derartige Aussagen gering, da die Materialien weitgehend bekannt sind und im Zuge der TV-Inspektion entsprechende Informationslücken bereits geschlossen werden.

Kanalzustand- und material werden entsprechend nicht in das Muster-Protokoll aufgenommen.



Abbildung 116: Grobe Bewertung des Haltungszustands mit dem Kanalspiegel

6.2.6.6 Anzahl der Reinigungsgänge

Die Anzahl der notwendigen Reinigungsgänge bis zum vollständigen Abtransport lösbarer Ablagerungen, d.h. die Anzahl der entsprechenden Düsendurchläufe gibt ebenfalls Aufschluss über den Ablagerungszustand. Wechselwirkungen mit weiteren Kriterien, insbesondere Druck, Durchfluss und Rückzugsgeschwindigkeit, sind gegeben, so dass auch Daten zu Schlauchlängen, Druck und Durchfluss sowie zur Rückzugsgeschwindigkeit am Fahrzeug aufgezeichnet werden sollten (Abbildung 117). Unter Berücksichtigung dieser automatisch erhobenen Daten kann die Anzahl der Reinigungsgänge im Spülplan weiter angepasst und optimiert werden.



Abbildung 117: Aufzeichnung der Reinigungsdaten am Spülfahrzeug

6.2.6.7 Störfall-/Schadensvermerk

Störfälle bzw. Schäden am Schachtbauwerk lassen sich ohne besonderen zusätzlichen Zeitaufwand im Rahmen der Kanalreinigungsarbeiten feststellen (Abbildung 118). Allerdings ist die Dokumentation dieser Schäden mit nennenswertem Dokumentations- und damit Zeitaufwand verbunden. Um diesen zusätzlichen Aufwand zu verringern, empfiehlt es sich, die häufigsten Schacht-Schäden bereits im Protokoll zu benennen und so eine einfache Auswahl zu ermöglichen. Entsprechend sind zwölf besonders häufige Schadensfälle auch im Muster-Protokoll gelistet.



Abbildung 118: Direkt erkennbare typische Schäden an Abwasserschächten: brüchiger Schachtkörper(links oben), undichter Schachtkörper (rechts oben), schadhafte Bankett (links unten), defekte Steigeisen (rechts unten)

6.2.6.8 Muster-Protokoll Kanalreinigung

Das in Abbildung 119 dargestellte Datenaufnahmeprotokoll fasst die in den Abschnitten 6.2.6.1 bis 6.2.6.7 vorgestellten Ergebnisse zusammen.

Zunächst sind Formularfelder für den Eintrag der Grunddaten wie Entwässerungssystem, Datum, Fahrzeug, Fahrzeugführer, Fahrzeugbegleiter und Bearbeitungszeit (Beginn-Ende) vorgesehen (Abbildung 119, oben). Mit diesen Grunddaten können die Sachbearbeiter Fahrzeuge und Personen direkt zuordnen und die Reinigungszeiten festhalten. Diese Kopfzeile enthält somit alle für die Betriebsführung wichtigen Grundinformationen.

Im Formularabschnitt Arbeitsbericht (Abbildung 119, Mitte) können weitere Informationen wie Straßename, Arbeitsschacht, Schächte oberhalb, Reinigung Haltung, Reinigung Schacht, Reinigung Schmutzfang, Ablagerungen, Fließ- und Strömungsverhalten, Geruch, Anzahl der Reinigungsgänge, Rattenbefall, Störfälle sowie Schäden und Bemerkungen notiert werden. Im unteren Teil des Arbeitsberichts können zusätzliche, außerplanmäßige Arbeiten beschrieben bzw. vermerkt werden.

Der unterhalb des Arbeitsberichts dargestellte Anhang zu Schachtschäden und Störungen (Abbildung 119, unten) enthält zwölf vordefinierte Schadensfälle mit Zahlenkürzel, die im Arbeitsbericht eingetragen werden können.

Stadtentwässerung *Betriebstagebuch nach § 3 SüVO*
 Stadt *Protokoll Kanalreinigung/Unterhalt*

Auftrag : Kanalreinigung

70008 Kanalunterhaltung SW – Kanäle ; 70016 Kanalunterhaltung MW – Kanäle ; 70019 Kanalunterhaltung RW-Kanäle

Datum	Fahrzeug	Fahrzeugführer	Belfahrer	Bearbeitungszeit		
				Beginn:	Ende:	Pausenzeit:

Arbeitsbericht Betriebstagebuch:				Reinigung			Schachtkontrolle Ablagerungen/Schachtzustand						*Ablagerungen: wenig: < 10% mittel: 10- 20 % viel: > 20 %			
Straße	Arbeits- schacht	Schächte oberhalb	Haltung	Schacht	Schmutzfang	Ablager- ungen			Fließ-/ Störungs- verhalten			Geruch	Reinigungs- gänge	Rattenbefall	Störfälle	Schäden/ Bemerkung
						wenig*	mittel*	viel*	gleichmäßig	unruhig	langsam					
1																
2																
3																
4																
5																
6																
7																
8																
9																
10																
11																
12																
13																
14																
15																
16																

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

Außerplanmäßige Arbeiten / Störungsbeseitigung / Verstopfung / Falscheinleiter gesichtet:

13 Schmutzfang defekt

14 Geruchsbelästigung

Schachtschäden/ Störungen				F Foto- nachwei- s vorh.	
1 zugeparkt	2 Steigeisen defekt	3 Steigeisen fehlen			
4 Schmutzfang fehlt	5 Schachtgerinne- defekt	6 Schacht sichtbar undicht			
7 Schachtwände defekt (Risse)	8 Wurzeleinwuchs	9 Steigeisen zu tief			
10 zugeeert	11 nicht zu finden	12 Ausgleichsring gerissen			

Abbildung 119: Protokoll Kanalreinigung

Die in Abbildung 120 dargestellten Bildbeispiele auf Rückseite des Muster-Protokolls geben Orientierung für die Dokumentation der Ablagerungshöhe sowie des Fließ- und Strömungsverhaltens.

Bildbeispiele zur Bewertung der Ablagerungshöhe



wenig < 10 %



mittel 10 %-20 %



viel > 20 %

Bildbeispiele zur Bewertung Fließ-/Strömungsverhalten



gleichmäßig



unruhig



langsam

Abbildung 120: Muster-Protokoll, Rückseite

6.3 Bewertung der Ablagerungssituation

6.3.1 Ist- Analyse

Für die „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) (Abbildung 121) 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. Pragmatische Ansätze dominieren daher die Bewertung:

Einige Netzbetreiber folgern 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 Kanäle 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 (vgl. Abbildung 121, unten), welche weiteren Einflussfaktoren, neben Ablagerungshöhe und –menge, zur Bewertung der Ablagerungssituation herangezogen werden können. Im Einzelnen wurden folgende Einflussfaktoren als möglicherweise bedeutsam genannt:

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



Abbildung 121: Workshop-Eindrücke „Bewertung der Ablagerungssituation“: Präsentation durch Netzbetreiber (oben, links); Auditorium (oben, rechts); Moderierte Diskussion (unten, links); Sammlung von Einflussfaktoren (unten, rechts).

Als **Ergebnis der Ist-Analyse** lassen sich folgende Hinweise und Empfehlungen zur Bewertung und Umsetzung des Moduls „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 könnte ein **einheitliches Bewertungsschema** helfen, alle maßgeblichen Einflussfaktoren in geeigneter Weise in die **Bewertung der Ablagerungssituation** einzubeziehen. Allerdings stellt sich die Erhebung

dieser Daten als überaus aufwändig und vielfach sogar kaum umsetzbar dar (vgl. Abschnitt 6.2.6).

- Die identifizierten Störfälle sollten zur Intervallfestlegung der Kanalhaltungen ebenfalls bewertet werden. Beispielsweise können manche Hindernisse, wie ein herabgestürzter Schmutzfänger, nach der Beseitigung als einmaliges Ereignis gewertet werden. Andere Störfälle, wie Wurzeleinwuchs und/oder Verstopfungen können zu weitergehenden Maßnahmen oder kürzeren Reinigungsintervallen führen.
- Zur sicheren Seite bietet es sich an, die Reinigungsintervalle zunächst vergleichsweise niedrig anzusetzen, und bei störungsfreiem Betrieb schrittweise zu erhöhen, ggf. bis zur nächsten **Ablagerungsbewertung**.

6.3.2 Umsetzungsempfehlung

Die Bewertung der Ablagerungssituation zielt gemäß Prozessmodell (Abbildung 101) auf die Ermittlung des Spülbedarfs. Dabei handelt es sich um eine rein theoretische Größe, die sich an einer Risikobetrachtung orientiert: Demnach liegt ein Spülbedarf vor, wenn ohne weitere Reinigung ein nicht vertretbares Risiko für die Leistungsfähigkeit des Kanalnetzes entsteht, d.h. es sind erhebliche Einschränkungen mit Blick auf die Betriebssicherheit (z.B. Verstopfung, Rückstau, Arbeitssicherheit), Standsicherheit (z.B. Korrosion) und/oder Auswirkungen auf die Umwelt (z.B. Geruch, Gewässerbelastungen) zu erwarten.

In der Praxis lassen sich Ablagerungserfassung, Ablagerungsbewertung und Feststellen eines Spülbedarfs kaum voneinander trennen. Dies scheint auch nicht sinnvoll, da die Erfassung und Bewertung von Ablagerungen und letztlich auch des Spülbedarfs i.d.R. vom Spülpersonal selbst vorgenommen wird, damit bei Feststellen eines Spülbedarfs auch mit einer sofortigen Reinigung kritischer Abschnitte reagiert werden kann.

Planerische Flexibilität besteht daher nur in der Frage, in welchen Intervallen eine Haltung bzw. ein Teilnetz künftig gereinigt werden soll. Dabei sind zwei theoretische Wege denkbar:

Deduktiv: Aus den vorliegenden Daten zu Ablagerungshöhe-/menge, Anzahl der Reinigungsgänge usw. kann für ein gewähltes Spülintervall auf mögliche Leistungsrisiken bis zur nächsten Spülung geschlossen werden. Dies setzt voraus, dass entsprechende Zusammenhänge bestehen, diese nachgewiesen sind und auch entsprechende Bewertungsansätze existieren. Erste Untersuchungen zur Ablagerungsbildung (s. Abschnitt 5.2.2) zeigen, dass Zusammenhänge zwischen dem Ablagerungsgrad und z.B. der Remobilisierungsfähigkeit von Ablagerungen, den Niederschlagsereignissen

im Mischsystem, dem Kanalgefälle und der Rauigkeit des Kanalabschnitts bestehen können. Verlässliche Daten für eine Risikobetrachtung liegen allerdings noch nicht vor.

Empirisch: Aus Erfahrungswerten werden ohne detaillierte Analyse der naturwissenschaftlichen Hintergründe grundsätzliche Zusammenhänge abgeleitet und diese durch Wiederholung auf fortlaufende Gültigkeit überprüft. In einigen Fällen kann die Anerkennung und Praxistauglichkeit empirischer Ansätze wiederum zur Entwicklung theoretischer Modelle (zur Begründung dieser Ansätze) führen.

Im vorliegenden Fall zeigt der empirische Ansatz einer risikoorientierten Verlängerung von Reinigungsintervallen bei Unterschreiten einer kritischen Ablagerungssituation und Verkürzung dieser Intervalle bei Überschreiten der kritischen Situation die größte Akzeptanz in der Praxis. In der Risikobetrachtung spielt dabei die Betrachtung der Auswirkungen bei Versagen allerdings i.d.R. nur eine untergeordnete Rolle. Lediglich dann, wenn bei Versagen der Kanäle negative Auswirkungen fast vollständig ausgeschlossen werden können, scheint eine Beibehaltung der Intervalle auch bei Störfällen vertretbar. Abbildung 122 veranschaulicht diesen Zusammenhang. Ausschlaggebend für die Risikobetrachtung ist damit in der Praxis hauptsächlich die vor Ort vorgefundene Ablagerungssituation.

Auswirkung	Risikobewertung				
	unkritisch	kritisch	überfällig		
groß	grün	blau	rot	rot	rot
	grün	blau	rot	rot	rot
mittel	grün	blau	rot	rot	rot
	grün	blau	rot	rot	rot
gering	grün	blau	blau	rot	rot
	grün	blau	blau	rot	rot

Situation im Kanal

Abbildung 122: Ablagerungsbewertung, schematische Risikobetrachtung, grün-Intervalllänge- rung, blau – Intervallbeibehaltung, rot – Intervallverkürzung

Zur Bewertung der Ablagerungssituation werden dabei diejenigen Parameter herangezogen, die sich möglichst effizient flächendeckend erheben lassen. Bereits die Analyse und Bewertung der Datenaufnahme (Abschnitte 6.2.6.1 bis 6.2.6.7) zeigte, dass einige der theoretisch für die Ablagerungsbewertung relevanten Kriterien in der Praxis kaum oder gar nicht mit vertretbarem Aufwand zu erfassen sind. Effizient lassen sich erheben und verwerten:

- Ablagerungshöhe/-menge
- Anzahl der Reinigungsgänge
- Störfall-/Schadensvermerk
- Fließ- und Strömungsverhalten
- Geruch

Die Ablagerungssituation wird dann direkt vor Ort durch das Spülpersonal ganzheitlich mit Blick auf den Spülbedarf bewertet: unkritisch – keine Reinigung notwendig, kritisch-Reinigung notwendig, überfällig – erkennbare Risiken. Die Untersuchungen in Abschnitt 6.2.6.1 haben z.B. gezeigt, dass die Ablagerungshöhe mit einer Einteilung nach „wenig < 10%; mittel 10-20%, viel > 20%“ eingeschätzt wird.

Bei der Verlängerung der Reinigungsintervalle hat sich der lineare Ansatz weitgehend durchgesetzt:

Linearer Ansatz zur Verlängerung des Reinigungsintervalls: Wiederholte Verlängerung um ein konstantes Vielfaches des ursprünglich angesetzten Normintervalls, also z.B. von 2a um 2a auf zunächst 4a, dann 6a usw. Im Ergebnis kann so auch ein klares Ziel für die bedarfsorientierte Reinigung definiert werden, nämlich die Verringerung des zu reinigenden Netzanteils pro Jahr.

Tabelle 52 enthält ein entsprechendes Berechnungsbeispiel, das sich an den Erfahrungen der beteiligten Netzbetreiber mit der Intervallverlängerung in ihren Netzen orientiert. Im Beispiel kann der Reinigungsaufwand über einen Zeitraum von 10 Jahren so halbiert werden.

Tabelle 52: Intervallverlängerung, Zeitlicher Verlauf, Erfahrungsbeispiel

	Intervall	Jahr														
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
Anteile Kanalnetzes [%]	2	100	100	75	75	50	50	25	25	20	20	20	20	20	20	20
	4			25	25	40	40	50	50	30	30	30	30	30	30	30
	6					10	10	25	25	40	40	40	40	40	40	40
	15									10	10	10	10	10	10	10
Aufwand [%]		100,0%		87,5%		73,3%		58,3%		49,7%		49,7%		49,7%		49,7%

6.4 Einsatzplanung

6.4.1 Ist-Analyse

Ziel der „Einsatzplanung“ ist das Erstellen eines Spülplans, aufbauend auf der Ablagerungsbewertung und Intervallfestlegung, vgl. Abschnitte 6.2 und 6.3. Der Spülplan fasst die generellen Zeiträume zusammen, in denen die einzelnen Netzabschnitte einer Unterhaltungsreinigung zu unterziehen sind (Reinigungszeiträume). Aus diesen leiten sich die aktuellen Einsatzpläne ab. Aktuelle Störungen und die Beseitigung dieser Störfälle werden im jeweiligen Einsatzplan berücksichtigt.

Für die Spülplanerstellung können sowohl ein Tabellenkalkulationsprogramm wie MS Excel, eine selbst erstellte Datenbank, z. B. in MS Access, oder andere EDV-Systeme genutzt werden. Im Rahmen des Workshops „Betriebsführungssysteme und Kanaldatenbanken“ stellten ausgewählte Netzbetreiber ihre Vorgehensweise im Umgang mit EDV-Systemen zur Einsatzplanung vor. Folgenden 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 kennen zu lernen und diese in kleinen Gesprächsrunden zu diskutieren (Abbildung 123).



Abbildung 123: 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 sowie aktuelle Umfrageergebnisse aus (Treinen, 2014a) erläutert.

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

Im Rahmen des Workshops stellte ein Netzbetreiber die Vorgehensweise bei der Anschaffung eines EDV-Systems vor (Abbildung 124). Die selbst erstellte Datenbank wurde durch ein spezielles EDV-System ersetzt, um auch Anforderungen an ein integriertes und ganzheitliches Datenmanagement zu berücksichtigen sowie die Einbindung von Transpondern und mobilen Datenerfassungsgeräten in das Gesamtkonzept zu unterstützen.

Der Anschaffungsprozess für das EDV-System umfasste mehrere Iterationsschritte. Zunächst wurden 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, 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 eine einheitliche Dokumentation der durchgeführten Tätigkeiten.

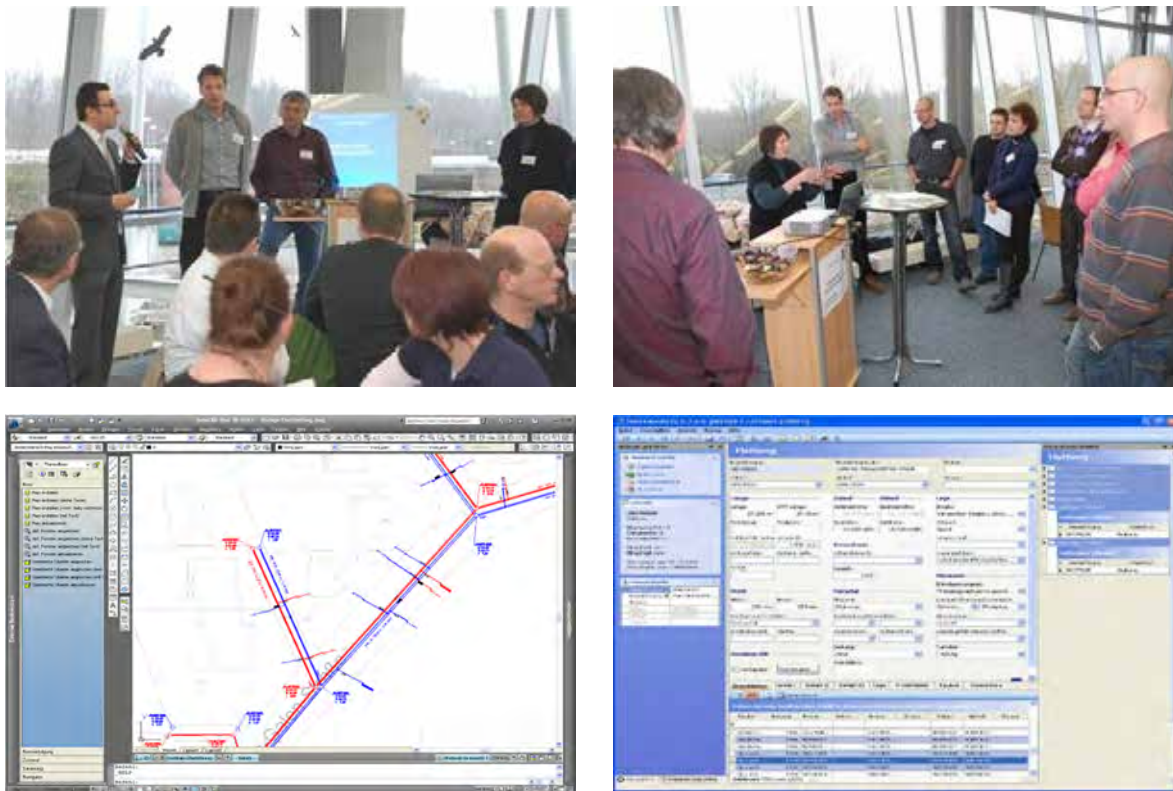


Abbildung 124: Workshop „Betriebsführungssysteme und Kanaldatenbanken“: Netzbetreiber stellen ihr Konzept zur Diskussion (oben, links); Gesprächsrunde (oben, rechts); Screenshots EDV-System (unten) (Müller, 2011).

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, 2011)

Bei einem weiteren Netzbetreiber wird ein Betriebsführungssystem für die Einsatzplanung eingesetzt (vgl. Abbildung 125, Abbildung 126). 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 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.

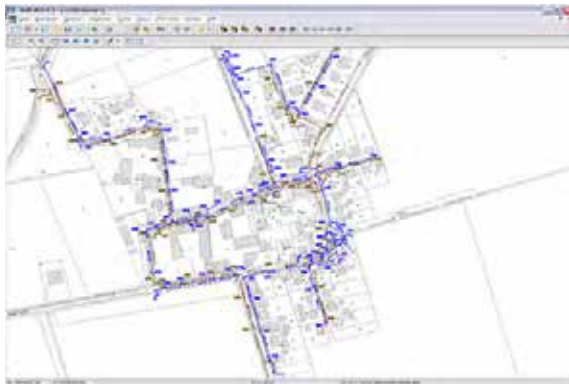


Abbildung 125: Plandarstellung im EDV-System (Lampe, 2011)

Abbildung 126: Datenliste im EDV-System (Lampe, 2011)

Onlineumfrage, Ergebnisse

Im Rahmen einer bundesweiten Onlinebefragung unter Netzbetreibern wurden die aktuell verwendeten EDV-Instrumente zur Unterstützung der Einsatzplanung abgefragt. Die Ergebnisse sind in Abbildung 127 dargestellt. Von den insgesamt über 125 Rückmeldungen erklärten 27 Teilnehmer, dass gar kein EDV-System verwendet wird. Bei 10 Teilnehmern wird das Standardssystemprogramm MS Excel eingesetzt. Hiermit sind eigens entwickelte Tabellen und Auswertungsdateien gemeint. Die meisten Teilnehmer bezogen ihre Antwort auf GIS/KIS-Systeme, die auch zur Unterstützung der Reinigungsplanung eingesetzt werden. Als einziges „echtes Betriebsführungssystem“ (vgl. Abschnitt 6.4.3) wurde von 5 Teilnehmern das System Kanio von HST genannt. Interpretiert man die Ergebnisse der Onlinebefragung im Zusammenhang mit den Erkenntnissen aus Expertenbefragungen (Treinen, 2014a-c; van Laak, 2014) und Workshops, so wird deutlich, dass eine klare Abgrenzung zwischen den unterschiedlichen Systemen am Markt immer noch schwer fällt.

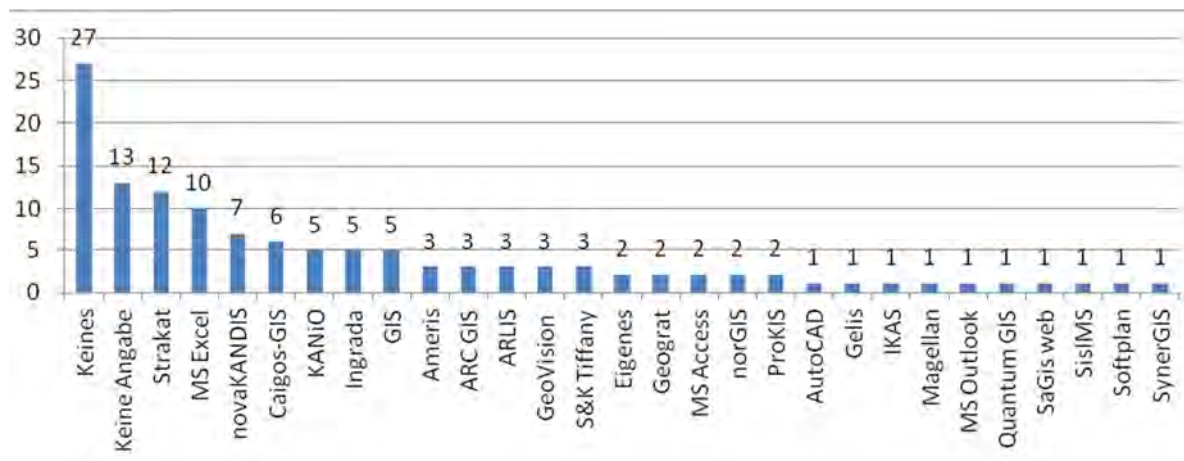


Abbildung 127: Einsatz EDV-Unterstützung (Treinen, 2014a)

Als **Ergebnis der Ist-Analyse** lassen sich folgende Hinweise und Empfehlungen zur Bewertung und Umsetzung des Moduls „Einsatzplanung“ zusammenfassen:

- 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, sodass schließlich ein für den konkreten Anwendungsfall 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 des baulichen Zustandes 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.

6.4.2 Umsetzungsschwerpunkte

Zur Unterstützung der Einsatzplanung werden verstärkt spezielle EDV-Systeme eingesetzt, die sich bei größeren und mittleren Betreibern auch in der Praxis etabliert haben. Allerdings besteht gerade mit Blick auf kleinere Betreiber noch immer ein großer Bedarf an Übersicht über Leistungsumfang und –grenzen der Systeme sowie Hinweisen zur Anschaffung und den zu erwartenden Kosten. In der zweiten Phase dieses Forschungsprojektes wurde daher zunächst eine umfassende Marktübersicht zu den angebotenen Systemen erstellt. Dieser Marktübersicht lag ein Erhebungsbogen zugrunde, der in Abstimmung mit Betreibern und Systemanbietern entwickelt worden war. Im nächsten Schritt wurden Betreibererfahrungen zur Anschaffung der Systeme erhoben und ausgewertet. Im Ergebnis liegt nun ein Ablaufschema als Arbeitshilfe zur Anschaffung von EDV-Systemen zum Schwerpunkt Kanalreinigung vor.

Abschließend wurden ausgewählte Betreiber zur Höhe und Struktur der durch einen EDV-Einsatz bedingten Kosten befragt.

6.4.3 Marktübersicht EDV-Systeme

6.4.3.1 Vorgehensweise

Die Marktübersicht wurde in mehreren Untersuchungs- und Rechenschritten entwickelt. In einer umfangreichen Fachliteratur- und Internetrecherche wurden zunächst am Markt erhältliche Systeme identifiziert und erste Informationen zu den Leistungsmerkmalen gesammelt. In der Folge wurde weiteres Informationsmaterial wie Produktkataloge und Handbücher beim Hersteller angefordert und in die Recherche einbezogen.

Im Rahmen von zwei Workshops zum Thema „Betriebsführungssysteme und Kanaldatenbanken“ (06. März ´14 und 30. Juli ´14) wurden weitere Informationen bei den dort vertretenen Herstellern erhoben.

Aufbauend auf Recherche und Herstellergesprächen wurde die erste Entwurfsfassung einer Marktübersicht erarbeitet. Der zugrundeliegende Fragenkatalog wurde dann in Zusammenarbeit mit ausgewählten Netzbetreibern und Herstellern weiterentwickelt und konkretisiert.

Die Entwurfsfassung der Marktübersicht umfasste Informationen zu folgenden Fragestellungen:

- Welche Module des Kanalbetriebes werden bedient?
- Welche Grafiksysteme/Fachschalen werden eingesetzt?
- Welche Struktur besitzt das Auskunftssystem (z.B. direkter Zugriff auf Daten vor Ort und/oder web-basierender Zugriff)?
- Welche Möglichkeiten der mobilen Auftragsbearbeitung und Synchronisation gibt es?
- Ist die Anbindung an ein Schachterkennungssystem möglich?
- Welche mobilen Geräte werden unterstützt?
- Welche Softwarevoraussetzungen (Betriebssystem) sind zu beachten?
- Welche Datenbank wird verwendet?
- Welche Schnittstellenfähigkeit wird gewährleistet?

Da nicht alle Fragen eindeutig und unabhängig voneinander beantwortet werden konnten, wurden weitere Betreiber- und Herstellergespräche sowie eine ausführliches Interview mit einem ausgewählten Hersteller/EDV-Berater geführt. Im Ergebnis konnte folgendes festgestellt werden:

Die angeführten Fragestellungen sind relevant. Allerdings sind die einzelnen Module bzw. Fachschalen kaum miteinander zu vergleichen, da die Abgrenzung der einzelnen Leistungspakete von Hersteller zu Hersteller unterschiedlich ist und auch die Begrifflichkeiten (z.B. Modul/Fachschale) nicht einheitlich verwendet werden. Des Weiteren sollten Möglichkeiten der Dokumentenverwaltung sowie die Dauer der Einführungs- bzw. Testphase abgefragt werden. Weitere Hilfestellungen gibt auch Merkblatt DWA-M145-1: „Kanalinformationssysteme“ (DWA-M145-1, 2013).

Im Übrigen muss erkennbar sein, ob die Kernprozesse der Kanalreinigung mit allen relevanten Daten auch tatsächlich im System integriert bzw. darstellbar sind. Dies betrifft z.B. die Fragen:

- Beinhaltet das System eine Graphikkomponente?
- Gibt es die Möglichkeit auch auf Anlagenstrukturen aus anderen Fachbereichen zurückzugreifen, die nicht zur Fachschale Kanal gehören?
- Beinhaltet das System ein Störfallmanagementmodul?
- Wie weit gehen Pflege und Support durch den Hersteller?

Zusätzlich zu den hier dargestellten Fragen wurden auch die Referenzen der Hersteller abgefragt. Dies diene insbesondere der Erhebung von Erfahrungen in typischen Anwendungsfällen bzw. eines Überblicks über die Größenordnung der betreuten

Kanalnetze. Die Antworten der EDV-Hersteller wurden stichprobenhaft durch telefonische Rückfragen bei Herstellern und Netzbetreibern auf Plausibilität geprüft.

6.4.3.2 Marktübersicht

Im Rahmen der Untersuchungen zeigte sich, dass die Abgrenzung von „echten“ Betriebsführungssystemen und Kanalinformationssystemen für viele Netzbetreiber besonders wichtig ist (zu den Unterschieden siehe Abschnitt 4.5). Die am Markt ebenfalls erhältlichen reinen GIS-Systeme wurden bei den Untersuchungen aufgrund von fehlenden fachlichen Funktionen vernachlässigt. Somit enthält dieser Bericht zwei getrennte Marktübersichten für Betriebsführungssysteme und Kanalinformationssysteme. Diese sind vollständig im Anhang bzw. zum Download unter www.ikt.de/kanalreinigung dargestellt (vgl. auch Abschnitt 7, Tabelle 64). Eine Orientierung zur Struktur der Marktübersichten sowie übergeordnete Erkenntnisse werden nachfolgend zusammengefasst.

Marktübersicht Betriebsführungssysteme

Die Marktübersicht „Betriebsführungssysteme“ beinhaltet die vier am Markt erhältlichen Systeme (Abbildung 128). Betriebsführungssysteme scheinen aufgrund der hohen Kosten für Anschaffung und Nutzung erst für mittlere bis große Netzbetreiber attraktiv.



Hersteller	HST Systemtechnik GmbH & Co KG	GreenGate AG	InfoDot GmbH	Mettenmeier GmbH
Programm	KANIO	GS-Service	BfsDot	Optimus
Logo				
Module des Kanalbetriebs	<ul style="list-style-type: none"> • Konfiguration • Betriebsmittel • Tätigkeiten • Ressourcen • Lagerverwaltung • Adressverwaltung • Kostenstellenverwaltung • Hilfstabellen • Betriebsführung • Aufgaben • Terminplanung • Auftragsverwaltung • Tourenverwaltung • Bestellwesen • Störfallmanagement • Workflowmodul • Grafikviewer • Mobile Auftragsverwaltung • Auswertung/Berichtswesen • Berichtseditor • Berichtserstellung • Excel-Export • Dokumentenverwaltung • Dokumente 	<p>• GS-Service ist ein branchenneutrales System ohne Fachmodule für den Kanalbetrieb oder andere Aufgaben. Mit GS-Service lassen sich fachspezifische Applikationen kundenspezifisch erstellen, so wurden bereits Applikationen für den Kläranlagenbetrieb, Kanalnetze mit Sonderbauwerken, die Gewässerunterhaltung, für die indirekteinleiterüberwachung etc. bei einer Vielzahl von Kunden erfolgreich in Betrieb genommen. Das System kann über verschiedene Plattformen mobil eingesetzt werden.</p>	<ul style="list-style-type: none"> • Betriebsführungssystem • Kosten/Leistungsrechnung • Berichtswesen • Zelterfassung • Stundenabrechnung 	<ul style="list-style-type: none"> • Objektverwaltung • Betriebsmittelmanagement • Instandhaltungsmanagement • Störungsmanagement • Ressourcenmanagement • Prozessmanagement • Auftragsverwaltung • Kostenstellen • Projekt- und Auftragsplanung • Workforcemanagement • Mobile Erfassung und Rückmeldung (Optimus Smart) • Dokumentenverwaltung • ERP-System • Abrechnung • Controlling und Reporting
Fachschalen	<ul style="list-style-type: none"> • Wasser • Gas • Strom • Kanal • Kläranlage • Industrie • Beleuchtung • Wellness • Indirekteinleiter • weitere Fachschalen auf Anfrage 	<ul style="list-style-type: none"> • Kanal • Wasser • Gas • Strom • Fernwärme • Abwasser • Hausanschlusskontrollen • Industrie 	<ul style="list-style-type: none"> • Kanal • Straßenreinigung • Strassenunterhaltung • Spielplatz • Grünflächen • Baum • Versorger für Gas/Wasser/Strom/Wärme 	<ul style="list-style-type: none"> • Kanal • Wasser • Gas • Strom • Abwasser • Wärme • Beleuchtung • Schwimmbäder
Dokumentenverwaltung	ja	ja	ja	ja
Grafiksystem	ja	ja	ja	ja

Abbildung 128: Marktübersicht Betriebsführungssysteme

Als übergeordnete Erkenntnisse aus der Erhebung dieser Übersicht lässt sich folgendes festhalten:

- Die vier am Markt erhältlichen Betriebsführungssysteme enthalten die wichtigsten Funktionen für den Kanalbetrieb:
 - Effiziente Planung und rechtssichere Dokumentation von Betriebsabläufen,
 - Verwaltung der Ressourcen (Anlagen, Einrichtungen, Betriebsmittel),
 - Reports und Listen entsprechend der SÜwVO Abwasser.
- Die Fachschalen Kanal, Wasser, Gas und Strom sind wählbar. Weitere Fachschalen sind implementierbar.
- Die Anbindung an bestehende GIS-Systeme (z.B. ArcGIS, Smallworld GIS oder Shape) ist möglich. Alle Betriebsführungssysteme bieten EDV-basierte Schnittstellen zu ERP-Systemen sowie eine Dokumentenverwaltung.
- Auskunftssysteme lassen i.d.R. eine personalisierte Rechtevergabe an Nutzer zu.
- Mobile Auftragsbearbeitung mit anschließender Synchronisation ist möglich. Eine Anbindung an Schachterkennungssysteme ist möglich.
- In der Regel werden Oracle oder Microsoft-SQL-Server-Datenbanken eingesetzt. Andere Datenbanksysteme sind implementierbar. Import- und Export-Schnittstellen liegen für die gängigsten Systeme vor (z.B. ISYBAU, DWA-M150, Microsoft Excel, CSV).
- Die Einführungsphase bzw. Testphase variiert zwischen 3 und 18 Monaten.

Marktübersicht Kanalinformationssysteme

Die Marktübersicht „Kanalinformationssysteme“ (Abbildung 129) bezieht sich auf Systeme, die zurzeit bei den Netzbetreibern am häufigsten eingesetzt werden (vgl. Ist-Analyse, Abschnitt 6.4.1). Dies sind:

- BaSYS, Barthauer Software GmbH
- Dataver Abwasser, Dataver Informatik AG
- IKIS, IBAK Helmut Hunger GmbH & Co KG
- S&K Tiffany, DW-Informationssysteme GmbH
- Digma, Digma Dienstleistungsgesellschaft mbH
- KANDIS Produktfamilie, CADMAP Consulting Ingenieurgesellschaft mbH
- K2000, Ingenieurbüro Haite

Das Programm Arlis, welches ebenfalls von vielen Netzbetreibern verwendet wird, wurde nicht in die Marktübersicht aufgenommen, da es nicht mehr erhältlich ist und der Support eingestellt wurde.

Hersteller	Barthauer Software GmbH	Dataver Informatik AG	IBAK	DVI-Informationssysteme GmbH	DIGMA	CADWAP Consulting Ingenieurgesellschaft mbH	landler.com GmbH
Programm	BASYS 8.3.4 SP4	Dataver Abwasser	IKS der Kanaldatenmanager	S&K Tiffany	Digma SAN, DDV, KUS, KSP, KRS	KANDIS Produktfamilie	++SYSTEMS
Logo							
Module des Kanalbetriebs	<ul style="list-style-type: none"> Kanalplanung Kanalkataster Kanalzustandsprüfung und -bewertung Betriebs- und Wartungsmanagement Generellwässerungsplanung Kanalauskuant 	<ul style="list-style-type: none"> Stammdatenerfassung Hydraulische Daten Zustandserfassung und -bewertung Maßnahmenplanung mit Kostenberechnung Visualisierung Liegenschafts-entwässerung Kennzahlen Datenkontrolle Import Export Betrieblicher Unterhalt Baulicher Unterhalt Berichte Statistiken Dataver mobile 	<ul style="list-style-type: none"> Kanaldatenverwaltung mit TV-Inspektion Optionale Feldanwendung IKAS32 Klassifizierung und Bewertung Sanierungsplanung Reinigungsdatenverwaltung IKAS Cleaner GEO Punktobjekte 	<ul style="list-style-type: none"> KABEView allung Kanalbetrieb KANU Kanal Zustand- und Dichtigkeitsprüfung GIS grafisches Bearbeiterystem Zustand des Kanalnetzes Bewertung Hydraulik Touren Vermögen Sanierung Betriebswartung Baummaßnahmen Kleinkanalanlagen Indirekteile Dokumentation Berichterstellung aus der Datenbank Datenbankabfragen Liegenschafts-Informationssystem 	<ul style="list-style-type: none"> Kommunale und rechtliche Anforderungen (Digma SAN, Digma KSP) Zustandserfassung von Kanälen und Schächten (Digma SAN, Digma KUS) Niederschlagsentwässerung im Trennverfahren (Digma SAN) Kanalreinigung und strategische Konzepte (Digma KRS) 	<ul style="list-style-type: none"> Die KANDIS Produktfamilie umfasst eine "einfaches" Betriebsführungssystem mit "novakANDIS Kanalbetrieb pro". Innerhalb der Module können beliebige Aufgaben definiert, geplant und dokumentiert werden. Für die einzelnen betrieblichen Aufgaben wie Reinigung, Zustandserfassung, Strickkostenrechnung, Probenahmen etc. stehen jeweils spezifische Ergebnislisten für die fachlichen Ergebnisse bereit. Ergänzt wird das System um mobile Erfassung mit novamQBL oder der KANDIS App (Android). 	<ul style="list-style-type: none"> Graphisches Informationssystem Kanalnetzberichterstattung Grundstückentwässerungs-Informationssystem Sanierungsmodell Vermögensbewertung und Vermögensverwaltung Regenwasserentwässerung Gewässerkataster und Gewässerentwässerung Koordinatentransformation Wasserversorgung und Gasversorgung Kostenberechnung Zustandserfassung und Zustandbewertung Überflutungsanalyse
Fachchalen	<ul style="list-style-type: none"> Abwasser Wasser Gas Kabel 	<ul style="list-style-type: none"> Dataver Abwasser Dataver Wasser Dataver Straße Dataver Statik <p>Die Fachchalen dienen der Erfassung, dem Unterhalt und der Sanierung der jeweiligen Infrastruktur.</p>	<ul style="list-style-type: none"> Kanal 	<ul style="list-style-type: none"> Abwasser Gewässer Umwelt Baumkataster Grünliegenschaftskataster Straßenkataster Spielplatzkataster Gebäudekataster Lampenkataster Verkehrsschilder Grundstücke/Gebühren 	<ul style="list-style-type: none"> Kanal Wasser 	<ul style="list-style-type: none"> Kanal 	<ul style="list-style-type: none"> Kanalsystem Gewässer 2D-Oberflächenmodell Trinkwasser Gas
Dokumentenverwaltung	ja	ja	ja	ja	ja	ja	ja
Grafiksystem	ja	ja	ja	ja	ja	ja	ja
Welche zusätzlichen Grafiksysteme können angebunden werden	<ul style="list-style-type: none"> Bidirektionale, interaktive Unterstützung von Autodesk (AutoCAD) Bentley (Microstation) ESRI (ArcGIS) Intergraph (Geomedia) BricsCAD Supernap 	<ul style="list-style-type: none"> DATAYER verfügt über einen eigenen View er. Zusätzlich können beliebige CAD-Daten über DXF eingebunden werden. Außer dem besteht die Möglichkeit, WMS-Server anzubinden. Das Weiteren können auch Shape-Dateien eingelesen und angezeigt werden. 	<ul style="list-style-type: none"> Schnittstellen zu allen gängigen Fremdsystemen: AutoCAD, dxf, dwg, ESRI Shape etc. 	<ul style="list-style-type: none"> Digma CAD MapGuide 	<ul style="list-style-type: none"> ArcGIS ArcEditor für Erfassungsarbeitenplätze ArcSDE für Mehrplatzlösungen oder bei Verwahrung der Versionierung ArcView für Auskurtisierungsplätze 	<ul style="list-style-type: none"> ArcGIS ArcEditor für Erfassungsarbeitenplätze ArcSDE für Mehrplatzlösungen oder bei Verwahrung der Versionierung ArcView für Auskurtisierungsplätze 	<ul style="list-style-type: none"> Das System der landler.com GmbH beinhaltet als Basiskomponente immer ein voll erliges GIS. Daher ist ein Graphik/View er immer Bestandteil einer ++SYSTEMS Installation. Autodesk (AutoCAD) ESRI (ArcGIS)

Abbildung 129: Marktübersicht Kanalinformationssysteme

Kanalinformationssysteme sind aufgrund der geringeren Kosten für Anschaffung und Nutzung im Vergleich zu Betriebsführungssystemen besonders für kleine Kommunen geeignet. Die vollständige Marktübersicht ist diesem Bericht als Anhang beigefügt bzw. zum Download verfügbar unter www.ikt.de/kanalreinigung (vgl. auch Abschnitt 7, Tabelle 64).

Als übergeordnete Erkenntnisse aus der Erhebung dieser Übersicht lässt sich folgendes festhalten:

- Die Fachschalen Kanal, Wasser, Gas und Strom sind wählbar.
- Dokumentenverwaltung in allen Systemen integriert.
- Die Anbindung an bestehende GIS-Systeme (z.B. ArcGIS, Smallworld GIS oder Shape) ist möglich.
- Zur Unterstützung von kaufmännischen Geschäftsprozessen werden bei den Kanalinformationssystemen KANDIS und ++SYSTEMS Systemintegrationen zu beliebigen ERP-Systemen angeboten. Die übrigen in der Marktübersicht aufgeführten Kanalinformationssysteme können nicht gekoppelt werden.
- Auskunftssysteme:
 - BaSYS und KANDIS lässt eine Desktopauskunft mit lesendem Zugriff sowie eine web-basierte Auskunft zu.
 - Dataver, IKIS und ++SYSTEMS verwenden ausschließlich ein Auskunftssystem mit lesendem Zugriff.
 - S&K Tiffany und Digma verwenden ausschließlich ein web-basiertes Auskunftssystem.
- Mobile Auftragsbearbeitung mit anschließender Synchronisation ist möglich. Eine Anbindung an Schachterkennungssysteme ist möglich.
- In der Regel werden Oracle oder Microsoft-SQL-Server-Datenbanken eingesetzt. Andere Datenbanksysteme sind implementierbar. Import- und Export-Schnittstellen liegen für die gängigsten Systeme vor (z.B. ISYBAU, DWA-M150, Microsoft Excel, CSV).
- Einführungsphase bzw. Testphase variiert zwischen wenigen Tagen und mehreren Monaten.

6.4.4 Anschaffung eines EDV-Systems

Mit der Anschaffung eines EDV-Systems werden definierte Ziele verfolgt, die sich von Netzbetreiber zu Netzbetreiber stark unterscheiden können. Das kann beispielsweise die Optimierung des Personal- und Maschineneinsatzes oder das effizientere Arbeiten durch eine einheitliche Dokumentation der durchgeführten Tätigkeiten sein. In diesem Abschnitt wird das im Rahmen der betriebsorientierten Untersuchungen entwickelte

Ablaufschema für die Anschaffung von EDV-Systemen dargestellt und erläutert. Das Schema basiert auf Experten- und Anwenderinterviews. Auch im Rahmen des IKT-Workshop „Betriebsführungssysteme und Kanaldatenbanken“ vom 06. März 2014 konnten wichtige Informationen zu dieser Aufgabenstellung erfasst werden.

Grundlegend stellt sich im Vorfeld der Anschaffung eines EDV-Systems die Frage, welche Form der Ausschreibung für den eigenen Betrieb sinnvoll ist. Bei der Anschaffung von EDV-Systemen wird zwischen **leistungsorientierter** und **funktionaler Ausschreibung** unterschieden (Hebel, 2014). Die Unterschiede sind in Abbildung 130 dargestellt und im Folgenden kurz erläutert.

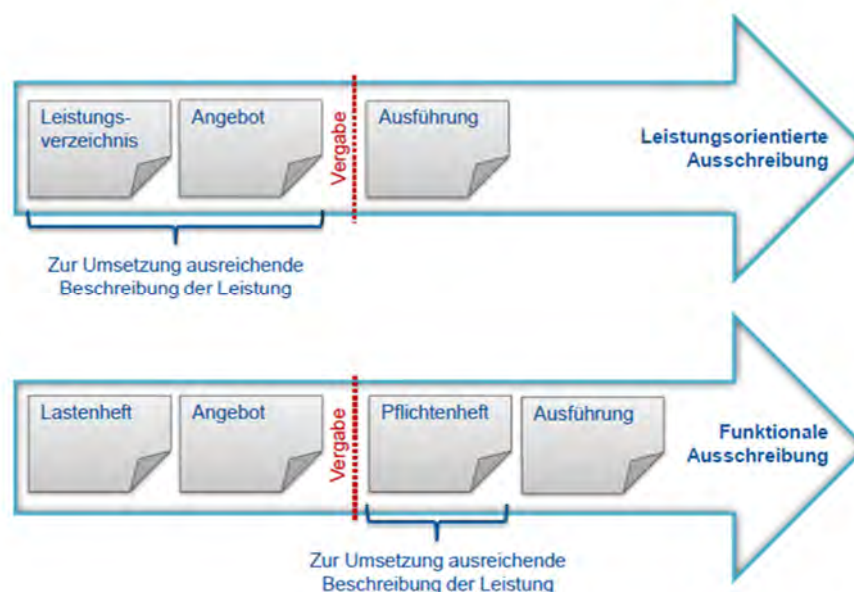


Abbildung 130: Ausschreibung von EDV-Systemen, Vorgehensweise, aus (Hebel, 2014)

Bei der **leistungsorientierten Ausschreibung** wird vom Auftraggeber ein Leistungsverzeichnis erstellt, welches den Umfang und die Anforderungen an das EDV-System beschreibt. Auf Grundlage des Leistungsverzeichnisses werden von den Bietern Angebote erstellt. Damit bleibt für die Bieter bei dieser Form der Ausschreibung wenig Spielraum für eigene Konzepte und Lösungsansätze. Diese Form der Ausschreibung empfiehlt sich vor allem für kleine bis mittelgroße Netzbetreiber mit relativ übersichtlichen Arbeitsabläufen und einfachen Betriebsprozessstrukturen.

Bei der **funktionalen Ausschreibung** definiert der Auftraggeber seine Anforderungen und Ziele in Form eines Lastenhefts. Dieses enthält den Angebotsumfang sowie Anforderungen an das System und den Projektverlauf. Dadurch entsteht zwischen den Bietern ein Konzeptwettbewerb mit individuellen Lösungsansätzen. Vor diesem Hintergrund erstellen die Bieter Pflichtenhefte, in denen der eigene Lösungsansatz für die Erreichung der Ziele dargestellt wird. So lassen sich gemeinsam individuelle Sonderlösungen entwickeln. Diese Form der Ausschreibung empfiehlt sich vor allem für große Netzbetreiber mit stark vernetzten Betriebsstrukturen.

Vor dem Hintergrund dieser unterschiedlichen Ausschreibungsmöglichkeiten wurde im Rahmen der betriebsorientierten Untersuchungen ein Ablaufschema für die Anschaffung eines EDV-System entwickelt (Abbildung 131). Dies ergänzt die EDV-Marktübersichten (vgl. Abbildung 128 und Abbildung 129) und gibt Netzbetreibern eine Orientierung bei der Einführung ihres EDV-Systems. Die leistungsorientierte und die funktionale Ausschreibung werden einander gegenübergestellt.

Das Ablaufschema steht unter www.ikt.de/kanalreinigung zum Download bereit (vgl. Abschnitt 7.2 Tabelle 64).

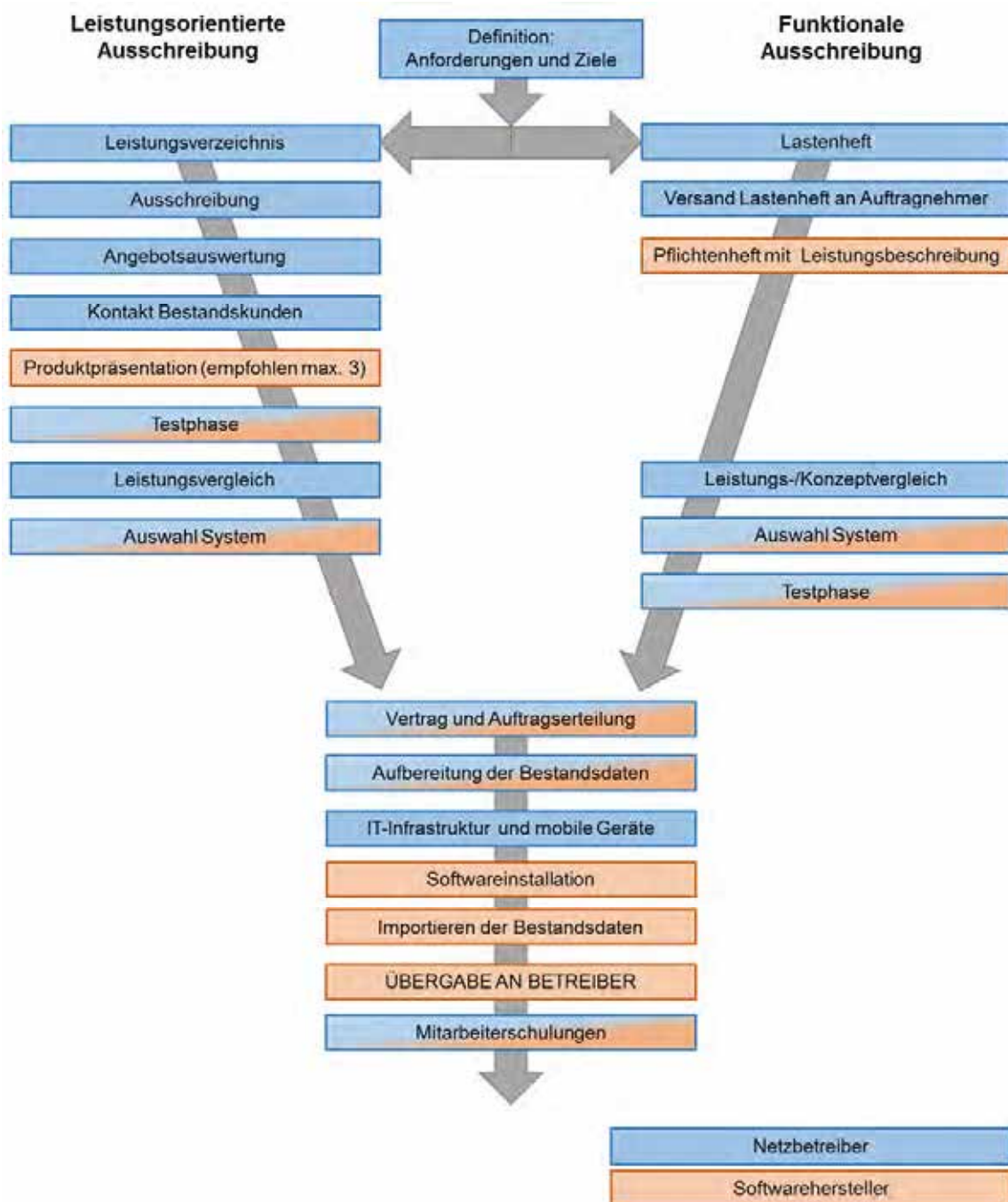


Abbildung 131: Arbeitshilfe – Ablaufschema „Anschaffung eines EDV-Systems“

6.4.5 Kostenstruktur

Die Einführung und Anschaffung einer EDV-Unterstützung in Form eines Kanalinformationssystems oder eines Betriebsführungssystems ist für die jeweiligen Netzbetreiber mit einer Reihe von Kosten verbunden. Diese entstehen zum einen während der Anschaffungsphase und zum anderen über die Nutzungsphase. Dazu zählen unter anderem in der **Anschaffungsphase**

- Schulung und Einarbeitung
- Testphase,
- Lizenzen,
- Arbeitsplätze,
- mobile Geräte und
- interne EDV-Infrastruktur;

in der **Nutzungsphase**

- Lizenzen,
- Mitarbeiter,
- Support und
- Service- und Wartungskosten.

Nachfolgend werden Erfahrungswerte anhand von Fallbeispielen erläutert.

6.4.5.1 Fallbeispiel: Kasselwasser

Bei der Umstellung auf das Kanalinformationssystem Arlis des Herstellers KRZ lagen die Kosten während der Anschaffungsphase bei ca. 45.000 € (Software, Lizenz) und 25.000 € (mobile Geräte). Darüber hinaus entstanden in der Nutzungsphase jährliche Kosten von ca. 3.500 €/a für Support und Wartung. Informationen über die Kosten für die Testphase sowie die Einarbeitung und Schulung der Mitarbeiter sind nicht verfügbar.

Anschaffungsphase: ca. 70.000 €

Nutzungsphase: ca. 3.500 €/a

6.4.5.2 Fallbeispiel: Stadt Mainz

Der Wirtschaftsbetrieb Mainz AöR führt derzeit das Kanalinformationssystem nova-KANDIS mit dem Modul Kanalbetrieb Pro vom Hersteller CADMAP Consulting

Ingenieurgesellschaft mbH ein. Dabei sind in der Anschaffungsphase eine Reihe unterschiedlicher Kosten, z.B. Kosten für Schulung und Einarbeitung der Mitarbeiter, Software, Hardware, Testphase, Arbeitsplätze und mobile Geräte entstanden. In der Nutzungsphase müssen Kosten für Wartung, Service, Updates sowie für Lizenzen gedeckt werden. Genaue Angaben zu den entstandenen Kosten waren nicht verfügbar.

6.4.5.3 Technische Betriebe Velbert

Bei der Umstellung auf das Kanalinformationssystem S&K Tiffany von den DW-Informationssystemen sind in der Anschaffungsphase Kosten für Software, Hardware, Lizenzen und mobile Geräte entstanden. In der Nutzungsphase müssen Kosten für Wartung und Updates gedeckt werden. Genaue Angaben zu den entstandenen Kosten waren nicht verfügbar.

6.4.5.4 Stadt Bottrop

Bei der Umstellung auf das Kanalinformationssystem IKIS von IBAK Helmut Hunger GmbH & Co KG sind in der Anschaffungsphase ca. 12.000 € für Software ausgegeben worden. Weitere Kosten sind für die Anschaffung von drei Arbeitsplatzlizenzen entstanden. Hierzu wurden keine genauen Angaben gemacht. Zusätzlich kommen in der Nutzungsphase ungefähr 2.000 € für weitere Module und 3.500 €/a für die Wartung der Software dazu.

Anschaffungsphase: ca. 12.000 € + 2.000 € (weitere Module)

Nutzungsphase: ca. 3.500 €/a

6.5 Kanalreinigung

6.5.1 Ist- Analyse

Kanalreinigungsarbeiten werden nach Spülplan mit eigenen Fahrzeugen und eigenem Personal oder durch private Dienstleister durchgeführt. Vorgaben und Randbedingungen für die Reinigungspraxis ergeben sich z. B. aus DWA-Arbeitsblatt M 197 (2004) oder DIN 19523 (2008). Bspw. benennt das DWA-Arbeitsblatt M 197 einen Druck unmittelbar an der Düse von 80-100 bar und die DIN 19523 die Einhaltung der Spülstrahlleistungsdichte von 330 +/- 15 W/mm² 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 sollten 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 der ersten Phase des Projektes (IST-Analyse) mit einem Messprogramm unter dem Arbeitstitel „HD-Fahrzeug-Check“ überprüft.

Messen: Druck- und Durchfluss

Bei dem Messprogramm „HD-Fahrzeug-Check“ wird 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 (Abbildung 132). Darüber hinaus wurden der Druck am Fahrzeug und der Druck unmittelbar an der Düse gemessen (Abbildung 133).



Abbildung 132: Überprüfung der HD-Pumpe im Freistrahlbetrieb; „Fahrzeug-Check“

Abbildung 133: Druck- und Durchflussmessung im Düsenbetrieb, „Fahrzeug-Check“

Diese Vorgehensweise wurde gewählt, um den Druckverlust an der Düse zu ermitteln. Die Ergebnisse wurden in folgenden Diagrammen zusammengefasst (Abbildung 134, Abbildung 135).

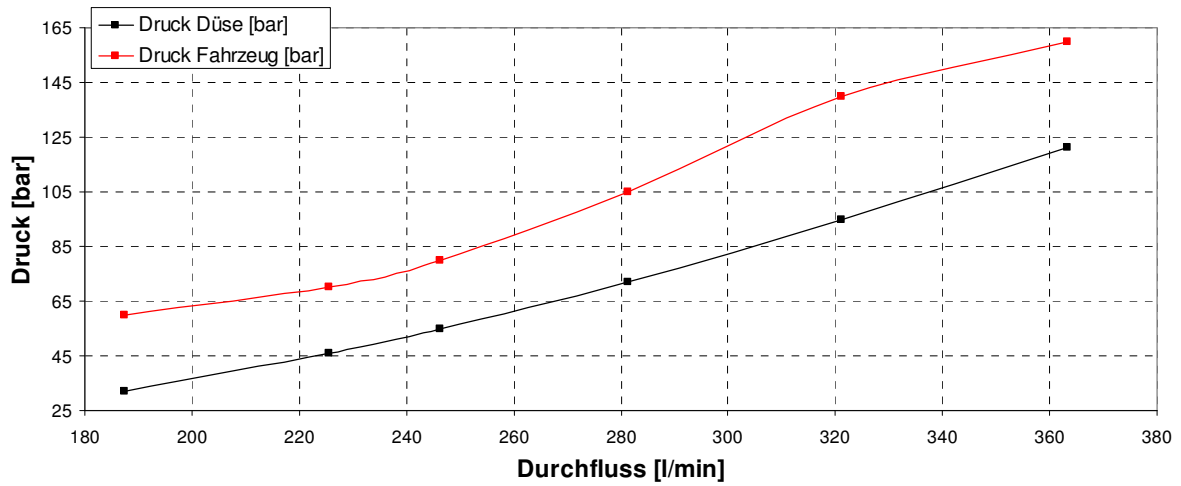


Abbildung 134: Druck am Fahrzeug und an der Düse für verschiedene Durchflüsse

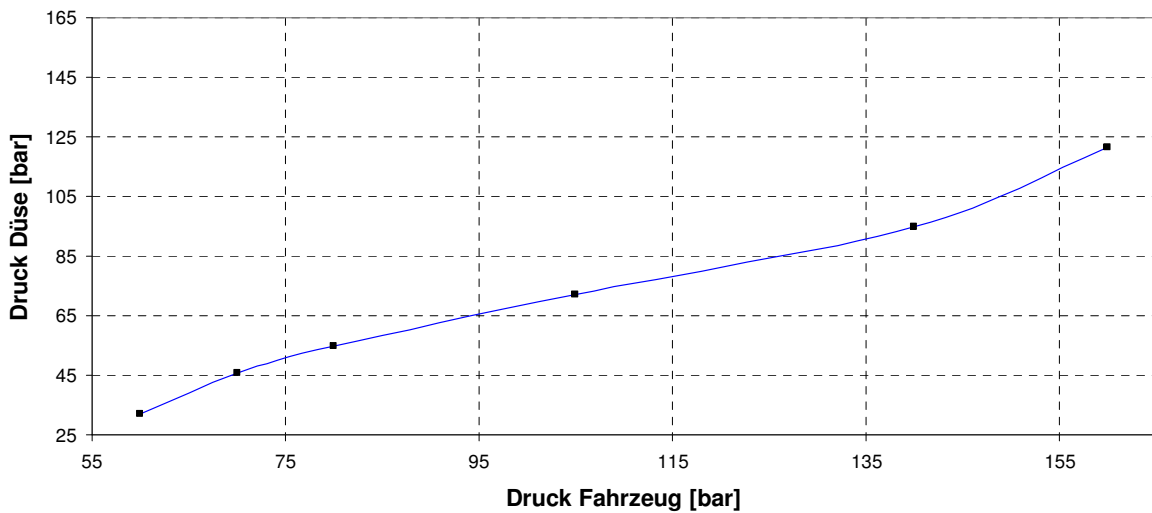


Abbildung 135: Düsenkennlinie für Fahrzeug (HD-Pumpe/ Schlauch)

Darüber hinaus wurden der Druck und der Durchfluss in Abhängigkeit der unterschiedlichen Druckstufen unmittelbar an der Düse gemessen, um mögliche Auffälligkeiten bzw. Schwankungen der Austrittsverluste zu identifizieren (Abbildung 136).

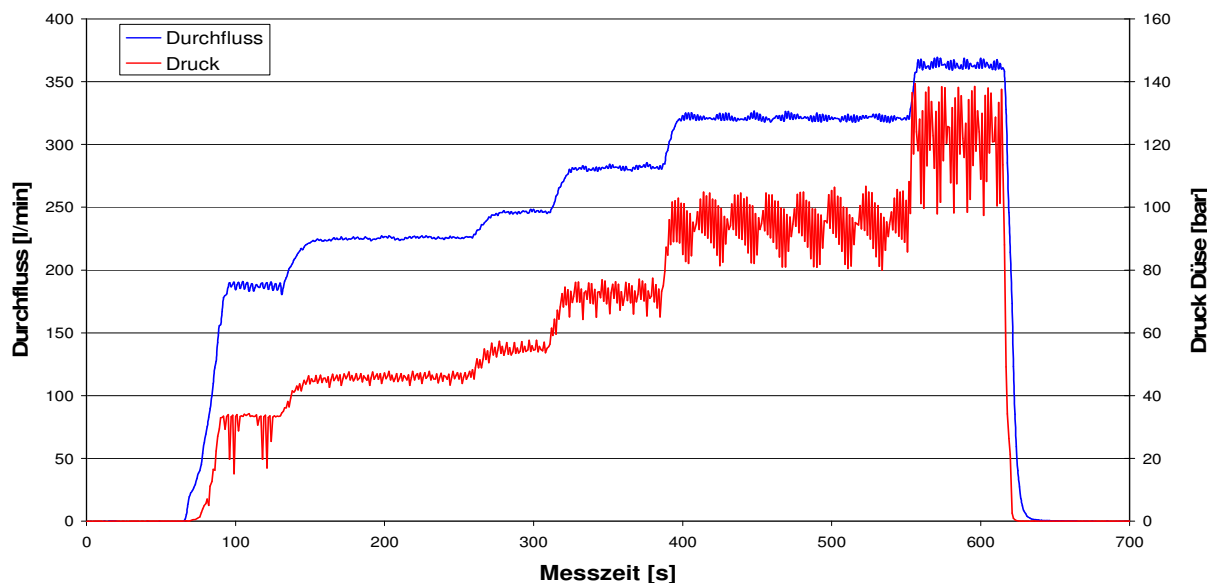


Abbildung 136: Druck- und Durchflussmessungen in Abhängigkeit der Messzeit

Saugen: Leistungs- und Vergleichstests der Vakuumpumpen

Bei den Saugprüfungen wurde die Saugleistungsfähigkeit von Vakuumpumpen bei allen drei Reinigungsfahrzeugen ermittelt. Hierzu wurden zunächst drei jeweils 90 Liter fassende Behälter mit Räumgut (Sand) bis zur Oberkante befüllt und in 4,50 m Tiefe aufgestellt. Nacheinander wurden diese Behälter dann durch die Fahrzeuge mittels Vakuumpumpe komplett leer gesaugt (vgl. Abbildung 137). Hierbei wurden jeweils die Zeiten für das Leersaugen des Behälters für jedes einzelne Reinigungsfahrzeug dokumentiert und die Werte im Nachgang miteinander verglichen (vgl. Abbildung 138).



Abbildung 137: Saugen des Räumgutes, „Fahrzeug-Check“

Abbildung 138: Erfassen der Saugleistung, „Fahrzeug-Check“

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 Bewertungskriterien wurden von den Netzbetreibern für die Überprüfung von Reinigungsfahrzeugen vorgeschlagen:

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

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

Als **Ergebnis der Ist-Analyse** lassen sich folgende Hinweise und Empfehlungen zur Bewertung und Umsetzung des Moduls „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** der Fahrzeugbesatzung 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.
- Für das Bedienerpersonal bieten sich **Schulungen zur Werkzeugauswahl** (insbesondere Düsen) für unterschiedliche Ablagerungs- und Einsatzarten an. Darüber hinaus sollte Bedienpersonal mit wenig Praxiserfahrung gezielt auf die Fahrzeugbedienung, -pflege und -wartung vorbereitet werden.

6.5.2 Umsetzungsschwerpunkte

Bei der Kanalreinigung sind Hochdruckspül- und Saugfahrzeuge die wertvollsten und wichtigsten Werkzeuge, die ein Kanalbetrieb seinen Mitarbeitern zur Verfügung stellt. Der hohe Grad der Technisierung erfordert von den Mitarbeitern und Planern aber auch, dass das genaue Leistungsprofil und die tatsächliche Leistungsfähigkeit der Fahrzeuge vor Ort bekannt sind. In der zweiten Phase des Projektes wurde daher ein Leistungsprofil und Untersuchungsprogramm für HD-Spülfahrzeuge entwickelt. Dies basiert auf den hierfür relevanten technischen Zusammenhängen sowie technisch-physikalischen Mechanismen. Diese wurden bereits in Abschnitt 4.2 ausführlich dargestellt und erläutert.

6.5.3 Prüfprogramm für HD-Spülfahrzeuge

6.5.3.1 Überblick

Im Zuge der Überprüfung der HD-Spülfahrzeuge werden folgende Parameter näher aufgenommen:

- Druck an der HD-Pumpe,
- Durchfluss an der HD-Pumpe,
- Druck an der Düse,
- Spülstrahlleistungsdichte,
- Saugleistung der Vakuumpumpe,
- Lärmemissionen.

Der Druck an der Düse ist der wichtigste Parameter, er gibt Aufschluss über die Reinigungsintensität. Wird mit zu viel Düsendruck gereinigt, besteht die Gefahr einer Schädigung der Kanalwandung. Falls mit zu wenig Druck gearbeitet wird, kann die gewünschte Reinigungsleistung nicht erzielt werden. Es stellt sich zudem die Frage, ob die HD-Pumpe auch noch nach einigen Jahren die Herstellerangaben bezüglich des maximalen Durchflusses erzielen kann.

In den folgenden Abschnitten wird die Prüfung der einzelnen Parameter ausführlich dargestellt und diskutiert.

6.5.3.2 Prüfung: Druck- und Durchflussmessung

6.5.3.2.1 Versuchsaufbau und -anforderungen

Mit Hilfe der Druck- und Durchflussmessung kann die Leistungsfähigkeit der auf den HD-Spülfahrzeugen verbauten Hochdruckpumpen geprüft werden. Dabei werden die für die Reinigung wesentlichen Betriebsparameter Druck [bar] und Durchfluss [l/min] in Abhängigkeit der Motorleistung (Drehzahl) an der Düse gemessen. Die Messung erfolgt mit einem digitalen Manometer (Druck) und einem magnetisch-induktiven Durchflussmessgerät (MID).

Der Versuchsaufbau für eine Druck- und Durchflussmessung ist in Abbildung 139 dargestellt. Der Hochdruckspülschlauch des Hochdruckspül- und Saugfahrzeugs (1) wird an das MID (2) angeschlossen. Vom MID ausgehend wird das Wasser durch ein Schlauchelement bis zur angeschlossenen Hochdruckspüldüse geleitet. Diese liegt in einem 3m langen Plexiglasrohr, welches zur Stabilisierung von beiden Seiten beschwert ist. Direkt an der HD-Düse misst der digitale Drucksensor (3) den Wasserdruck. Die Messwerte von MID und digitalem Drucksensor werden an den Mess- und Steuerstand (4) übertragen und mit Hilfe geeigneter Software aufgezeichnet und ausgewertet.

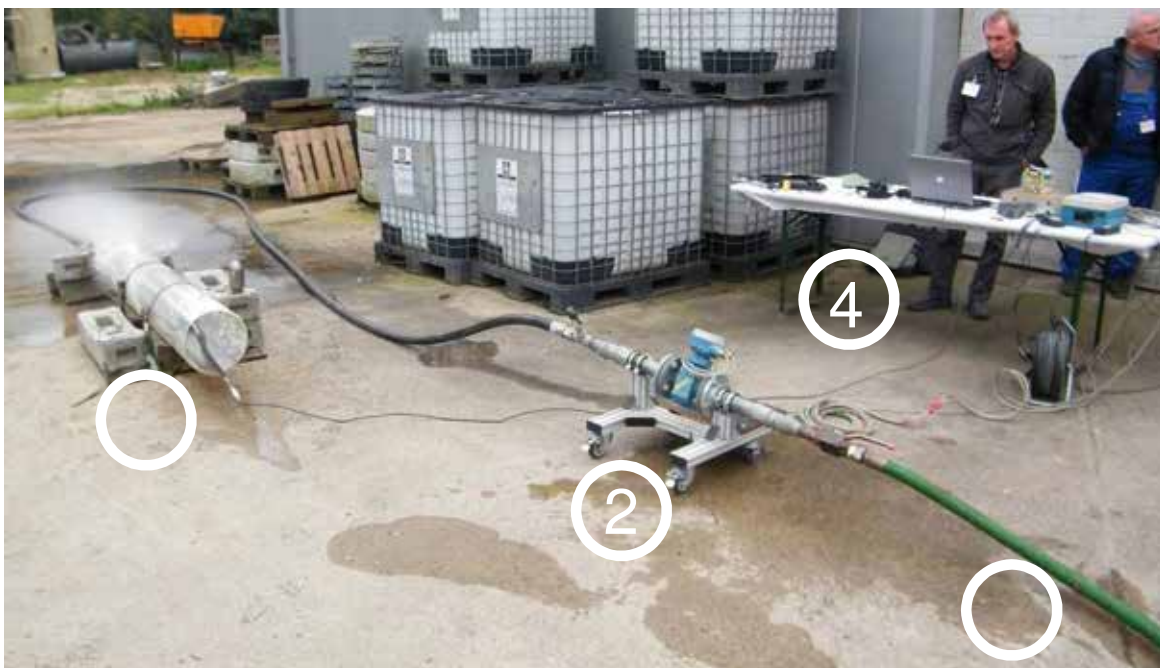


Abbildung 139: Versuchsaufbau Druck- und Durchflussmessung: (1) Hochdruckspülschlauch; (2) Magnetisch-induktives Durchflussmessgerät; (3) Digitaler Drucksensor; (4) Mess- und Steuerstand

Insgesamt wurde in der Umsetzungsphase des Projektes an neun HD-Spülfahrzeugen eine Druck- und Durchflussmessung vorgenommen. Nach ATV-DVWK-M 197 (2004) sind Anforderungen für den Druck an Pumpe und Düse in Abhängigkeit des Kanalquerschnitts benannt worden:

- Kanäle DN200 bis DN800 oder entsprechende Eiprofile:

Durchfluss	ca. 320 l/min
Fahrzeugdruck	150 bar
Düsendruck	80-100 bar
- Kanäle DN900 bis DN1200 oder entsprechende Eiprofile, Maul- oder Sonderprofile:

Durchfluss	ca. 320-450 l/min
Fahrzeugdruck	150-180 bar
Düsendruck	80-100 bar

6.5.3.2.2 Durchflussmessung

Die Leistungsüberprüfung von HD-Spülfahrzeugen beginnt mit der Durchflussmessung an der Hochdruckpumpe in Form einer Freistrahlmessung (ohne Düse) (Abbildung 140). Dabei wird der Durchfluss in l/min bis zur vollen Leistung der Pumpe gemessen und somit der Maximalwert bestimmt. Das Ergebnis wird anschließend mit den Herstellerangaben verglichen. In einer weiteren Prüfung werden die Durchflussmengen in Abhängigkeit der Pumpenmotordrehzahl ermittelt. Die ermittelten Werte werden später für die Berechnung der Spülstrahlleistungsdichte verwendet.



Abbildung 140: Freistrahlmessung

Die Ergebnisse der Durchflussmessung sind für die betrachteten Fahrzeuge in Tabelle 53 dargestellt. Bei acht von neun überprüften Fahrzeugen konnten nur geringe Abweichungen von denen der Herstellerangaben beobachtet werden. Bei vier Fahrzeugen wird die Nennleistung der Pumpen sogar überschritten.

Tabelle 53: Durchflussmessung

Fahrzeuge Messung	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Soll-Durchfluss (Herstellerangabe) [l/min]	315	408	408	408	315	333	163	98,1	315
max. gemessener Durchfluss [l/min]	315	418	415	396	308	326	172	120	310
Differenz Soll-Ist-Messung [%]	0,0	2,45	1,72	-2,94	-2,22	-2,10	5,52	22,32	-1,59

Die Freistrahldurchflussmessung ist im IKT bereits seit mehreren Jahren ein fester Bestandteil der Leistungsüberprüfung von HD-Spülfahrzeugen. Die Leistungswerte sind in Abbildung 141 für alle bisher überprüften Spülfahrzeuge zusammengestellt. Es zeigt sich, dass der gemessene Durchfluss fast durchweg relativ nah an den Herstellerangaben liegt oder diese sogar übersteigt. Ausnahmen dieses Eindrucks bilden die Fahrzeuge 19 und 43, bei denen der Sollwert stark unter- bzw. überschritten wird.

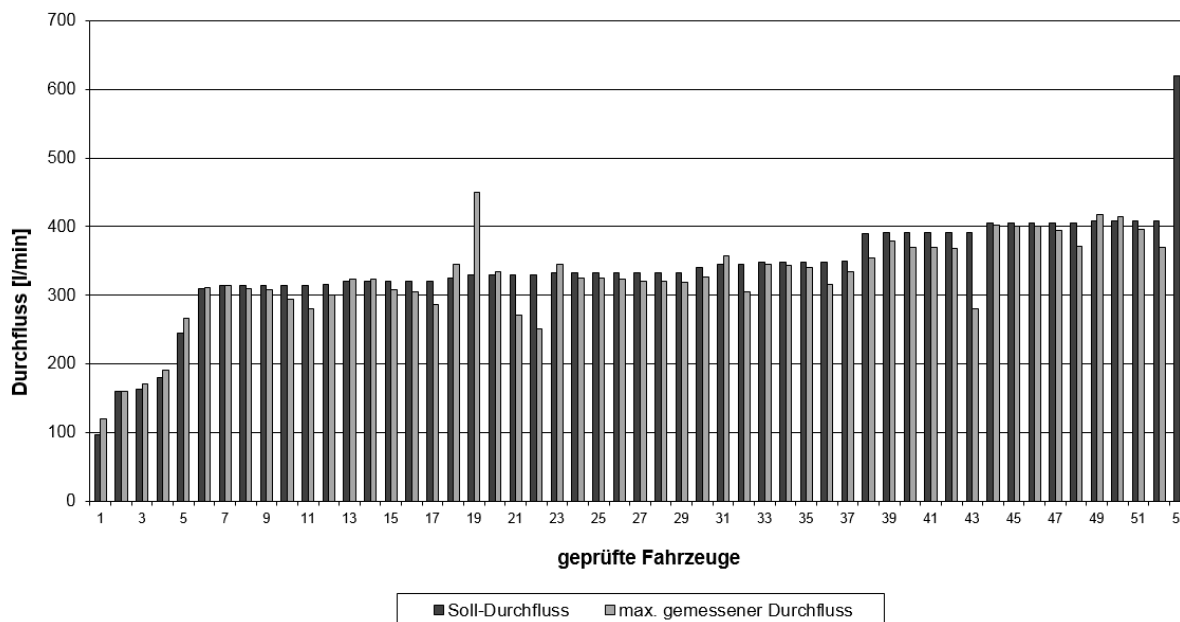


Abbildung 141: Durchflussmesswerte im Soll-Ist-Vergleich

Abbildung 142 zeigt die relativen Abweichungen der Mess- und Herstellerwerte. Dabei fällt auf, dass nur ein Drittel der überprüften Fahrzeuge die Herstellerangaben tatsächlich vollständig erreicht bzw. überschreitet. Zwei Drittel der überprüften HD-Pumpen liegen (wenn auch knapp) unterhalb der Sollwerte. Bis auf sechs Fahrzeuge liegt die

Unterschreitung der Herstellerangaben aber unterhalb 10%. Für diese Fahrzeuge wurde eine Pumpenwartung und Neuprüfung empfohlen.

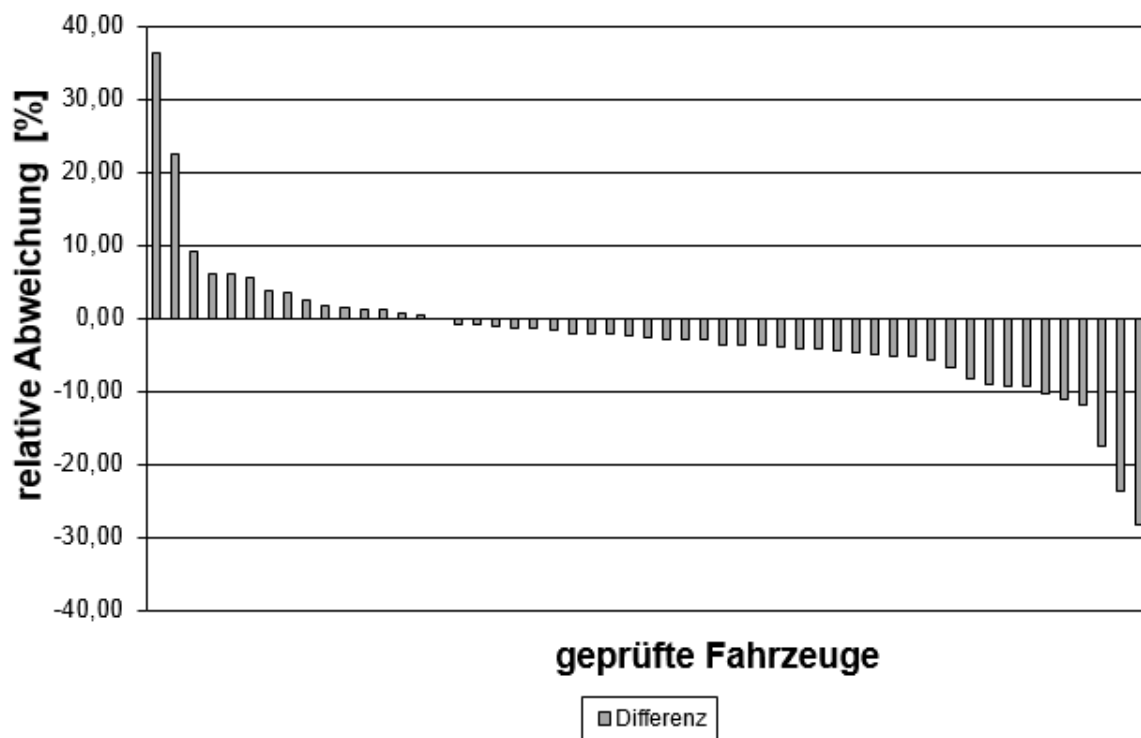


Abbildung 142: Relative Abweichung des Pumpendurchflusses vom Soll-Wert

Die Durchflussmessung an der Hochdruckpumpe ist fester Bestandteil der Leistungsüberprüfung von Hochdruckspülfahrzeugen und liefert ausreichend genaue Ergebnisse. Besondere Optimierungspotenziale bestehen zum jetzigen Zeitpunkt nicht.

6.5.3.2.3 Druckmessung

Bei der Druckmessung werden sowohl der an der HD-Pumpe anliegende Druck (Fahrzeugdruck) als auch der an der Düse anstehende Druck (Düsendruck) gemessen. Hierdurch lassen sich die Druckverluste im Spülsystem ermitteln (vgl. Abschnitt 4.4.2). Es wurden wiederum neun Hochdruckspülfahrzeuge überprüft. Zur Druckmessung (Fahrzeug- und Düsendruck) wurden jeweils die betriebseigenen „Lieblingsdüsen“ sowie auch eine IKT-„Normdüse“ verwendet. Dabei wurde der Fahrzeugdruck sukzessive von 60 bar beginnend um 20 bar erhöht und jeweils der dazugehörige Düsendruck ermittelt.

Im Ergebnis erhält man für jedes geprüfte Fahrzeug einen Datensatz, der in Tabelle 54 exemplarisch dargestellt ist. Die gemessenen Werte sind für die beiden verwendeten Düsen sehr ähnlich. Bei starken Abweichungen wird empfohlen, die Düseneinsätze zu überprüfen und gegebenenfalls auszuwechseln.

Tabelle 54: Druckmessung Fahrzeug

Fahrzeug 1 (Bombe)		Fahrzeug 1 (IKT-Düse)	
Fahrzeugdruck [bar]	Düsendruck [bar]	Fahrzeugdruck [bar]	Düsendruck [bar]
60	43	60	40
80	50	80	52
100	76	100	73
120	88	120	80
140	96	140	96
160	116	160	111

Die Druckprüfung mit Hilfe des digitalen Manometers ist am IKT seit mehreren Jahren fester Bestandteil der Leistungsüberprüfung von HD-Spülfahrzeugen und spiegelt den derzeitigen Stand der Technik wider. Durch das Prüfverfahren sind präzise Messungen des Fahrzeug- und Düsendruckes möglich. Messergebnisse an über 120 Hochdruckdüsen sind in Abbildung 143 zusammengestellt.

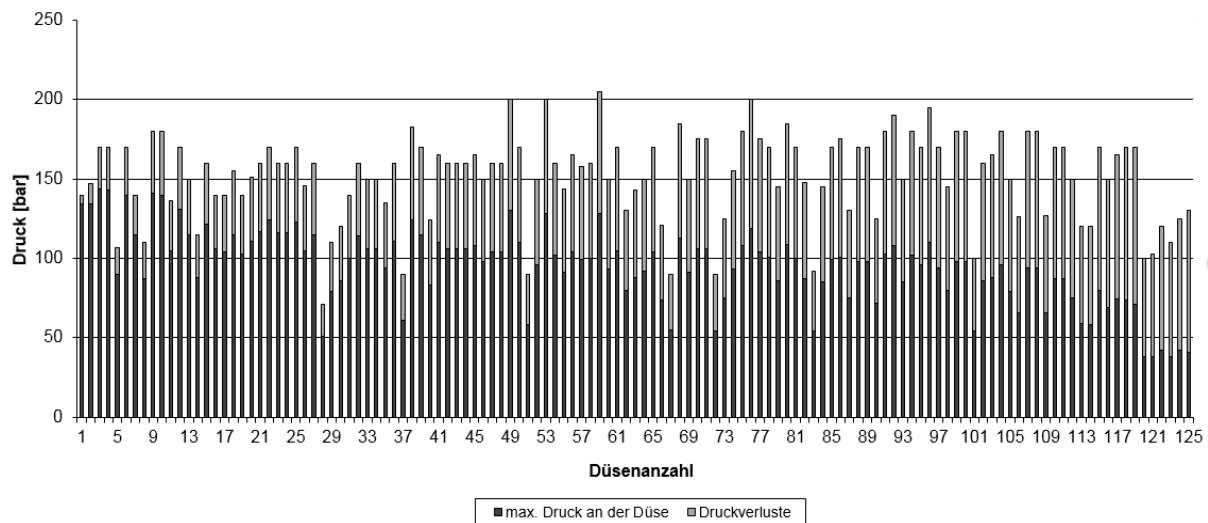


Abbildung 143: Gegenüberstellung Fahrzeug- und Düsendruck

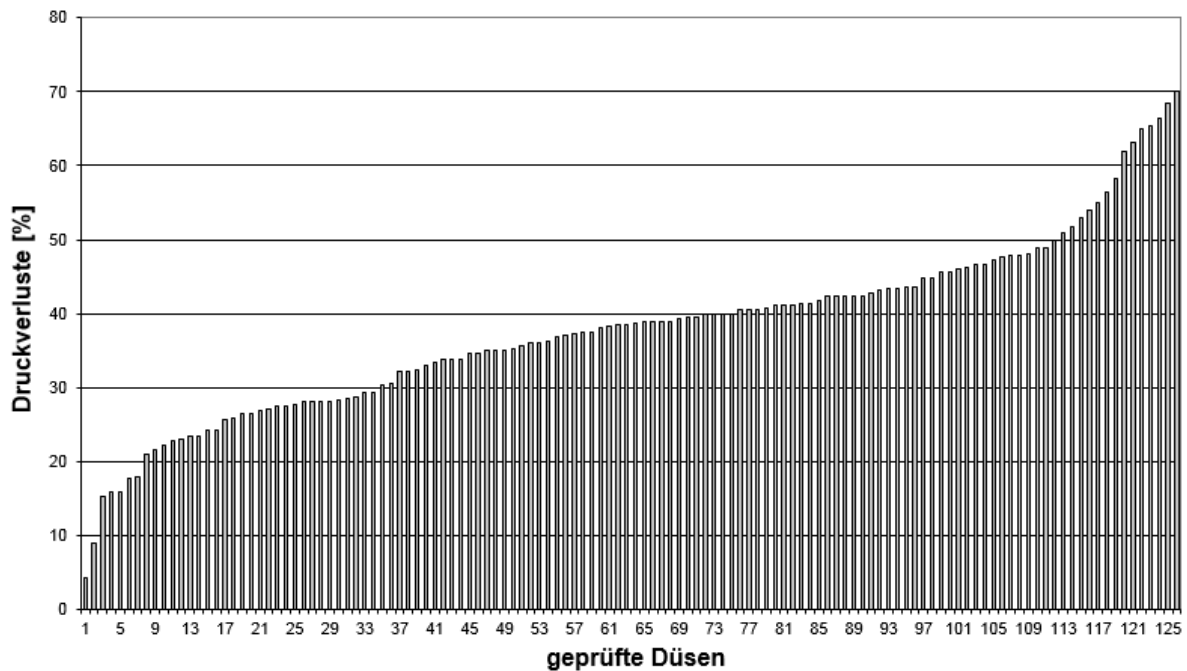


Abbildung 144: Relative Druckverluste in Bezug auf den Fahrzeugdruck

Es lassen sich stark unterschiedliche Druckverluste erkennen. Teilweise sind die Druckverluste im System sogar größer als der verbleibende Düsendruck. Die Spanne der Druckverluste der überprüften Düsen reicht dabei von 4% bis 70% des Drucks an der HD-Pumpe (Abbildung 144). Diese signifikanten Unterschiede zwischen Fahrzeug- und Düsendruck sind für viele Anwender überraschend, obwohl gerade dieses Wissen für eine effiziente und schonende Kanalreinigung unabdingbar ist.

Insgesamt zeigen die durchgeführten Untersuchungen, dass das derzeit angewendete Verfahren zur Ermittlung der Fahrzeug- und Düsendrücke kein besonderes Optimierungspotenzial aufweist.

6.5.3.3 Prüfung: Spülstrahlleistungsdichte

Ein wichtiger Bestandteil der vom IKT durchgeführten Leistungsüberprüfung von HD-Spülfahrzeugen ist die Bestimmung der Spülstrahlleistungsdichte gemäß DIN19523 (2008) (vgl. Abschnitt 4.4.3). Dazu werden für die am HD-Spülfahrzeug zu überprüfenden Düsen zunächst folgende Daten erhoben:

- Anzahl der Düseneinsätze,
- Durchmesser der Düseneinsätze und
- Abstrahlwinkel der Düseneinsätze.

Falls diese Daten nicht bekannt sind, kann wie in Abbildung 145 bis Abbildung 148 dargestellt eine Vermessung der Düse durchgeführt werden. Die Anzahl der Düseneinsätze kann einfach abgezählt und notiert werden (Abbildung 145). Der Durchmesser der Düseneinsätze wird anschließend mit einer Düsenlehre bestimmt

(Abbildung 146, Abbildung 147). Wenn der Abstrahlwinkel der Düseneinsätze ebenfalls unbekannt ist, wird dieser mit einem Winkelmesser ermittelt (Abbildung 148). Als Ergebnis der Datenerfassung erhält man den in Tabelle 55 exemplarisch dargestellten Datensatz für jedes Fahrzeug. Anhand dieses Beispiel wird im Folgenden die Berechnung der Spülstrahlleistungsdichte durchgeführt und erläutert.

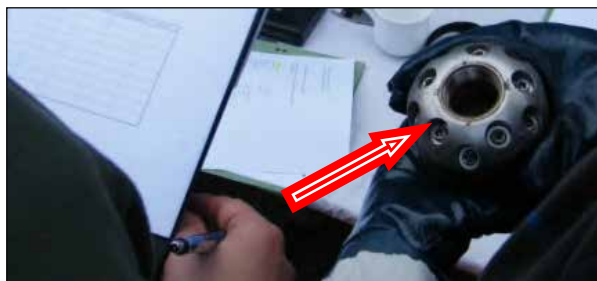


Abbildung 145: Anzahl der Düseneinsätze

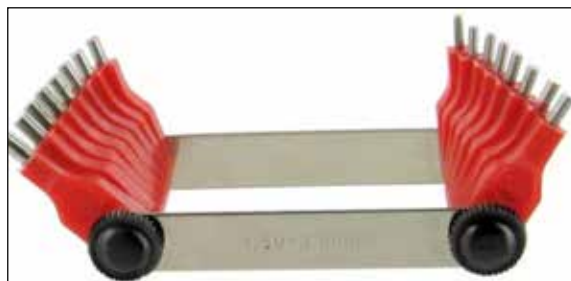


Abbildung 146: Düsenlehre mit Stahlstiften



Abbildung 147: Düsenlehre-Messnadel



Abbildung 148: Messung des Abstrahlwinkels

Tabelle 55: Fahrzeugdaten

Fahrzeugkennzeichen	Fahrzeug 1	
Pumpenleistung [l/min]	315	
Schlauch-Nennweite ["]	1	
Schlauch-Länge [m]	160	
Schlauch-Material	Kunststoff	
Bezeichnung der Düse	Bombe	
Düsenansätze	Anzahl [Stck.]	10
	Durchmesser [mm]	2,0
	Winkel [°]	30

Weiterhin werden für die Berechnung der Spülstrahlleistungsdichte die Prüfdaten der Druck- und Durchflussmessung des jeweiligen Fahrzeugs benötigt (Tabelle 56). Darin ergibt sich der Differenzdruck Δp als Differenz von Fahrzeugdruck p_{FZ} und Düsendruck

p_D . Der Druckverlust wird schließlich auf die Schlauchlänge bezogen und in bar/m angegeben.

Tabelle 56: Messung von Düsendruck und Durchfluss

Drehzahl n [1/min]	700	750	900	1000	1050	1250
Durchfluss Q [l/min]	170	192	224	247	258	281
Fahrzeugdruck p_{FZ} [bar]	60	80	100	120	140	160
Düsendruck p_D [bar]	43	50	76	88	96	116
Differenzdruck Δp [bar]	17	30	24	32	44	44
$\Delta p/L_{\text{Schlauch}}$ [bar/m]	0,11	0,19	0,15	0,20	0,28	0,28

Für die Berechnung der Spülstrahlleistungsdichte (vgl. Abschnitt 4.4.3) nach DIN 19523 (2008) wird anschließend der Durchflussbeiwert des Spülkopfes (c_d -Wert) anhand der fahrzeugspezifischen Daten berechnet.

$$c_d = 0,474 \times \frac{Q}{d^2 \times p^{1/2}}$$

Der Düsendruck p in Höhe von 43 bar entspricht 4,3 MPa und der Durchmesser d ist 2,0 mm. Die Anzahl der Düseneinsätze ist in diesem Fall 10 und der entsprechende Durchfluss Q je Düseneinsatz liegt entsprechend bei 17 l/min. Daraus ergibt sich mit:

Durchfluss Q (je Düseneinsatz)	= 17 [l/min]
lichter Durchmesser d	= 2 [mm]
Anzahl der Düseneinsätze	= 10 [-]
Düsendruck	= 4,3 [MPa]

$$c_d = 0,474 \times \frac{17}{2^2 \times 4,3^{1/2}} = 0,971 [-]$$

Der ermittelte Durchflussbeiwert wird anschließend in die Formel der Spülstrahlleistungsdichte eingesetzt. Alle anderen Parameter sind bekannt.

$$D_j = 44,72 \times c_d^3 \times p^{3/2} \times \sin \alpha$$

mit: Durchflussbeiwert c_d	= 0,971 [-]
Düsendruck	= 4,3 [Mpa]
Strahlwinkel	= 30 [°]

$$D_j = 44,72 \times 0,971^3 \times 4,3^{3/2} \times \sin 30 = 183 [W / mm^2]$$

Diese Berechnung wird für alle weiteren Druck-/Durchflussbereiche aus Tabelle 56 wiederholt. Im Ergebnis erhält man die in Tabelle 57 zusammengestellten Werte für die Spülstrahlleistungsdichte.

Tabelle 57: Spülstrahlleistungsdichte von Fahrzeug 1

Fahrzeug 1 (IKT-Düse)		Fahrzeug 1 (Bombe)	
Düsendruck [bar]	Dj [W/mm ²]	Düsendruck [bar]	Dj [W/mm ²]
40	81	43	183
52	119	50	263
73	195	76	418
80	232	88	561
96	293	96	639
111	363	116	826
Grenzwert nach DIN19523 = 330 +/- 15 W/mm ²			

Der normativ vermerkte Grenzwert für die Spülstrahlleistungsdichte von 330 +/- 15 W/mm² wird, wie Tabelle 57 zeigt, bereits bei einem Düsendruck von 76 bar bzw. 111 bar überschritten. Allerdings ist dieser Grenzwert, der im Rahmen von Eignungsprüfungen zur Hochdruckspülbeständigkeit von Rohrwerkstoffen festgelegt wurde, bisher bei Netzbetreibern und Betriebspersonal kaum bekannt.

6.5.3.4 Spülstrahlleistungsdichte, Parameterstudie

6.5.3.4.1 Parameterstudie

Im vorangehenden Abschnitt wurde deutlich, dass die Spülstrahlleistungsdichte auch bei üblichen Betriebseinstellungen über den für die Rohrwerkstoffe maßgeblichen Grenzwerten liegen kann. Es ist allerdings noch offen, wie sich die einzelnen Betriebsparameter auf diese Größe auswirken. Durch eine Parameterstudie soll der Einfluss einzelner Parameter auf die Höhe der Spülstrahlleistungsdichte ermittelt werden, um Orientierungswerte für die Praxis abzuleiten. Zurzeit kann die Spülstrahlleistungsdichte noch nicht am Fahrzeug abgelesen werden (vgl. Abschnitt 4.4.3).

Die betrachteten Parameter sind:

- Durchfluss,
- Anzahl der Düseneinsätze,
- Durchmesser der Düseneinsätze und
- Abstrahlwinkel der Düseneinsätze.

Der Betriebsparameter Druck wird nicht als eigenständiger Parameter variiert.

6.5.3.4.2 Durchfluss

Für die Parameterstudie wurden übliche Randbedingungen einer HD-Düse angenommen, die für die Kanalreinigung im Nennweitenbereich DN 200 – DN 500 anzusetzen sind. Für die Referenzdüse wurden 8 Düseneinsätze mit einem Durchmesser von 2,5 mm und einem Abstrahlwinkel α von 30° angenommen. Abbildung 149 zeigt die Spülstrahlleistungsdichte in Abhängigkeit des Durchflusses exemplarisch für eine Beispielrechnung.

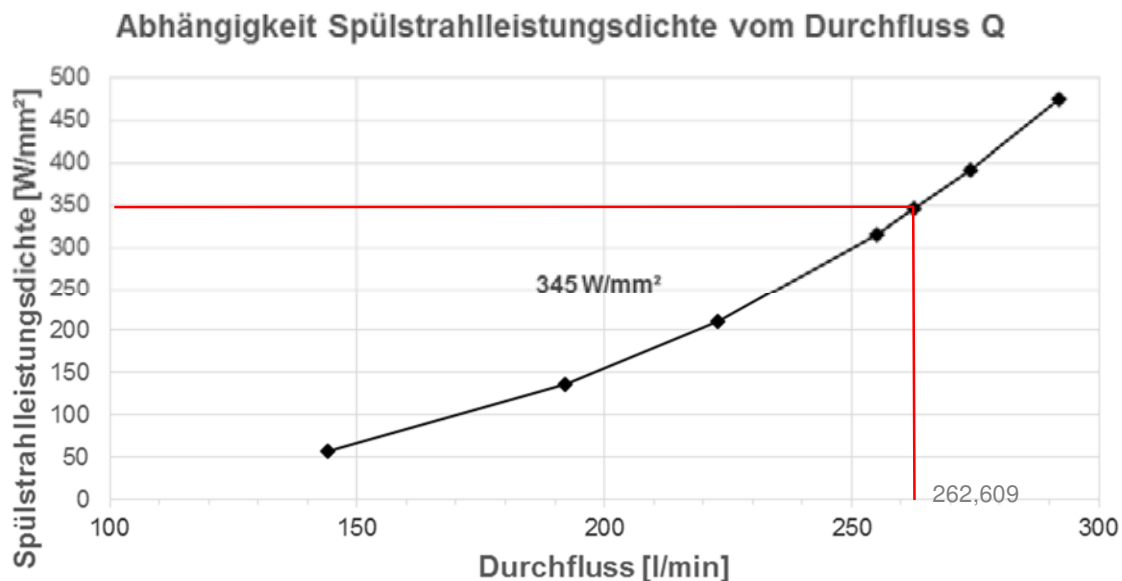


Abbildung 149: Spülstrahlleistungsdichte (IKT-Düse), Beispiel-Messung

Der Grenzwert von 345 W/mm^2 wird mit der Referenzdüse bei ca. 262 l/min erreicht. Ausschlaggebend ist hierbei nicht der Druck an der Düse, sondern der Durchfluss. Dieser wird allerdings je nach Fahrzeug mit unterschiedlichen Pumpendrücken bzw. Pumpendrehzahlen erzeugt.

Da sich bei den im Netz eingesetzten Fahrzeugen die einstellbaren Leistungsstufen der HD-Pumpe unterscheiden, wird für jedes Fahrzeug der Durchfluss in Abhängigkeit der Pumpendrehzahl erfasst. Die Ergebnisse für ein Beispiel-Fahrzeug sind in Tabelle 58 dargestellt.

Tabelle 58: Durchfluss in Abhängigkeit der Drehzahl, Beispiel

Drehzahl n [1/min]	600	820	1000	1180	1250	1350
Durchfluss Q [l/min]	144	192	223	255	274	292

Bei gleichzeitiger Betrachtung von Tabelle 58 und Abbildung 149 wird deutlich, dass für das betrachtete Fahrzeug und die betrachtete Düse bei einer Pumpendrehzahl von ca. 1200 Umdrehungen der Grenzwert der Spülstrahlleistungsdichte erreicht ist.

Um festzustellen, welche Auswirkung eine Variation des Durchflusses auf den Wert der Spülstrahlleistungsdichte hat, wurde mit der Referenzdüse eine Variation des

Durchflusses in 10%-Schritten, bezogen auf den Durchflussgrenzwert (262,609 l/min), vorgenommen. Die Ergebnisse sind in Abbildung 150 dargestellt. Die Spülstrahlleistungsdichte ist in Abhängigkeit der prozentualen Abweichung vom Durchflussgrenzwert (262,609 l/min) abgetragen.

Bei 10% Durchflusserhöhung ergibt sich ein Anstieg der Spülstrahlleistungsdichte um 33%. Bei einer Verringerung um 10% stellt sich die Spülstrahlleistungsdichte 27% niedriger ein. Bei einer 20-prozentigen Erhöhung des Durchflusses steigt der Wert der Spülstrahlleistungsdichte auf 596 W/mm², d.h. nahezu das Doppelte, an. Erwartungsgemäß ist die Größe des Durchflusses von maßgeblichem Einfluss für die Spülstrahlleistungsdichte (vgl. Q in dritter Potenz der Bestimmungsgleichung für D_j in Abschnitt 4.4.3).

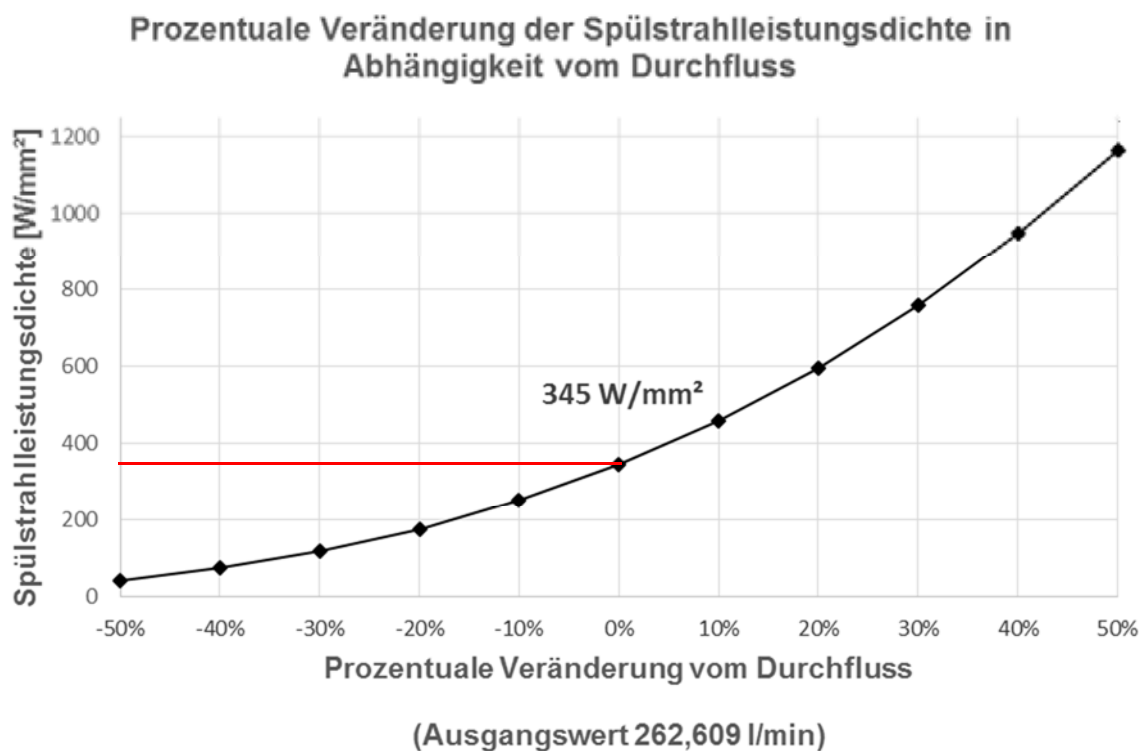


Abbildung 150: Spülstrahlleistungsdichte und Durchfluss, Parametervariation

6.5.3.4.3 Anzahl der Düseneinsätze

Neben der Durchflussmenge wurde auch die Anzahl der Düseneinsätze als Parameter betrachtet. Hierbei werden ebenfalls die Parameter der Referenzdüse bei einem Durchfluss von 262,609 l/min in die Berechnungen der Spülstrahlleistungsdichte eingesetzt. Von diesem Ausgangswert wird die Anzahl der Düseneinsätze variiert. Dabei werden zur Verdeutlichung auch Düsen-Anzahlen gewählt, die in der Praxis untypisch sind. Die nachfolgende Abbildung 151 zeigt den Verlauf der Spülstrahlleistungsdichte in Abhängigkeit der Anzahl der Düseneinsätze.

Dabei zeigt sich erwartungsgemäß folgender Zusammenhang: Je größer die Anzahl der Düseneinsätze ist, desto weiter fällt der Wert der Spülstrahlleistungsdichte bei gleichem Durchfluss ab, da die Austrittsfläche größer wird.

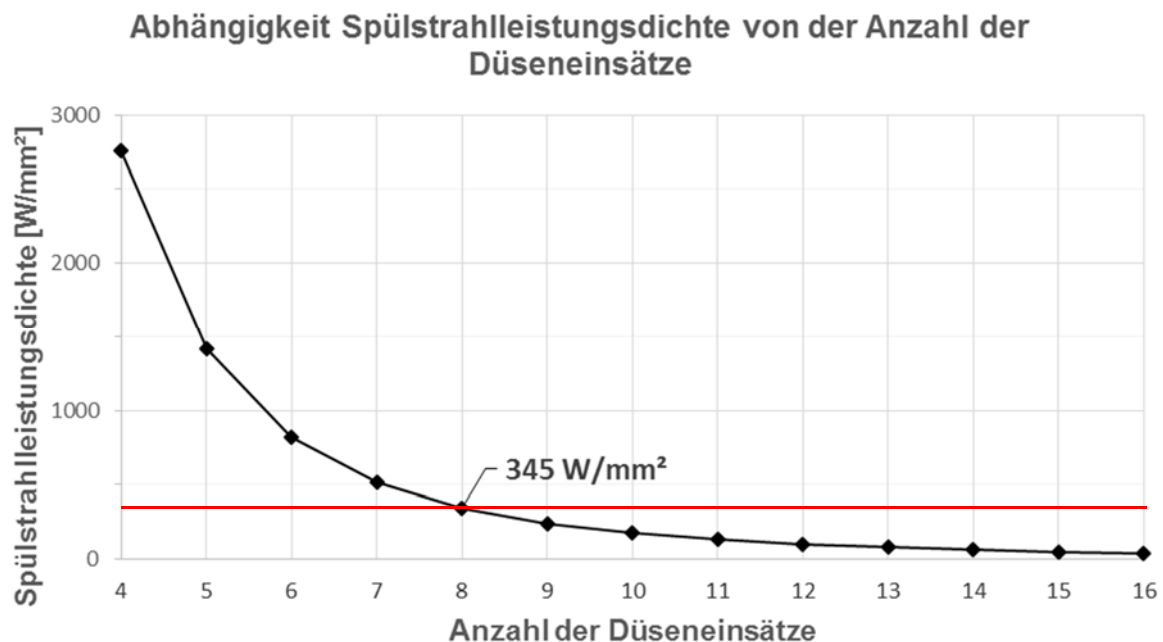


Abbildung 151: Spülstrahlleistungsdichte in Abhängigkeit der Anzahl der Düseneinsätze, Beispiel IKT-Düse

6.5.3.4.4 Durchmesser der Düseneinsätze

Ein ebenfalls wichtiger Parameter mit Einfluss auf die Spülstrahlleistungsdichte ist der Durchmesser der Düseneinsätze. Für die Bewertung der Auswirkungen werden zunächst die folgenden Parameter eingestellt, um anschließend mit einer Variation der Öffnungsweite der Düseneinsätze den Einfluss dieser darzustellen:

- Durchfluss $Q = 262,609 \text{ l/min}$,
- Abstrahlwinkel α der Düseneinsätze = 30° ,
- Anzahl der Düseneinsätze = 8
- Durchmesser der Düseneinsätze $d = 2,5 \text{ mm}$.

Bei diesen Werten wird der Grenzwert der Spülstrahlleistungsdichte von 345 W/mm^2 erreicht. Da der Bohrungsdurchmesser der in der Praxis verwendeten Düseneinsätze für runde Strahlen zwischen $2,0 \text{ mm}$ und $3,1 \text{ mm}$ liegt, wird der Durchmesser in diesem Bereich variiert. Die übrigen Parameter bleiben unverändert. Abbildung 152 zeigt den Wert der Spülstrahlleistungsdichte in Abhängigkeit des Durchmessers der Düseneinsätze.

Erwartungsgemäß zeigt sich, dass mit fallendem Durchmesser der Düseneinsätze die Spülstrahlleistungsdichte stark ansteigt. Je größer der Durchmesser gewählt wird, desto weiter fällt die Spülstrahlleistungsdichte auf sehr geringe Werte ab. Für die

Werte der IKT-Referenzdüse steigt die Spülstrahlleistungsdichte bei einer Durchmessererringerung von 2,5mm auf 2,3mm um 64 % an. Eine Durchmesseränderung von 0,1 mm hat, je kleiner der Durchmesser gewählt wird, einen immer größer werdenden Einfluss auf die Spülstrahlleistungsdichte.

Dieser Zusammenhang macht besonders deutlich, wie wichtig intakte Düseneinsätze für eine schonende Kanalreinigung sind. Bei starkem Verschleiß kann unter Umständen die zur Reinigung nötige Energie nicht mehr aufgebracht werden.

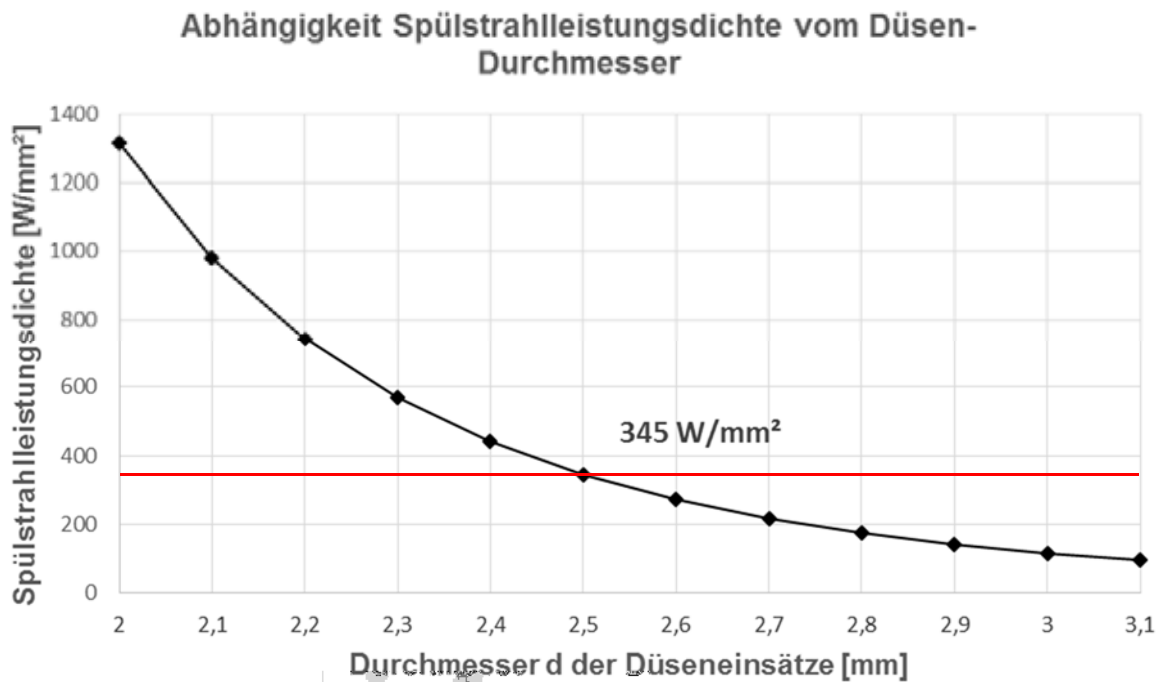


Abbildung 152: Spülstrahlleistungsdichte in Abhängigkeit des Düsendurchmessers

6.5.3.4.5 Abstrahlwinkel der Düseneinsätze

Die Auswirkung des Abstrahlwinkels auf die Spülstrahlleistungsdichte wird in diesem Abschnitt erläutert. Wie auch bei den vorherigen Parametern wird mit den Eingangswerten der IKT-Referenzdüse der Grenzwert für die Spülstrahlleistungsdichte eingestellt. Anschließend wird nur der Abstrahlwinkel der Düseneinsätze variiert. Je nach Reinigungsaufgabe sind in der Praxis flache Abstrahlwinkel zwischen 6 – 15 Grad oder steile Abstrahlwinkel zwischen 15-35 Grad anzutreffen. Für die Parameterstudie wurden vier verschiedene Düsen, die den Grenzwert der Spülstrahlleistungsdichte mit einem Winkel von 15, 20, 25 und 30° erreichen, gewählt. In Abbildung 153 ist die Spülstrahlleistungsdichte in Abhängigkeit der Abstrahlwinkel der Düseneinsätze bei vier verschiedenen Düsen dargestellt. Es zeigt sich ein stark ansteigender Verlauf, so wie er in diesem Winkelbereich aufgrund der Sinusfunktion in der Bestimmungsgleichung für D_j zu erwarten ist (vgl. Abschnitt 4.4.3).

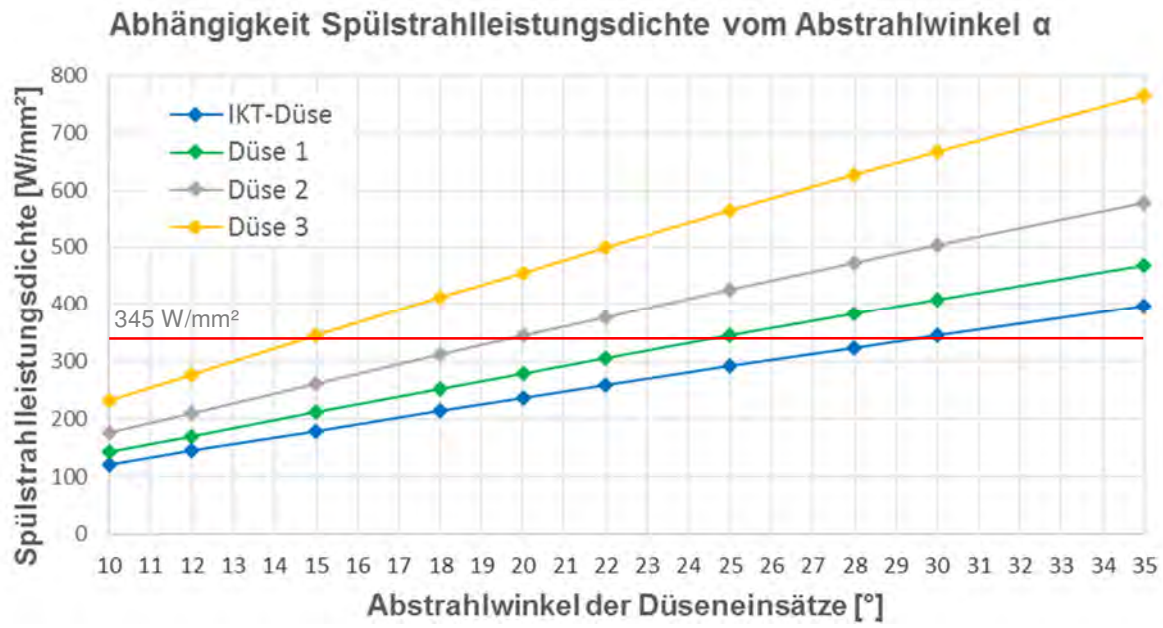


Abbildung 153: Spülstrahlleistungsdichte in Abhängigkeit des Abstrahlw. der Düseneinsätze

6.5.3.5 Prüfung: Vakuumpumpe

Die Überprüfung der Leistungsfähigkeit von Vakuumpumpen von Hochdruckspül- und Saugfahrzeugen unterliegt derzeit keiner Normung. Dementsprechend liegen in der Praxis kaum Kenntnisse über Leistungs- und Grenzwerte vor.

Da es sich bei der Vakuumpumpe um eine der wichtigsten Komponenten auf einem HD-Reinigungsfahrzeug handelt, wurde ausgehend von den Erfahrungen der Ist-Analyse (Abschnitt 6.5.1) ein erstes Prüfkonzept entwickelt. In der Ist-Analyse wurden drei Fahrzeuge einer Leistungsüberprüfung unterzogen. Die Zeitdauern für das Entleeren der Behälter aus 4,5m Tiefe lagen bei 79 und 110 Sekunden. Mit dem verwendeten Prüfverfahren ließen sich zwar Fahrzeugleistungen direkt miteinander vergleichen. Ein Abgleich mit den Herstellerwerten war allerdings nicht möglich, da seitens der Hersteller keine Angaben zum Prüfablauf und den Prüfbedingungen gemacht werden. Allerdings wurde durch die Hersteller darauf hingewiesen, dass die Vakuumpumpen nicht für das Saugen trockenen Räumguts ausgelegt sind, sondern ihre volle Leistung nur bei einem Feststoff-Flüssigkeits-Gemisch entfalten können. Vor diesem Hintergrund wurde ein neues Prüfverfahren entwickelt, um zunächst Leistungswerte in m³/h zu erhalten, die in der Größenordnung der Herstellerangaben liegen.

6.5.3.5.1 Grundsätzlicher Prüfaufbau

In dem Versuch wird das Saugvermögen der Vakuumpumpe mit Hilfe einer Staudrucksonde (vgl. Abschnitt 4.4.4) gemessen. Dazu wird ein 5 m langes Kunststoffrohr DN 250 an den Saugschlauch des Fahrzeugs angeschlossen. Mit dieser Rohrlänge wird ein laminares Strömungsverhältnis für die Messung gewährleistet (Abbildung 154). In die Oberseite des Kunststoffrohres wird eine Einführöffnung gebohrt, um die Staudrucksonde in ihrer Position zu fixieren. Der Abstand vom offenen Rohrende muss nach Angabe des Sondenherstellers größer als $L = 10 \cdot DN$ sein. Anschließend wurde bei laufender Vakuumpumpe die Luftgeschwindigkeit [m/s] im Kunststoffrohr gemessen (Abbildung 155). Die Messung erfolgt in der Rohrachse im Bereich der größten Strömungsgeschwindigkeit (Abbildung 156).



Abbildung 154: Prüfaufbau Saugleistungsmessung



Abbildung 155: Messprotokollierung

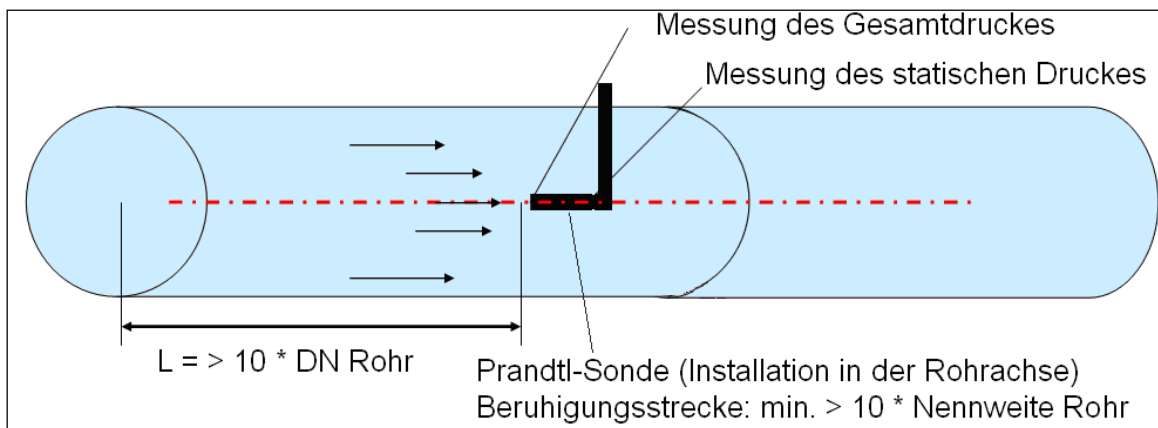


Abbildung 156: Versuchsaufbau Staudrucksonde

6.5.3.5.2 Vorprüfungen

Als Plausibilitätskontrolle wurden zunächst drei unterschiedliche Fahrzeuge überprüft. Die Messergebnisse sind in Tabelle 59 zusammengestellt. Die gemessenen Werte konnten die Herstellerangaben zur maximalen Leistungsfähigkeit der Vakuumpumpen von 2500 m³/h nicht bestätigen. Es wurden lediglich Werte um 500 m³/h gemessen.

Tabelle 59: Versuchsergebnisse Volumenstrommessung

	Drehzahl [1/min]	Luftstromgeschwindigkeit [m/s]	Saugvermögen [m ³ /h]
Fahrzeug 1			
Standgas	800	2	353,4
Volllast	1280	2,7	477,2
Fahrzeug 2			
Standgas	610	0	0
Volllast	1500	2,7	421,6
Fahrzeug 3			
Standgas	500	0,5	78,1
Volllast	1350	3,2	500

6.5.3.5.3 Optimierungspotenzial

Aufgrund der starken Unterschiede zwischen Herstellerangaben und Messwerten wurden die Versuche weiter modifiziert, vor allem mit Blick auf den Einfluss der Rohrlänge, des Rohrdurchmessers sowie des Einflusses von Wasser beim Saugen.

Im Rahmen einer Recherche wurden zunächst Hersteller von Vakuumpumpen für Hochdruckspül- und Saugfahrzeuge kontaktiert und befragt (vgl. Tabelle 48). Dabei standen folgende Fragen im Vordergrund:

- Wie werden die Vakuumpumpen von den Herstellern getestet?
- Welche Prüfprogramme bzw. -aufbauten werden verwendet?
- Welche Normen regeln die Abnahmeprüfung?

Im Rahmen der Herstellerbefragung wurde deutlich, dass die Endabnahme der Vakuumpumpen werksinternen Laborprüfungen unterliegt. Bei diesen Prüfungen wird der maximale Volumenstrom in m³/h gemessen. Der genaue Prüfaufbau und -ablauf konnte aufgrund von Betriebsgeheimnissen nicht ermittelt werden. Auch die Begleitung einer Prüfung wurde nicht gestattet. Allerdings verwiesen die Hersteller immer wieder auf die DIN 28426 (Vakuumtechnik; Abnahmeregeln). Diese Norm bezieht sich allein auf die (Luft-)Saugleistung der Vakuumpumpe, nicht aber auf die typischen Leistungsanforderungen für ein Saugfahrzeug im Kanalbetrieb (Flüssigkeits-Feststoff-Luft-Gemische). Vor diesem Hintergrund wurde das Prüfverfahren weiterentwickelt.

6.5.3.5.4 Weiterentwicklung Prüfaufbau

Für das neu entwickelte Prüfverfahren wird ein Kunststoffrohr DN150 verwendet, da bei kleineren Rohrdurchmessern größere Strömungsgeschwindigkeiten erreicht werden können. Dadurch gelangt man in Geschwindigkeitsbereiche, die vom zur Verfügung stehenden Anemometer sehr genau gemessen werden können. Dabei gilt grundsätzlich: je höher die zu messende Geschwindigkeit, desto geringer die Messabweichungen des Anemometers. Zur weiteren Erhöhung der Strömungsgeschwindigkeit im Rohr wird Wasser in den Saugzulauf eingebracht. Vakuumpumpen sind für das Saugen von Räumgut konzipiert und erreichen ihre maximale Leistung nur unter Zugabe einer bestimmten Wassermenge. Um einen Wassereintrag in das Kunststoffrohr zu ermöglichen, ohne die Luftgeschwindigkeitsmessung des Anemometers zu beeinflussen, wird an ein Y-Rohr DN125 eine Wasserzufuhröffnung mit Schlauchanbindung installiert. Dazu wird der seitliche Rohranschluss abgedichtet und eine Öffnung in die Mitte der Abdichtung gebohrt. An diese Öffnung wird ein Schlauch angeschlossen und abgedichtet. Über diese Vorrichtung kann wie in Abbildung 157 (1) dargestellt die Wasserzugabe erfolgen.



Abbildung 157: Anschluss für Wasserzugabe

Abbildung 158: Prüfeinrichtung mit 2m Kunststoffrohr



Abbildung 159: Verbindung mit Saugschlauch

Das zweite Ende des Y-Rohres wird an das Reduzierstück (2) (DN125 auf DN150) angeschlossen. In dieses wird anschließend ein 2 m langes Kunststoffrohr eingeschoben. In einer Entfernung von $DN_{\text{Kunststoffrohr}} * 10$ vom offenem Rohrende wird das Anemometer angeschlossen. Mit diesem Abstand kann sich bis zum Messpunkt ein laminares Strömungsprofil einstellen (Abbildung 158). Das andere Ende des Y-Rohres (3) wird mit dem Saugschlauch des Hochdruckspülfahrzeugs verbunden und abgedichtet (Abbildung 159).

6.5.3.5.5 Prüfungen

Zunächst wird die Strömungsgeschwindigkeit ohne Wasserzugabe bei Vollast der Vakuumpumpe gemessen. Anschließend erfolgt die Messung mit Wasserzugabe. Um die Ergebnisse weiter abzusichern, wurde die Länge der Beruhigungsstrecke zunächst auf 4 m und anschließend auf 5 m vergrößert (Abbildung 160 und Abbildung 161). Insgesamt wurden die Vakuumpumpen von drei HD-Spülfahrzeugen geprüft.



Abbildung 160: Prüfung der Vakuumpumpe, Beruhigungsstrecke 4m



Abbildung 161: Prüfung der Vakuumpumpe, Beruhigungsstrecke 5m

Während der Messungen wurde das offene Rohrende angehoben, um den Einfluss der Neigung und der Öffnungsumgebung zu ermitteln. Messbare Veränderungen in den Ergebnissen ließen sich allerdings nicht feststellen.

Durch Verschiebung der Sonde wurde die Strömungsgeschwindigkeit an drei, über den Rohrquerschnitt verteilten Punkten gemessen (unten, mittig, oben). Mit den so erzielten Messwerten sollte für das Rohr ein Geschwindigkeitsprofil dargestellt werden. Da allerdings Schwankungen und Messabweichungen von ca. 0,5 m/s während der Prüfung auftraten, konnten hier keine zuverlässigen Werte für das Geschwindigkeitsprofil ermittelt werden. Entsprechend wurden für die weiteren Prüfungen allein die Messergebnisse aus der Rohrachse verwendet.

6.5.3.5.6 Ergebnisse

Die Ergebnisse der im Rahmen der betriebsorientierten Untersuchungen durchgeführten Saugleistungsmessungen sind in Tabelle 60 dargestellt. Im Vergleich mit der Messabweichung des Anemometers (ca. 0,5 m/s) zeigt sich, dass die gewählte Länge der Beruhigungsstrecke einen kaum messbaren Einfluss auf die Strömungsgeschwindigkeit hat. Der Einfluss der Wasserzugabe ist deutlich höher. Bei Fahrzeug 2 zeigt sich beispielsweise ein Geschwindigkeitsunterschied von ca. 6 m/s.

Tabelle 60: Strömungsgeschwindigkeiten der Fahrzeuge in m/s

Rohrlänge	2 m	4 m	5 m	
Fahrzeug 1				
Volllast Luft	24	23	23,9	m/s
Wasserzugabe	21	21	21,6	m/s
Fahrzeug 2				
Volllast Luft	25	23	26,5	m/s
Wasserzugabe	19	18	19,5	m/s
Fahrzeug 3				
Volllast Luft	26,5	26	26,5	m/s
Wasserzugabe	24	23	24	m/s

Durch Umrechnung der Strömungsgeschwindigkeiten in einen Volumenstrom [m³/h] lassen sich die Messergebnisse mit den jeweiligen Herstellerangaben vergleichen; siehe Tabelle 61. Es zeigen sich große Unterschiede zwischen Messwerten und Herstellerangaben, deren Ursache im Rahmen der Untersuchungen nicht weiter ermittelt werden konnte. Denkbar sind z.B. Einflüsse durch einen hohen Füllstand des Fahrzeugbehälters oder aber der reine Bezug auf die Vakuumpumpenleistung nach Norm in den Herstellerangaben (s. Anmerkungen oben).

Tabelle 61: Ergebnisse des Volumenstromes in m³/h

Rohrlänge	2 m	4 m	5 m	
Fahrzeug 1 (Herstellerangabe 4063 m³/h)				
Volllast Luft	1526	1463	1520	m ³ /h
Wasserzugabe	1335	1335	1374	m ³ /h
Fahrzeug 2 (Herstellerangabe 1890 m³/h)				
Volllast	1590	1463	1685	m ³ /h
Wasserzugabe	1208	1145	1240	m ³ /h
Fahrzeug 3 (Herstellerangabe 2075 m³/h)				
Volllast	1685	1654	1685	m ³ /h
Wasserzugabe	1526	1463	1526	m ³ /h
$Q = A \cdot v$ [m ³ /h] $v =$ gemessene Geschwindigkeit [m/s] $A =$ Querschnittsfläche Rohr [m ²]				

Insgesamt lässt sich feststellen, dass die gemessenen Strömungsgeschwindigkeiten durch Wasserzugabe erkennbar abfallen. Die Herstellerangaben ließen sich in keinem der durchgeführten Versuche erreichen, was vermutlich auf unterschiedliche Bezugsgrößen (Vakuumpumpen-Leistung (Luft) bzw. Fahrzeug-Leistung (Räumgut)) zurückzuführen ist. Auch der Füllstand im Fahrzeugbehälter könnte laut Herstellerangaben einen Einfluss auf die Messergebnisse haben.

6.5.3.6 Prüfung: Lärm

6.5.3.6.1 Vorprüfungen

Ein weiterer wichtiger Prüfparameter ist der durch das HD-Spülfahrzeug während der Kanalreinigung erzeugte Lärm. Das Prüfverfahren soll die Lärmemissionen quantifizieren und so einen Vergleich mit Grenzwerten ermöglichen.



Abbildung 162: Lärmmessung

In der Prüfung werden die Lärmquellen am Fahrzeug unter erhöhter Belastung, d.h. während des Spülvorgangs, betrachtet. Die Messung findet im Zuge der allgemeinen Leistungsüberprüfung des HD-Spülfahrzeuges, d.h. während der Druck- und Durchflussmessung, statt. Eingesetzt wird ein handelsübliches Lärmmessgerät; die Messwerte [dB] werden derzeit für die jeweilige Motordrehzahl bzw. Pumpenleistung direkt am Bedienstand im hinteren Teil des Fahrzeugs erfasst (Abbildung 162). Mit dieser Messmethode kann allerdings nur ein erster grober Eindruck über die auftretenden Lärmemissionen während des laufenden Betriebs gewonnen werden. Normgerechte Vergleichswerte, wie der Tages-Lärmexpositionspegel $L_{EX,8h}$, können

mit einer undefinierten Einzelmessung allerdings nicht ermittelt werden (vgl. Abschnitt 4.4.5).

6.5.3.6.2 Optimierungspotenzial

In Form einer Recherche unter Herstellern von Hochdruckspül- und Saugfahrzeugen wurden die gängigen und normativ vorgegebenen Methoden zur Prüfung der Lärmemissionen am Fahrzeug zusammengestellt. Die teilnehmenden Hersteller waren:

- Assmann GmbH,
- Kaiser AG,
- Wiedemann und Reichhard Maschinen- und Fahrzeugbau GmbH,
- Müller Umwelttechnik GmbH & Co. KG,
- Kroll Fahrzeugbau GmbH und
- Umwelttechnik Franz Janßen GmbH.

Im Rahmen der Recherche wurden im Kern die nachfolgenden Fragen thematisiert.

- Welche Normen sind maßgebend für die Prüfung von Lärmemissionen?
- Welche Messinstrumente und -einrichtungen werden verwendet?
- Welche Randbedingungen sind Voraussetzung für die Prüfung?

Im Ergebnis können folgende Aspekte festgehalten werden:

- Lärmmessungen orientieren sich in der Regel an DIN EN ISO 3744 (2011) und EU-Richtlinie Geräuschemission 2000/14
- Angewandtes Messverfahren: Halbkugelmessung nach DIN EN ISO 3744 (2011)
- Prüfung kann im Freien und in geschlossenen Räumen erfolgen.

Der Hersteller Müller Umwelttechnik GmbH & Co. KG stellte dem IKT für die weiteren Untersuchungen eine Protokollvorlage zur Verfügung, aus der die grundsätzliche Vorgehensweise bei einer Lärmmessung hervorgeht. Insgesamt wurde durch die Recherche deutlich, dass Netzbetreiber und private Kunden in der Regel keine besonderen Anforderungen an maximale Lärmemissionen stellen und damit auch das herstellerseitige Interesse an einer Optimierung gering ist. Allerdings besteht gemäß Artikel 13 der EU-Richtlinie Geräuschemission 2000/14 eine Kennzeichnungspflicht für Hochdruckspül- und Saugfahrzeuge. Demnach greifen die Anforderungen der Straßenverkehrszulassungsverordnung (StVO) und ein Fahr-/Betriebsgeräusch-grenzwert von 84 dB(A) darf nicht überschritten werden.

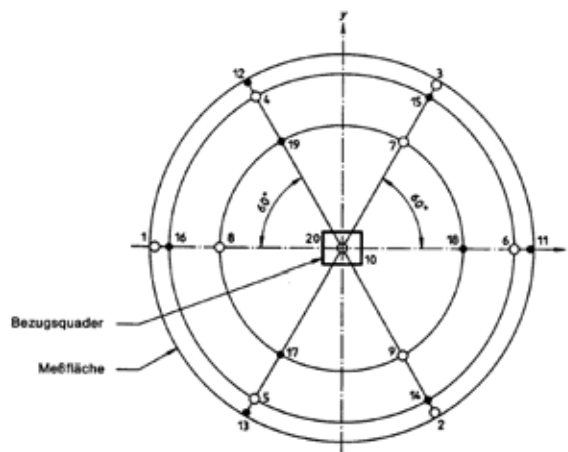
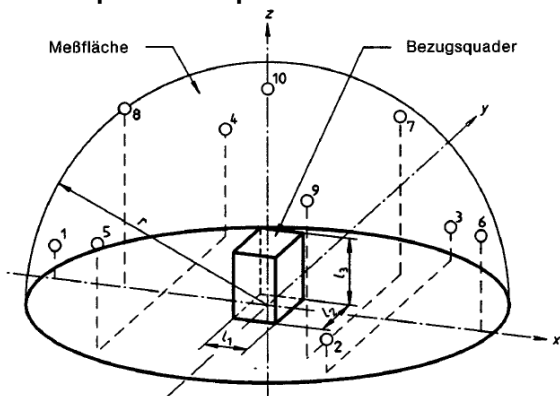
In den folgenden Abschnitten werden Prüfaufbau, Durchführung der Messung sowie Ergebnisse der durchgeführten Prüfungen dargestellt und erläutert.

6.5.3.6.3 Prüfaufbau

Für eine Lärmmessung gemäß DIN EN ISO 3744 (2011) müssen bis zu 20 Mikrofonpositionen (Messpunkte) halbkugelförmig um das Fahrzeug herum angeordnet werden (Abbildung 163, Abbildung 164, Abbildung 165). Der dabei von der Fahrzeugmitte aus einzuhaltende Radius ist von der Länge des zu prüfenden Fahrzeugs abhängig.

Bis zu einer Fahrzeuglänge von 6m ist ein Radius $r = 10\text{m}$ zu wählen. Darüber liegende Fahrzeuglängen erfordern einen Radius $r = 16\text{m}$.

○ **Hauptmikrofonpositionen**



- Hauptmikrofonpositionen
- zusätzliche Mikrofonpositionen

Abbildung 163: Halbkugelmessverfahren gemäß DIN 3744

Abbildung 164: Halbkugelmessverfahren (Aufsicht) gemäß DIN 3744

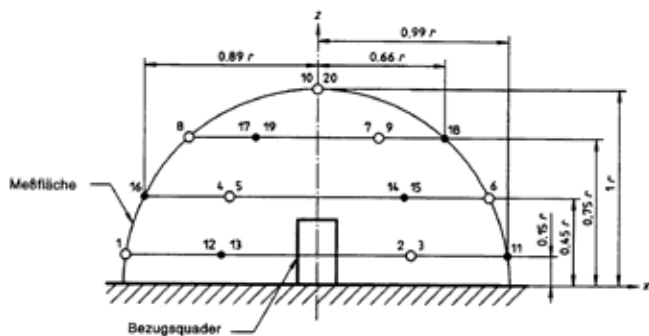


Abbildung 165: Halbkugelmessverfahren (Ansicht) gemäß DIN 3744

6.5.3.6.4 Durchführung

Für die Prüfung sind folgende Randbedingungen gemäß Richtlinie Geräuschemission 2000/14 einzustellen:

- Messdauer je Messung 30 sec.,
- Antriebsaggregat und Nebenaggregat in Betrieb,
- Aggregate auf Betriebstemperatur,
- max. Betriebsdrehzahl der Pumpen,
- max. Betriebsdruck der HD-Pumpe,
- Saugaggregat bei atmosphärischen Druck messen (0 % Vakuum),
- Geräusche des Saug- bzw. Spülvorganges dürfen die Messergebnisse nicht beeinflussen.

Die in den Vorprüfungen ermittelten Lärmpegel (Einzelpunktmessung) stimmten nicht mit den Herstellerangaben überein. In Anlehnung an das Norm-Modell wurde die Anzahl der Messpunkte nun schrittweise erhöht, bis sich Ergebnisse im Bereich der Herstellerangaben einstellten. Dadurch sollten der hohe Aufwand einer Halbkugelmessung gemäß DIN 3744 bzw. Richtlinie Geräuschemission 2000/14 vermieden, aber dennoch vergleichbare Ergebnisse erzielt werden.

Im Rahmen der Leistungsüberprüfung von Hochdruckspül und –saugfahrzeugen am 26. August 2014 in Gelsenkirchen wurden die entsprechenden Lärm-Messungen an vier Fahrzeugen parallel zur Prüfung „Druck und Durchfluß“ durchgeführt. Für die eingesetzten Reinigungsdüsen wurde jeweils eine eigene Messreihe „Lärm“ gefahren. Eine Geräuschabtrennung der Düsen vom Prüfraum war allerdings nicht möglich.

Die Fahrzeuglänge der vier überprüften Fahrzeuge lag unterhalb von 6m. Daher wurde ein Radius von 10m für die Messungen festgelegt. In diesem Radius wurden für den Versuch vier Messpunkte gewählt. Außerdem wurde ein weiterer Punkt mit einem Meter Abstand zum Fahrzeug gewählt. Die Anordnung der Messpunkte ist in Abbildung 166 als An- und Aufsicht dargestellt.

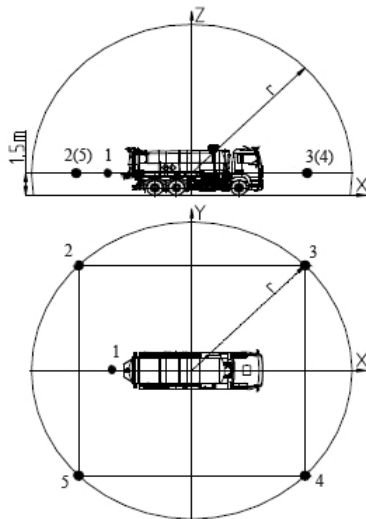


Abbildung 166: Anordnung der Messpunkte (An- und Aufsicht)

Während der Lärmpegelmessung wurde das Schallpegelmessgerät in einer Höhe von 1,5m über dem Boden zum Fahrzeug ausgerichtet; die einzelnen Messpositionen wurden für jeweils 30 Sekunden gehalten (Abbildung 167, Abbildung 168). Die in diesem Zeitraum ermittelten Maximalwerte des Lärmpegels in dB(A) wurden anschließend protokolliert.



Abbildung 167: Fahrzeug 1, Messpunkt 1



Abbildung 168: Fahrzeug 2, Messpunkt 2

6.5.3.6.5 Ergebnisse und Auswertung

Die Ergebnisse der Lärmpegelmessungen für die vier hier geprüften Fahrzeuge sind in Tabelle 62 dargestellt.

Tabelle 62: Ergebnisse der Lärmmessung

Fahrzeug 1						
Position	1	2	3	4	5	
IKT Düse	84	83	81	82	83	dB(A)
Düse 1	82	81	81	80	82	dB(A)
Fahrzeug 2						
Position	1	2	3	4	5	
IKT Düse	81	82	83	83	83	dB(A)
Düse 1	79	77	80	81	82	dB(A)
Fahrzeug 3						
Position	1	2	3	4	5	
IKT Düse	81	80	77	80	83	dB(A)
Düse 1	77	78	77	80	82	dB(A)
Düse 2	78	80	80	81	80	dB(A)
Fahrzeug 4						
Position	1	2	3	4	5	
IKT Düse	76	76	76	80	77	dB(A)
Düse 1	74	75	77	79	80	dB(A)
Düse 2	75	74	75	76	77	dB(A)

Folgende Ergebnisse können festgehalten werden:

- Geräusche der Düsen beeinflussen die Messung.
- Bei den durchgeführten Versuchen überschritt kein Fahrzeugmesswert den Schallpegelgrenzwert von 84 dB(A).
- Die Messwerte konnten bei maximaler Betriebsdrehzahl- und maximalem Pumpendruck ermittelt werden.

Für einzelne Fahrzeuge lagen Herstellerangaben vor, die allerdings zum Teil erheblich von den dargestellten Messdaten abwichen. Insgesamt scheint die dargestellte Messung der Lärmemissionen nur zum direkten Vergleich von Fahrzeugen untereinander, nicht aber zum belastbaren Vergleich mit Grenzwerten geeignet. Schwankungen der Messwerte zwischen den einzelnen Messstellen lassen sich möglicherweise zurückführen auf

- Fahrzeugaufbau (in welchem Bereich und auf welcher Seite sind die Pumpen und Motoren verbaut),
- maximale Betriebsdrehzahl der Pumpe und
- Fahrzeugisolierung.

Parallel zur Lärmmessung mit dem Schallpegelmessgerät wurde eine von dem Fahrzeughersteller Assmann GmbH zur Eigenkontrolle ebenfalls eingesetzte Handy-App („Hörtest“) versuchsweise genutzt. Handy und Pegelmessgerät wurden zum Vergleich der Messergebnisse bei jeder einzelnen Messung nebeneinander gehalten (Abbildung 169 und Abbildung 170).



Abbildung 169: Vergleich Messverfahren



Abbildung 170: Vergleich Messverfahren Fahrzeug 1, Messpunkt 1

Ein Vergleich der Messwerte zeigte deutliche Abweichungen. Der mit der Handy-App gemessenen Lärmpegel lag über 10 dB(A) niedriger als der des Schallpegelmessgeräts und scheint damit wenig aussagekräftig.

Um die Lärmmessung als weitere Prüfung in die Leistungsüberprüfung von HD-Spülfahrzeugen zu integrieren, sollte die Prüfung somit an mehreren Messpunkten erfolgen. Außerdem sollte sich die Reinigungsdüse während der Messung in der Haltung befinden, wodurch allerdings eine gemeinsame Prüfung mit der Druck- und Durchflussmessung ausgeschlossen ist.

Im Gespräch mit den an der Prüfung beteiligten Netzbetreibern und im Rahmen der Herstellergespräche konnte festgehalten werden, dass für eine umfangreiche Überprüfung der Lärmemissionen nach Norm gerade bei neueren Fahrzeugen kein Bedarf besteht. Eine Messung mit fünf Messpunkten, wie Sie hier im Rahmen der betriebsorientierten Untersuchungen entwickelt wurde, wird allerdings für eine erste Orientierung als sinnvoll angesehen. Zuverlässige Messergebnisse lassen sich aber letztlich nur bei einer Messung nach den Bedingungen der DIN 3744 erwarten.

6.6 Analyse typischer Schwachstellen im Kanalnetz (Störfall-Analyse)

6.6.1 Ist-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 6.400 Störfälle von 28 Abwasserbetrieben bei der Betreiber-Hotline gemeldet. Abbildung 171 bis Abbildung 176 zeigen exemplarisch einige Fremdkörper, die bereits im Zuge einer einzelnen turnusmäßigen Reinigung entdeckt wurden und zu Störfällen hätten führen können. Im vorliegenden Fall wurde festgestellt, dass es sich um Bauschutt aus Arbeiten an Straßen und Kanälen handelte.



Abbildung 171: Eisenstange (Ostmann, 2011)



Abbildung 172: KG-Rohre (Ostmann, 2011)



Abbildung 173: Absperrblase (Ostmann, 2011)



Abbildung 174: Holzbalken (Ostmann, 2011)



Abbildung 175: Steine aus dem Kanal



Abbildung 176: loses Bruchstück

Auswertungen der Störfalldatenerhebung zeigen, dass bei den gemeldeten Störfällen auch viele Anlässe dabei sind, die keinen direkten Einfluss auf die Entstehung von Ablagerungen haben. Hier sind von den Abwasserbetrieben z.B. Probleme mit klappernden Kanaldeckeln, Geruchsbelästigungen, Rattenbefall sowie Ausblasungen von Geruchsverschlüssen genannt worden. Hierzu zählen auch Einzelfallmeldungen wie

Ölunfälle etc., die im Rahmen der Auswertung in der Kategorie „Sonstiges“ zusammengefasst wurden (vgl. Abbildung 177).

Bei den gemeldeten Störfällen mit Einfluss auf die Entstehung von Ablagerungen weisen Versackungen und Versenkungen einen Anteil von gut 7% auf. Verstopfungen im privaten bzw. öffentlichen Bereich erreichten annähernd gleiche Quoten bei den Nennungen im Bereich von 11 bis 12 % der Fälle. Diese drei Problemsituationen decken in der Praxis nahezu ein Drittel des gesamten Störfallaufkommens ab.

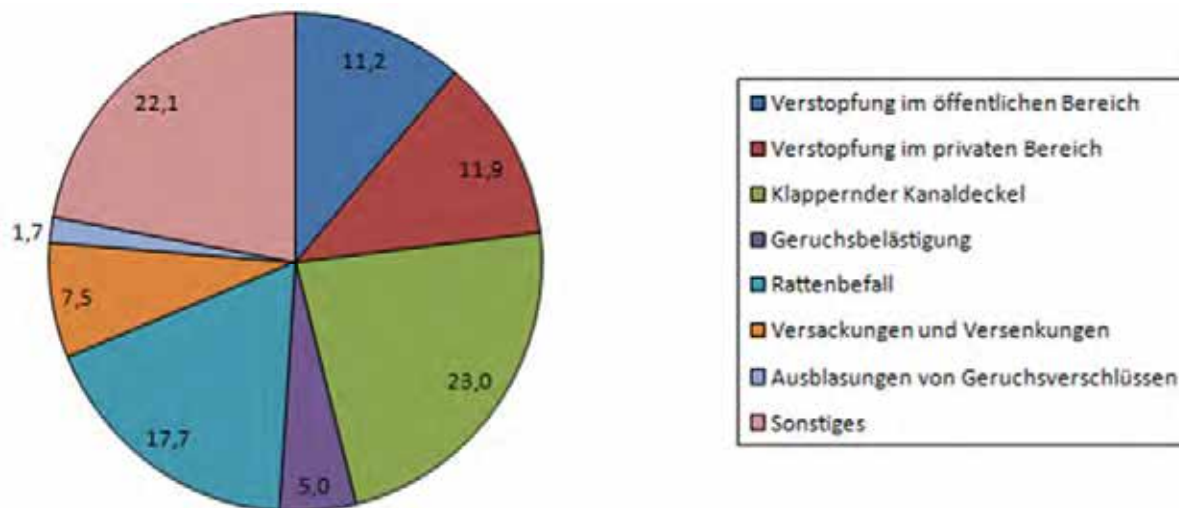


Abbildung 177: Übersicht über Störfälle im Kanalbetrieb

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.

Als **Ergebnis der Ist-Analyse** lassen sich folgende Erkenntnisse und Empfehlungen zur Bewertung und Umsetzung des Moduls „Analyse typischer Schwachstellen im Kanalnetz“ zusammenfassen:

- In der Praxis wird bisher meist auf eine **Protokollierung und Dokumentation der Störfälle** verzichtet. 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.

6.6.2 Umsetzungsschwerpunkte

Um die Umsetzung bei der Erfassung und Dokumentation von Störfällen zu erfassen, wurden insgesamt sechs Netzbetreiber in Experteninterviews befragt:

- Technische Betriebe Velbert
- Stadt Bottrop
- KasselWasser
- Stadt Herne
- Münchner Stadtentwässerung
- Stadtentwässerung Stuttgart

Bei allen Betreibern wurden jeweils die grundlegende Vorgehensweise und der Umgang im Störfall und Beschwerdemanagement herausgearbeitet und dargestellt.

Insgesamt wird deutlich, dass in der Praxis jeder Netzbetreiber sehr individuelle Wege der Störfallerfassung und –bearbeitung verfolgt. Die Dokumentation und Protokollierung der Störfälle wird dabei gar nicht oder nur vereinzelt durchgeführt. Bei den Netzbetreibern, die Störfallmeldungen dokumentieren, werden nur selten die Ursachen des Störfalls aufgenommen oder hinterfragt. Daher lassen sich Schwachstellen im Kanalnetz schwer oder gar nicht identifizieren.

6.6.2.1 Technische Betriebe Velbert

Bei den Technischen Betrieben Velbert werden die Störfälle telefonisch erfasst. Die Erfassung erfolgt hier auf zwei unterschiedlichen Wegen.

Der erste Weg nach telefonischem Störfalleingang ist die Erstellung von eTickets (elektronisches Ticket) mit Informationen zur Art, Ort und Zeitpunkt des Störfalls. Das eTicket wird anschließend der entsprechenden Abteilung übermittelt. Diese veranlasst dann die Beseitigung des Störfalls und meldet nach erfolgreicher Arbeit die Fertigstellung über ein eTicket zurück. Es folgt die Archivierung des eTicket im Ticketmanagementsystem mit dem Hinweis „bearbeitet“.

Der zweite Weg der Störfallmeldung verläuft über einen Betriebsmeldebogen. Darin werden Art, Ort und Zeitpunkt des jeweiligen Störfalls schriftlich vermerkt. Gleichzeitig werden die Schadensursache, sowie mögliche Verbesserungsvorschläge mit aufgeführt. Der Betriebsmeldebogen wird dann an die zuständige Abteilung weitergeleitet. Nach der Beseitigung des Störfalls wird der Betriebsmeldebogen in einer Excel-Datenbank erfasst und dokumentiert.

Eine detaillierte Dokumentation von Störfällen wurde aus Aufwandsgründen erst ab dem Jahr 2010 eingeführt. Daher liegen aus den vorherigen Jahren keine Daten und kein Bildmaterial zu Störfällen vor. Seit 2010 werden allerdings alle Störfälle in einer Excel-Datenbank erfasst und in Form einer Jahresgesamtübersicht festgehalten. Diese dient vor allem als Beweissicherung. Bilder zu den jeweiligen Störfällen werden aber auch weiterhin nicht dokumentiert.

6.6.2.2 Stadt Bottrop

Die Stadt Bottrop, speziell das Tiefbauamt, hat eine telefonische Störfall-Hotline eingerichtet. Die eingehenden Meldungen werden in einem sogenannten SOS-Formular erfasst. Dieses Formular wird anschließend an die zuständige Abteilung weitergeleitet. Nach der Beseitigung des Störfalls gibt die entsprechende Abteilung eine Rückmeldung an das Tiefbauamt.

Eine detaillierte Dokumentation der Störfälle findet in Bottrop aus Aufwandsgründen nicht statt. Daher liegt kein Bildmaterial zu einzelnen Störfällen vor. Lediglich der Rattenbefall wurde über einige Jahre durch das Ordnungsamt mehrmals im Jahr

dokumentiert. Eine Spezialfirma führte dazu im Kanalnetz von Bottrop eine bedarfsorientierte Rattenbekämpfung durch. Dazu wurden im Radius von 100m um die betroffenen Schächte herum gezielt Köder ausgelegt und kontrolliert. Aus Kostengründen wurde die bedarfsorientierte Rattenbekämpfung wieder eingestellt.

6.6.2.3 KasselWasser

In Kassel werden Störfälle seit Anfang 2014 telefonisch erfasst und in einer Access-Datenbank abgelegt. Dabei werden Art, Ort und Zeitpunkt des Auftretens des Störfalls dokumentiert. Gleichzeitig wird der Störfall an die zuständige Abteilung weitergeleitet. Nach der Beseitigung des Störfalls geben die Kanalreiniger eine Rückmeldung an den Sachbearbeiter, welcher die Beseitigung in der Access-Datenbank vermerkt. Zukünftig sollen Störfälle in einem Störfallmanagementmodul im Betriebsführungssystem aufgenommen werden.

Eine detaillierte Dokumentation der Störfälle fand in Kassel vor 2014 nicht statt. Daher liegt kein Bildmaterial vor. Auch nach Einführung der Access-Datenbank findet aus Kostengründen keine Fotodokumentation statt.

6.6.2.4 Stadt Herne

Auch die Stadt Herne erfasst Störfälle telefonisch und dokumentiert die Meldung anhand eines einheitlichen Formulars. Anschließend werden die aufgenommenen Störfälle vom Betriebspersonal bearbeitet. Nach der Beseitigung eines Störfalls erfolgt eine Rückmeldung an den zuständigen Sachbearbeiter. Eine detaillierte Dokumentation der Störfälle findet in Herne aus Aufwands- und Kostengründen nicht statt. Aus diesem Grund liegt kein Bildmaterial zu Störfällen vor.

6.6.2.5 Münchner Stadtentwässerung

Die Münchner Stadtentwässerung erfasst Störfälle zurzeit überwiegend über eine Störfall-Hotline. Ein einzelner Sachbearbeiter des Kanalbetriebs trägt die Meldungen in ein einheitliches Formular ein. Es werden Art, Ort und Zeitpunkt des Störfalls dokumentiert. Anschließend wird der aufgenommene Störfall direkt vom Betriebspersonal bearbeitet. Nach erfolgreicher Beseitigung des Störfalls gibt der sogenannte „Störungsbehebungs-Service“ eine Rückmeldung an den Sachbearbeiter, welcher die Arbeiten dokumentiert.

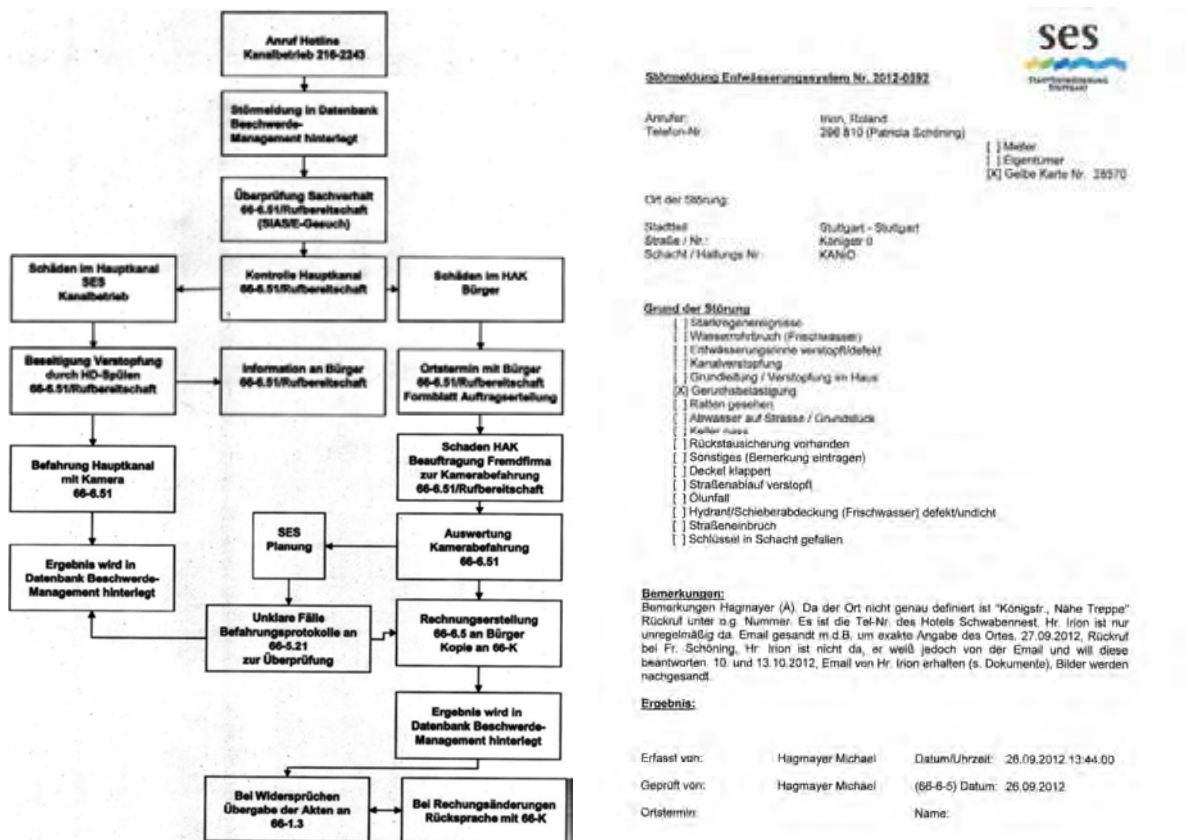
In einigen Reinigungsbezirken von München werden Störfälle zurzeit testweise über ein Formular direkt in das Betriebsführungssystem KANiO aufgenommen. Gleichzeitig besteht dabei die Möglichkeit die Meldungen mit Bilder zu versehen. Bislang liegt allerdings noch keine Bilddokumentation der Störfälle vor.

6.6.2.6 Stadt Stuttgart

In Stuttgart werden die Störfälle telefonisch über eine Hotline des Kanalbetriebs erfasst und in einer eigenen Datenbank „Beschwerdemanagement“ des Betriebsführungssystems KANiO hinterlegt. Der grundlegende Ablauf, der dabei verfolgt wird, ist in Abbildung 178 dargestellt. Art, Ort und Zeitpunkt eines jeden Störfalls werden erfasst. Zusätzlich können besondere Bemerkungen zum Störfall sowie der Name des Sachbearbeiters dokumentiert werden.

Anschließend wird die Meldung von Mitarbeitern des Kanalbetriebs bearbeitet. Dazu erfolgt zunächst eine Prüfung der Richtigkeit und Dringlichkeit. Gegebenenfalls werden zusätzlich Ortstermine mit betroffenen Bürgern vereinbart sowie weitere Maßnahmen zur Reinigung oder Inspektion eingeleitet. Reinigungsaufträge können direkt im „Beschwerdemanagement“ (KANiO) angelegt werden (Abbildung 180). An den Reinigungsauftrag können vor Ort über mobile Geräte Bilder angefügt werden (Abbildung 181). Nach Beseitigung des Störfalls wird eine Rückmeldung an das System getätigt und der Störfall in der Datenbank Beschwerdemanagement als „beseitigt“ markiert.

Mit Hilfe eines im Betriebsführungssystem integrierten Beschwerdemanagementmoduls kann die Dokumentation und Auswertung von Störfällen in Stuttgart einfach und erfolgreich erfolgen.



Störmeldung Erfassungssystem Nr. 2012-0392

ses
Stadt Stuttgart

Anrufer: Irion, Roland
 Telefon-Nr.: 290 810 (Patricia Schöning)

Mitarbeiter:
 Meier
 Eigentümer
 Gelbe Karte Nr. 38570

Ort der Störung:
 Stadtteil: Stuttgart - Stuttgart
 Straße / Nr.: Königstr. 3
 Schacht / Halteung-Nr.: KANiO

Grund der Störung

- Starkregenereignisse
- Wasserschub (Frischwasser)
- Entwässerungsrinne verstopft/Risefekt
- Kanalverstopfung
- Grundleitung / Verstopfung im Haus
- Geruchsbelastung
- Rillen gesehen
- Abwasser auf Straße / Grundstück
- Keller raus
- Rückstausicherung vorhanden
- Sonstiges (Bemerkung eintragen)
- Deckel klappert
- Straßenablauf verstopft
- Ölunfall
- Hydrant/Schieberabdeckung (Frischwasser) defekt/undicht
- Straßeneinbruch
- Schlüssel in Schacht gefallen

Bemerkungen:
 Bemerkungen Hagmayer (A) Da der Ort nicht genau definiert ist "Königstr., Nähe Treppe" Rückruf unter o.g. Nummer. Es ist die Tel-Nr. des Hotels Schwabennest. Hr. Irion ist nur unregelmäßig da. Email gesandt m.d.B. um exakte Angabe des Ortes. 27.09.2012, Rückruf bei Fr. Schöning, Hr. Irion ist nicht da, er weiß jedoch von der Email und will diese beantworten. 10. und 13.10.2012, Email von Hr. Irion erhalten (s. Dokumente), Bilder werden nachgesandt.

Ergebnis:

Erfasst von: Hagmayer Michael Datum/Uhrzeit: 26.09.2012 13:44:00
 Geprüft von: Hagmayer Michael (66-6-5) Datum: 26.09.2012
 Ortstermin: Name:

Abbildung 178: Beschwerdemanagement der Stadtentwässerung Stuttgart

Abbildung 179: Störfallerfassungsbogen der Stadtentwässerung Stuttgart

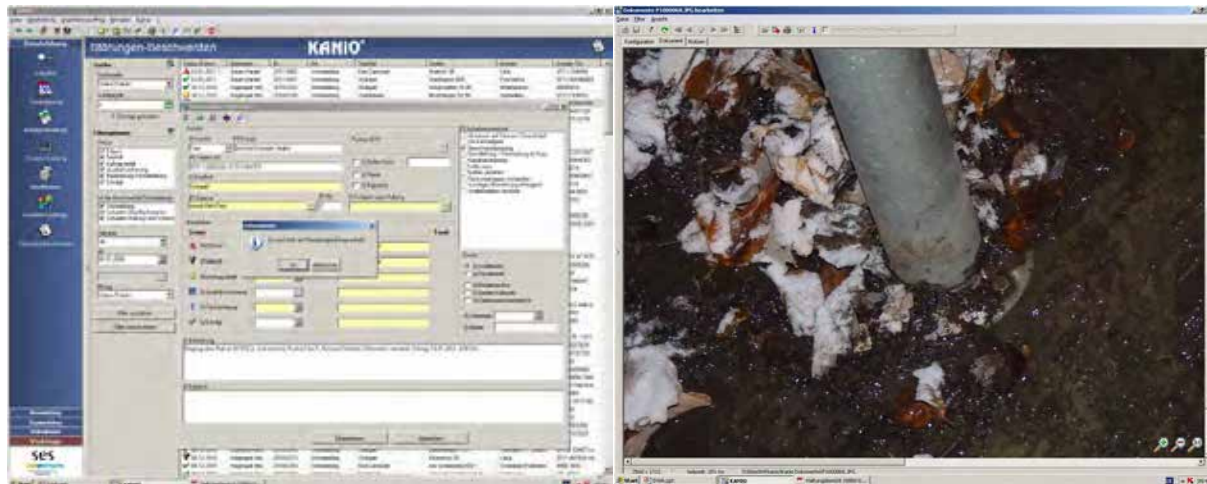


Abbildung 180: Anlegen eines Reinigungsauftrags im Beschwerdemanagementsystem

Abbildung 181: Dokumentationsmöglichkeiten im Beschwerdemodul

6.6.3 Ablaufschema Störfälle

Auf Grundlage der dargestellten Umsetzungserfahrungen wird das in Abbildung 182 dargestellte Ablaufschema für den Umgang mit Störfällen vorgeschlagen. Diese orientiert sich vor allem an der Vorgehensweise der Stadtentwässerung Stuttgart.

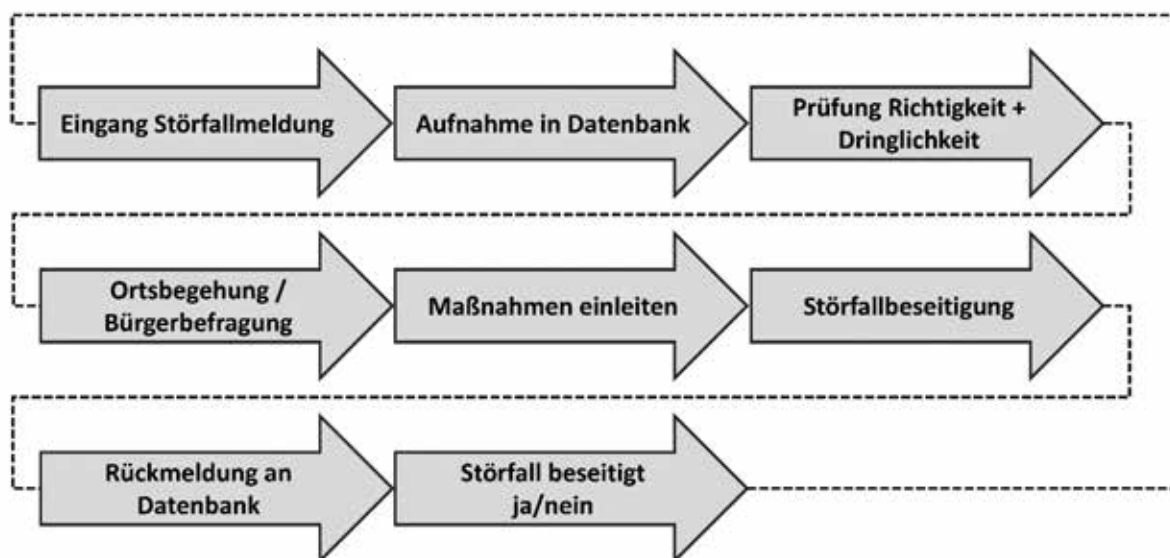


Abbildung 182: Ablaufschema Störfall- und Beschwerdemanagement

Damit sich Schwachstellen im Kanalnetz genau identifizieren lassen, sollten die Netzbetreiber Störfälle zukünftig vollständig und detailliert erfassen und dokumentieren. In der Praxis werden Störfälle häufig von betroffenen Bürgern telefonisch gemeldet. Die Mitarbeiter des Kanalbetriebs nehmen Art, Ort und Zeitpunkt des Störfalls sowie weitere Beschreibungen in die Datenbank des EDV-Systems auf. Bei der Bearbeitung des

Störfalls wird die Meldung zunächst auf Richtigkeit und Dringlichkeit überprüft und falls nötig ein Ortstermin vereinbart. Anschließend werden Maßnahmen zur Inspektion oder Reinigung eingeleitet. Reinigungsaufträge lassen sich mit dem Betriebsführungssystem einfach und eindeutig vor Ort über mobile Datenaufnahmegeräte erstellen. Besonders wichtig ist hierbei auch die Fotodokumentation der Störfälle. Nach der Beseitigung wird eine Rückmeldung an die Datenbank gegeben und der Störfall als „beseitigt“ markiert.

6.6.4 Störfallkatalog

Bisher existiert keine einheitliche Kategorisierung zur Einordnung und Beurteilung von Störfällen im Kanalnetz. Der nachfolgend dargestellte Störfallkatalog mit Schwerpunkt „Verstopfungen“ kann hier als Arbeitshilfe zur Gefährdungs- und Risikobewertung herangezogen werden. Außerdem enthält er konkrete Handlungsempfehlungen. Die Datengrundlage für diesen Störfallkatalog bilden die Meldungen im Rahmen der vom IKT eingerichteten Störfall-Hotline. Im Rahmen der Störfallrückmeldungen wurden folgende Hauptursachen für Verstopfungen im öffentlichen Bereich ermittelt:

- Wurzeleinwuchs,
- Rückstauverhältnisse, z.B. aus Ablagerungen,
- Baumaßnahmen,
- Gestürzte Schmutzfänger,
- Bauliche Mängel,
- Fremdmängel, z.B. einragende Stützen,
- Geringes Sohlgefälle,
- Illegal entsorgte Abfälle,
- Geringe Abflussverhältnisse,
- Sonstiges.

An das
 IKT - Institut für Unterirdische Infrastruktur
 Externbruch 1
 45886 Gelsenkirchen
Rückantwort
 per Fax: 0209 17806-88
 per Mail: info@ikt.de



Rückmeldebogen -Störfälle-



Störfall	Fotos vorhanden		Anzahl im Jahr		
	ja	nein	2011	2012	2013
Verstopfung im öffentlichen Bereich					
Verstopfung im privaten Bereich					
Klappender Kanaldeckel					
Geruchsbelästigung					
Rattenbefall					
Versackungen und Versenkungen					
Ausblasungen von Geruchsverschlüssen					
Sonstiges					

Kanalnetzänge: _____

Einwohnerzahl: _____

Institution: _____

Name: _____

Straße: _____

PLZ Ort: _____

Telefon: _____

E-Mail: _____

Abbildung 183: Detaillierter Störfallmeldebogen für Verstopfungen im öffentlichen Bereich

Die Auswertung der Störfalldatenerhebung für Verstopfungen im öffentlichen Bereich zeigt in Abbildung 184, dass vor allem bauliche Mängel einen Großteil der Verstopfungen verursachen (23,7 %). Mit einem Anteil von 22,5 % liegt der Störfall „Wurzeleinwuchs“ an zweiter Stelle. Den dritt- bzw. viertgrößten Anteil machen Baumaßnahmen mit 12,2 % und Rückstauverhältnisse mit 11,6 % aus. Diese vier Störfallgruppen decken in der Praxis 70 % des gesamten Störfallaufkommens mit Verstopfungen im öffentlichen Bereich ab. Weitere in der Praxis vorkommende Störfälle im öffentlichen Kanalnetz sind gestürzte Schmutzfänger, Fremdmängel (z.B. einragende Leitungen), geringes Sohlgefälle, illegal entsorgte Abfälle sowie geringe Abflussverhältnisse. Diese fünf Störfallgruppen wurden im Rahmen der Erhebungen allerdings seltener genannt.

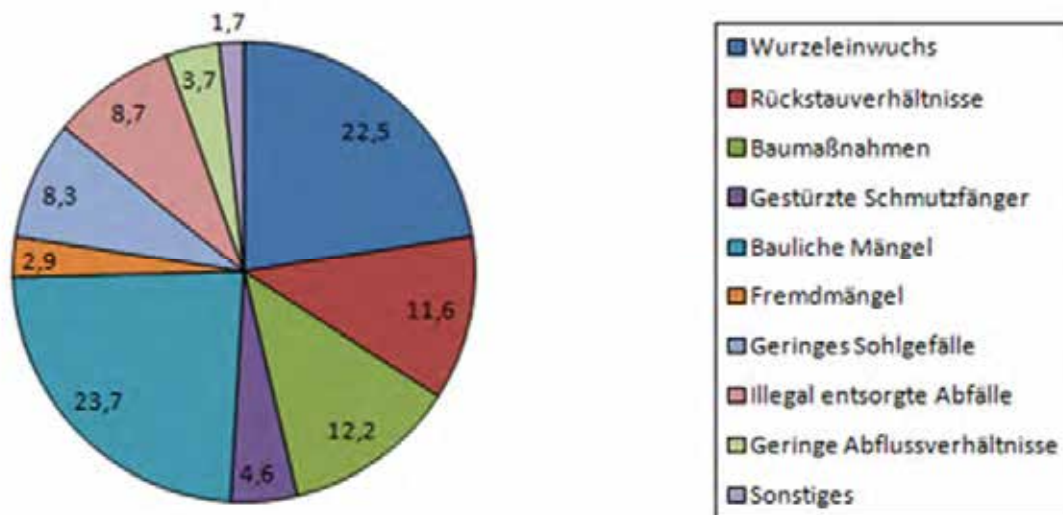


Abbildung 184: Störfälle im öffentlichen Bereich-Kategorisierung

Der nachfolgend in Tabelle 63 dargestellte Störfallkatalog stellt eine Arbeitshilfe für Netzbetreiber bei der Dokumentation und Kategorisierung von Schwachstellen im Kanalnetz dar. Inhaltlich werden dabei einzelne Störfälle zu Störfallgruppen zusammengefasst. Neben einer Ursachen- und Risikobewertung werden ebenfalls Auswirkungen auf die Standfestigkeit, Betriebssicherheit und Dichtheit angesprochen, da hierdurch auch die Dauerhaftigkeit des gesamten Bauwerks gefährdet sein kann. Besonders wichtig für die Einordnung und den weiteren Umgang mit betroffenen Netzabschnitten ist die Frage, ob es sich um ein einmaliges oder ein wiederkehrendes Ereignis handelt und ob die Beseitigung kurzfristig oder mittel- bis langfristig zu erfolgen hat.

Tabelle 63: Störfallkatalog

Wurzeleinwuchs



Abbildung 185: Wurzeleinwuchs (Backnang, 2014)

mögliche Ursachen: Eindringen von Wurzeln, Wurzelraum etc. → Baumstandorte etc.

Standicherheit: gefährdet (bei Brüchen, Rissen)

Betriebssicherheit: gefährdet (Abflusshindernis)

Dichtheit: gefährdet

Dauerhaftigkeit: gefährdet

Auftreten: wiederkehrender Störfall

Kategorie 1: kurzfristig zu beseitigender Störfall

Empfehlungen zur Beseitigung:

kurzfristig: Rotationsdüse, Kettenschleuder, Wurzelschneider, Kanalroboter, Schneidkorb, händische Entfernung; chemische Verfahren (z.B. Herbizide)

langfristig: Wurzelraum an anderer Stelle, Inliner, Abdichtung der Muffen

Rückstau



Abbildung 186: Rückstau (Vordereifel, 2014)

mögliche Ursachen: hohe Ablagerungen, verfestigte Ablagerungen, Geröll

Standicherheit: nicht gefährdet

Betriebssicherheit: gefährdet (Abflusshindernis)

Dichtheit: nicht gefährdet

Dauerhaftigkeit: nicht gefährdet

Auftreten: wiederkehrender Störfall

Kategorie 1: kurzfristig zu beseitigender Störfall

Empfehlungen zur Beseitigung:

kurzfristig: Kanalreinigung → Freispülen

langfristig: Ursachenanalyse durch Kamerabefahrung

Baumaßnahme



Abbildung 187: Bauschutt (Backnang, 2014)

mögliche Ursachen: unsachgemäße Beseitigung von Bauschutt

Standsicherheit: nicht gefährdet

Betriebssicherheit: gefährdet (Abflusshindernis)

Dichtheit: nicht gefährdet

Dauerhaftigkeit: nicht gefährdet

Auftreten: einmaliger Störfall

Kategorie 1: kurzfristig zu beseitigender Störfall

Empfehlungen zur Beseitigung:

kurzfristig:	lockere Ablagerungen: Kanalreinigung → Freispülung, verfestigte Ablagerungen: Fräsen; manuelle Reinigung
langfristig:	keine, ggf. Baumaßnahmen überwachen

Gestürzter Schmutzfänger



Abbildung 188: Gestürzter Schmutzfänger (Gladbeck, 2014)

mögliche Ursachen: defekte Schmutzfänger

Standsicherheit: nicht gefährdet

Betriebssicherheit: gefährdet (Abflusshindernis)

Dichtheit: nicht gefährdet

Dauerhaftigkeit: nicht gefährdet

Auftreten: einmaliger Störfall

Kategorie 1: kurzfristig zu beseitigender Störfall

Empfehlungen zur Beseitigung:

kurzfristig:	manuelle Entfernung
--------------	---------------------

Baulicher Mangel



mögliche Ursachen: Frost-, Material- oder Herstellungsfehler, Druckstöße, starke Korrosion, Materialermüdung, Schäden bei Bauarbeiten

Standicherheit: gefährdet (Brüche, Risse)

Betriebssicherheit: gefährdet (Abflusshindernis)

Dichtheit: gefährdet (Brüche, Risse)

Dauerhaftigkeit: gefährdet

Auftreten: einmaliger Störfall

Abbildung 189: Baulicher Mangel
(Rendsburg, 2014)

Kategorie 1: kurzfristig zu beseitigender Störfall

Empfehlungen zur Beseitigung:

kurzfristig: Freispülen und Sanierung, z.B. örtliche Reparaturverfahren

langfristig: Sanierung, z.B. Erneuerung in offener/geschlossener Bauweise

Fremdmangel



mögliche Ursachen: einragende Stützen (Hausanschlüsse)

Standicherheit: nicht gefährdet

Betriebssicherheit: gefährdet (Abflusshindernis)

Dichtheit: gefährdet (Brüche, Risse)

Dauerhaftigkeit: nicht gefährdet

Auftreten: einmaliger Störfall

Abbildung 190: Einragende Stützen
(Vordereifel, 2014)

Kategorie 1: kurzfristig zu beseitigender Störfall

Empfehlungen zur Beseitigung:

kurzfristig: Fräsen; Abdichtung; örtliche Reparaturverfahren

langfristig: keine, ggf. Kombination mit Hauptkanalsanierung

Geringes Sohlgefälle



mögliche Ursachen: Tiefpunkte, Flachstrecken oder hydraulisch ungünstige Gegebenheiten

Standicherheit: nicht gefährdet

Betriebssicherheit: gefährdet

Dichtheit: nicht gefährdet

Dauerhaftigkeit: nicht gefährdet

Auftreten: wiederkehrender Störfall

Abbildung 191: Geringes Sohlgefälle (Vordereifel, 2014)

Kategorie 2: mittelfristig zu beseitigender Störfall

Empfehlungen zur Beseitigung:

kurzfristig: Kanalreinigung, Freispülen

langfristig: Wiederherstellen Sohlgefälle in offener/geschlossener Bauweise

Unsachgemäße Einleitung



mögliche Ursachen: unsachgemäße Beseitigung von Abfall

Standicherheit: nicht gefährdet

Betriebssicherheit: gefährdet (Abflusshindernis)

Dichtheit: nicht gefährdet

Dauerhaftigkeit: nicht gefährdet

Auftreten: einmaliger Störfall

Abbildung 192: Betonreste, Papier (Herne, 2014)

Kategorie 1: kurzfristig zu beseitigender Störfall

Empfehlungen zur Beseitigung:

kurzfristig: Kanalreinigung, Freispülen, händische Entfernung

langfristig: Öffentlichkeitsarbeit, Bürgerinformation

Geringer Abfluss



Abbildung 193: Geringer Abfluss (Velbert, 2014)

mögliche Ursachen: zu geringe Abwassereinleitungen, geringe Anzahl von Hausanschlüssen

Standicherheit: nicht gefährdet

Betriebssicherheit: gefährdet

Dichtheit: nicht gefährdet

Dauerhaftigkeit: nicht gefährdet

Auftreten: wiederkehrender Störfall

Kategorie 2: mittelfristig zu beseitigender Störfall

Empfehlungen zur Beseitigung:

kurzfristig: Kanalreinigung, Freispülen

langfristig: keine, wenn möglich Zufluss/Anschlussanzahl erhöhen

Klappernder Kanaldeckel



Abbildung 194: Klappernder Kanaldeckel (Gladbeck, 2014)

mögliche Ursachen: defekter Schachtkopf, Schachtring

Standicherheit: nicht gefährdet (Kanal)

Betriebssicherheit: nicht gefährdet

Dichtheit: nicht gefährdet

Dauerhaftigkeit: nicht gefährdet

Auftreten: einmaliger Störfall

Kategorie 1: kurzfristig zu beseitigender Störfall

Empfehlungen zur Beseitigung:

kurzfristig: Antiklapperring; Schachtabdeckung austauschen

langfristig: Schachtkopfsanierung

Geruchsbelästigung



Abbildung 195: Geruchsbelästigung (IKT, 2000)

mögliche Ursachen: Fäulnisprozesse, schlechte Durchlüftung

Standsicherheit: nicht gefährdet, außer bei biogener Schwefelsäurekorrosion,

Betriebssicherheit: nicht gefährdet

Dichtheit: nicht gefährdet

Dauerhaftigkeit: nicht gefährdet

Auftreten: wiederkehrender Störfall

Kategorie 2: mittelfristig zu beseitigender Störfall

Empfehlungen zur Beseitigung:

kurzfristig: Kanalreinigung, Geruchsfilter

langfristig: Geruchsfilter, Geruchsverschlüsse, Abflussverhältnisse optimieren

Rattenbefall



Abbildung 196: Rattenbefall (IKT, 2014)

mögliche Ursachen: unsachgemäße Beseitigung von Abfall

Standsicherheit: nicht gefährdet

Betriebssicherheit: Hygiene gefährdet

Dichtheit: nicht gefährdet

Dauerhaftigkeit: nicht gefährdet

Auftreten: wiederkehrender Störfall

Kategorie 2: mittelfristig zu beseitigender Störfall

Empfehlungen zur Beseitigung:

kurzfristig: Rattengift/-köder auslegen

langfristig: Rattengift/-köder auslegen

Versackung / Versenkung



Abbildung 197: Versackung/ Muffenversatz (Backnang, 2014)

mögliche Ursachen: Frost-, Material- oder Herstellungsfehler, Druckstöße, starke Korrosion, Materialermüdung, unvorsichtige Bauarbeiten

Standicherheit: gefährdet (Brüche, Risse)

Betriebssicherheit: gefährdet (Abflusshindernis)

Dichtheit: gefährdet (Brüche, Risse)

Dauerhaftigkeit: gefährdet

Auftreten: einmaliger Störfall

Kategorie 1: kurzfristig zu beseitigender Störfall

Empfehlungen zur Beseitigung:

kurzfristig: örtliche Reparatur

langfristig: Erneuerung in offener/geschlossener Bauweise

Ausblasung Geruchsverschluss



Abbildung 198: Aerosolbildung (Herne, 2014)

mögliche Ursachen: Kanalreinigungsarbeiten mit Hochdruckwasserstrahlen

Standicherheit: nicht gefährdet

Betriebssicherheit: nicht gefährdet

Dichtheit: nicht gefährdet

Dauerhaftigkeit: nicht gefährdet

Auftreten: wiederkehrender Störfall

Kategorie 2: mittelfristig zu beseitigender Störfall

Empfehlungen zur Beseitigung:

kurzfristig: Druck und Durchfluss bei Reinigung reduzieren

langfristig: Düsen mit großen Strahlwinkeln, Sanierung der Dachentlüftung in Toiletten; Sanierung der Be- bzw. Entlüftung der Leitungen

Der Störfallkatalog ist diesem Bericht als Anhang beigefügt und steht als Arbeitshilfe zum Download bereit (vgl. auch Abschnitt 7, Tabelle 64).

7 Materialien für den Wechsel zur bedarfsgerechten Kanalreinigung

7.1 Modularer Maßnahmenplan

Auf Basis der betriebsorientierten Untersuchungen (vgl. Abschnitt 6) wurden sämtliche Ergebnisse zu einem modularen Maßnahmenplan zusammengefasst (s. Abbildung 199). Dieser Maßnahmenplan kann für die Entwicklung eines eigenen individuellen Maßnahmenprogramms zur Einführung einer bedarfsorientierten Kanalreinigungsstrategie herangezogen werden. Der Maßnahmenplan gliedert sich in die Phasen der „Konzeptionierung“ und „Einführung“. Hieran schließt sich dann die Umsetzungsphase im Sinne des in Abbildung 101 dargestellten Prozessmodells an. Sämtliche Maßnahmen in der Konzeptionierungs- und Einführungsphase können in eine der drei folgenden Maßnahmenschwerpunkte gruppiert werden:

- Organisation / Entwicklung
- Sachmittel und Dritte / Beschaffung
- Personal / Weiterbildung

Zu den einzelnen Maßnahmen wurden im Vorhaben detaillierte Handlungsempfehlungen und Arbeitshilfen erarbeitet. Die Handlungsempfehlungen ergeben sich unmittelbar aus den Ausführungen in den Abschnitten 6.2 bis 6.6. Die in Abbildung 199 dargestellten Zeitperioden für die Konzeptionierung und Einführung wurden allgemein gehalten, sie können z.B. zu einem Zeitraum von 2 Jahren gewählt und in 4 Perioden von je einem halben Jahr unterteilt werden. Im Plan wird deutlich, dass einige Aufgaben, wie z.B. die Kommunikation der neuen Betriebsstrategie oder ein Fahrzeug-Check, einer Wiederholung und längeren Beobachtung bedürfen.

Der modulare Maßnahmenplan steht als Excel-Sheet unter www.ikt.de/kanalreinigung zum Download zur Verfügung (vgl. Abschnitt 7.2, Tabelle 64).

In den nachfolgenden Abschnitten 7.1.1 bis 7.1.3 werden für jede der drei Maßnahmengruppen die Einzelmaßnahmen stichpunktartig beschrieben und mit konkreten Umsetzungs- bzw. Fallbeispielen der Abschnitte 6.2 bis 6.6 verknüpft. Ergänzend wird auf die ebenfalls im Rahmen des Vorhabens entwickelten und zum Download verfügbaren Arbeitshilfen bzw. Formulare verwiesen.

angebotene Excel-Berechnungsschema (Abbildung 201) genutzt werden. Die Kostenbetrachtung stellt eine wesentliche Grundlage für die Entscheidungsvorbereitung dar (vgl. Abschnitt 7.1.1.3).

Auch während der Konzeptionierungs- und Einführungsphase empfiehlt es sich in definierten Zeitabständen die Kostenbetrachtung zu prüfen und ggf. anzupassen.

7.1.1.3 Entscheidungsvorbereitung

Auf Grundlage der beschriebenen Prozesse und entsprechender Kostenbetrachtungen werden die notwendigen Entscheidungen für Fachgremien und Entscheider vorbereitet. Hierzu gehört insbesondere die individuelle Ausarbeitung des Maßnahmenplans mit Zuordnung von Verantwortlichkeiten sowie Leistungs- und Terminzielen nach der Vorlage in Abbildung 199 bzw. den Ausführungen in Abschnitt 7.1.

7.1.1.4 Abstimmung mit Überwachungsbehörden

Von dem Wechsel zur bedarfsgerechten Kanalreinigung und den möglicherweise verbundenen Umstrukturierungen im Kanalbetrieb können auch verwaltungs-, umwelt- sowie arbeitsschutzrechtliche Randbedingungen bzw. Ziele betroffen sein. Ggf. sind die vorbereiteten Entscheidungen stetig mit den Überwachungsbehörden abzustimmen. Als Arbeitshilfen können die zur Entscheidungsvorbereitung eingesetzten Mittel auch hier verwendet werden.

7.1.1.5 Ablauforganisation anpassen

Die Ablauforganisation ist auf Grundlage der während der Prozessbeschreibung (vgl. Abschnitt 7.1.1.1) erkannten Synergie- und Optimierungspotenziale und infolge der Entscheidungsvorbereitung und Abstimmung mit den Überwachungsbehörden den neuen strategischen Anforderungen anzupassen. Ein weiteres Beispiel für den Kernprozess Störfallmanagement bietet Abschnitt 6.6.2 (Fallbeispiel Stuttgart).

7.1.1.6 Aufgaben und Stellen definieren

Die Umstrukturierung der Betriebs(prozess)struktur erfordert in vielen Bereichen eine neue Definition von Stellen (Arbeitsplätzen) und dazugehörenden Aufgaben. Auch die Einordnung in entsprechende Tarifstrukturen spielt dabei eine wichtige Rolle und wirkt sich wiederum auf die Kosten(-betrachtungen) (vgl. Abschnitt 7.1.1.2) aus. Besonders in der Konzeptionierungs- und Einführungsphase sind daher die Aufgaben und Anforderungen, die durch die neuen Prozesse an die Mitarbeiter gestellt werden, fortlaufend zu prüfen und ggf. anzupassen.

7.1.1.7 Kommunikation der neuen Betriebsstrategie

Einen besonderen Stellenwert im Rahmen jeder Umstrukturierungsmaßnahme im Betrieb hat die Kommunikation bzw. die Einbindung der Mitarbeiter. Mitarbeiter sollten mit Beginn der Konzeptionierungsphase in alle Überlegungen eingebunden werden. Das Einbringen ihrer spezifischen Erfahrungen (vor allem im Umgang mit dem jeweiligen Kanalnetz und der zur Verfügung stehenden Technik) kann zum Erfolg des Wechsels zur bedarfsgerechten Kanalreinigung beitragen. Zusätzlich wird durch die fortlaufende Einbindung der Mitarbeiter (z.B. in Form wöchentlicher Gesprächsrunden) die Akzeptanz für die Umstrukturierung erhöht.

7.1.2 Sachmittel / Dritte – Beschaffung

Im Bereich Sachmittel / Dritte werden Arbeitsmaterialien und Instrumente betrachtet, die bei dem Wechsel zur bedarfsgerechten Kanalreinigung helfen können und den möglichen Erfolg der bedarfsorientierten Kanalreinigung unterstützen. Dabei stehen besonders die Datenerfassung und das Datenmanagement sowie die Leistungsfähigkeit der eingesetzten Reinigungstechnik im Vordergrund.

7.1.2.1 Fahrzeug-Check

Der Erfolg der Kanalreinigung hängt wesentlich von der Leistungsfähigkeit der eingesetzten Fahrzeuge ab, die im Rahmen des Fahrzeug-Checks wirkungsvoll überprüft werden kann (vgl. Abschnitt 6.5). Als Zeitpunkt für die erstmalige Überprüfung bietet sich bereits die Konzeptionierungs- und Einführungsphase an, da hier bereits wesentliche Grundlagen für die Planung des Fahrzeugeinsatzes und für die Schulung des Personals erarbeitet werden. Das Prüfprogramm und Fallbeispiele sind ausführlich in Abschnitt 6.5.3 dargestellt.

7.1.2.2 Instrumente zur Ablagerungsbewertung

Als Hilfsmittel zur Bewertung der Situation im Kanal können z.B. Schachtkameras und Kanalspiegel eingesetzt werden. Es empfiehlt sich, diese Instrumente bereits zu Beginn der Konzeptionierungsphase anzuschaffen, um frühzeitig die Datengrundlage verbessern zu können. Eine Marktübersicht und Hinweise zur Beschaffung enthält Abschnitt 4.3.2, Tabelle 14. Diese Informationen stehen auch unter www.ikt.de/kanalreinigung (vgl. Abschnitt 7.2, Tabelle 64) zum Download zur Verfügung.

7.1.2.3 Mobile Datenerfassungsgeräte

Im Verbund mit Betriebsführungssystemen (EDV-Unterstützung) werden häufig auch mobile Datenerfassungsgeräte eingesetzt (vgl. Abschnitt 4.5). Sie erleichtern die Datenaufnahme durch das Betriebspersonal und die Datenübertragung an die Betriebsführung. Auf Papierunterlagen kann so i.d.R. komplett verzichtet werden (vgl. Fallbeispiele in Abschnitt 6.2.3 bis 6.2.5). Häufig empfehlen Hersteller von Betriebsführungssystemen speziell angepasste mobile Geräte, die an die besonderen Anforderungen des jeweiligen EDV-Systems (vgl. Abschnitt 7.1.2.4) angepasst sind.

Als Arbeitshilfe stehen Marktübersichten zu „Betriebsführungssysteme“ und „Kanalinformationssysteme“ zur Verfügung (vgl. Abschnitt 6.4.3). Diese werden durch Herstellerangaben zu den empfohlenen mobilen Datenaufnahmegeräten ergänzt. Einführung bzw. Beschaffung der mobilen Hilfsmittel sollten mit der Anschaffung des EDV-Systems einhergehen. So können frühzeitig und effizient Daten erhoben und im System hinterlegt werden.

7.1.2.4 Spülplanungstools / EDV-Systeme

EDV-Systeme können für den Wechsel zur bedarfsgerechten Kanalreinigung von besonderer Bedeutung sein. Allerdings sind vor Beschaffung bzw. Einführung eines solchen Systems die Anforderungen detailliert zu spezifizieren. Außerdem sollten Leistungspotenziale und –grenzen der Produkte im Rahmen von Programmtests hinterfragt werden. Die Marktübersichten „Betriebsführungssysteme“ und „Kanalinformationssysteme“ geben Einstiegsinformationen (vgl. Abschnitt 6.4.3). Darüber hinaus ist ein Ablaufschema für die Anschaffung von EDV-Systemen als Arbeitshilfe verfügbar (vgl. Abschnitt 6.4.4). Sämtliche Informationen stehen unter www.ikt.de/kanalreinigung zum Download bereit (vgl. Abschnitt 7.2, Tabelle 64).

7.1.2.5 Störfall- und Beschwerdebearbeitung

Zur Bearbeitung von Störfällen und Bürgerbeschwerden sind einerseits geeignete Prozesse und andererseits strukturierte Methoden zur Datenaufnahme zu entwickeln. Hier helfen beispielsweise ein zusätzliches Modul im Betriebsführungssystem (vgl. Abschnitt 6.6.2.6, Fallbeispiel Stuttgart) sowie eine festgelegte Vorgehensweise für die Aufnahme und Bearbeitung (vgl. Abschnitt 6.6.3). Zur Strukturierung und Unterstützung der Tätigkeiten können ein Ablaufschema für die Störfallaufnahme (vgl. Abschnitt 6.6.3, Abbildung 182) und ein Störfallkatalog mit Handlungsempfehlungen herangezogen werden (vgl. Abschnitt 6.6.4, Tabelle 63). Diese Hilfsmittel stehen auch unter www.ikt.de/kanalreinigung zum Download bereit.

7.1.3 Personal – Weiterbildung

Gut geschultes Personal ist die wichtigste Voraussetzung für die Einführung einer neuen Reinigungsstrategie. Weiterbildungen und Schulungen betreffen den Umgang mit neuen Arbeitsmitteln, -situationen und -abläufen.

7.1.3.1 Betriebspersonal: Überwachen und Bewerten

Mit Einführung einer bedarfsorientierten Reinigungsstrategie wird vor allem vom Betriebspersonal ein hohes Maß an Aufmerksamkeit und Sorgfalt bei der Datenaufnahme gefordert. Eine standardisierte Datenaufnahme kann hier unterstützen, z.B. über einheitliche Protokollvorlagen sowie (Risiko-)Bewertungen für die Ablagerungssituation. Ebenso sind Störfälle zu betrachten und haltungsweise in die Historie mit aufzunehmen. Es empfiehlt sich in der Konzeptionierungsphase möglichst früh mit der Einführung solcher Standards zu beginnen. Diese können dann fortlaufend an die sich ändernde Struktur des Kanalbetriebs angepasst werden und so weitere Orientierung geben (z.B. Datenaufnahme und Übergabe ins EDV-System).

Eine Protokollvorlage für die einheitliche Datenaufnahme wurde in Abschnitt 6.2.6 entwickelt. Die Bewertung der Ablagerungssituation erfolgt auf Grundlage von betriebsspezifischen Randbedingungen, wie sie in Abschnitt 6.3 beschrieben sind. Zusätzlich wurde in Abschnitt 6.6.4 ein Störfallkatalog entwickelt. Im Ergebnis liegen damit Arbeitshilfen in Form eines Muster-Protokolls für die Datenaufnahme (vgl. Abschnitt 6.2.6.8, Abbildung 119), einer Risikomatrix für die Bewertung der Ablagerungssituation (vgl. Abschnitt 6.3.2, Abbildung 122) sowie der Störfallkatalog (vgl. Abschnitt 6.6.4, Tabelle 63) vor. Diese stehen ebenfalls unter www.ikt.de/kanalreinigung zum Download zur Verfügung (vgl. Abschnitt 7.2, Tabelle 64).

7.1.3.2 Sachbearbeiter: Spül- und Einsatzplanung / EDV-Systeme

Zum Erfolg des Wechsels zur bedarfsgerechten Kanalreinigung trägt der zielgerichtete und effektive Einsatz von EDV-Systemen entscheidend bei. Anforderungen an das System sind festzulegen (vgl. Abschnitt 6.4.3) und Verantwortlichkeiten für die Auswahl einer geeigneten Betriebsführungssoftware festzulegen. Neben der ersten Vorauswahl eines Systems sollten von den verantwortlichen Mitarbeitern auch die Testphasen betreut, Lehrgänge für den Umgang mit der Software besucht und Wissen an andere Kanalbetriebsmitarbeiter weitergegeben werden. Diese anspruchsvolle Aufgabe erfordert ein hohes Maß an Spezialisierung, den ständigen Austausch mit EDV-Herstellern sowie den Abgleich mit den Interessen des Kanalbetriebs. Daher empfiehlt es sich, entsprechende Mitarbeiter über den gesamten Zeitraum der Konzeptionierung und Einführung mit dieser Aufgabe zu betrauen.

7.1.3.3 Betriebsmanager: Kommunikation, Vermittlung, Ziele/Aufgaben, Prozesse

Der Kanalbetriebsmanager muss neue Ziele, Prozesse und Aufgaben kommunizieren, vermitteln und für alle Mitarbeiter verständlich gestalten. Nur so kann der Wechsel zur bedarfsgerechten Kanalreinigung gelingen und von allen Mitarbeitern mitgetragen werden. Kanalbetriebsmanager überblicken hierzu die Betreiberpflichten, d.h. Überwachen, Dokumentieren, Instandhalten. Sie gestalten zuverlässige Betriebsprozesse mit Blick auf Reinigung, Inspektion und ggf. auch Reparatur. Sie stellen insbesondere die technische Qualität sicher, z.B. hinsichtlich der eingesetzten Geräte und Fahrzeuge. Und sie kommunizieren erfolgreich, mit Politik und Bürger. Schließlich setzen sie die verfügbaren Mittel verantwortungsbewusst ein. Aktuelle Fortbildungsangebote setzen hier an, so z.B. zum „IKT-Zertifizierter Kanalbetriebsmanager“.

7.2 Arbeitshilfen

Der im Rahmen des Forschungsprojektes entwickelte modulare Maßnahmenplan baut auf Erfahrungen von Netzbetreibern auf und wird durch praxisorientierte Arbeitshilfen ergänzt. Nachfolgend wird diese Materialsammlung vorgestellt. Alle Materialien stehen auf der Internetplattform des IKT unter dem Link www.ikt.de/kanalreinigung zum Download bereit (Abbildung 200; Benutzer: Erfahrungskreis; Passwort: Kanalbetrieb).

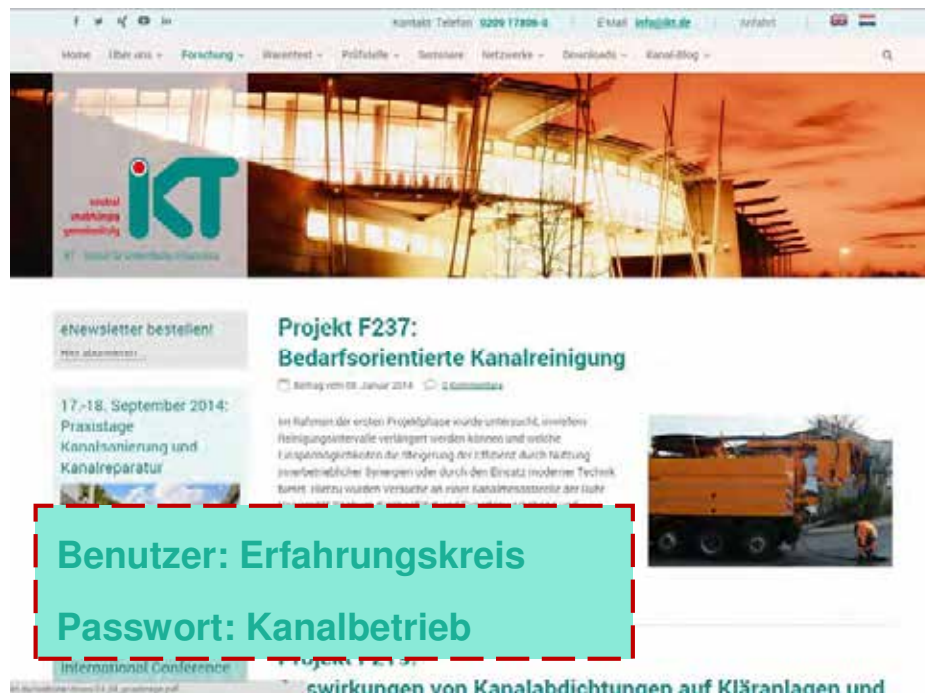


Abbildung 200: Internetpräsenz „Kanalreinigung“, Download-Plattform

Neben den bereits vorgestellten Arbeitshilfen und -materialien werden auch Beispiel-Präsentationen von Netzbetreibern zur Verfügung gestellt. Diese können z.B. für Weiterbildungsmaßnahmen des eigenen Personals genutzt werden. Die Protokollvorlagen und Arbeitshilfen helfen insbesondere bei der Konzeptionierung und Einführung und sollten mit dem Betriebspersonal gemeinsam entsprechend den örtlichen Gegebenheiten weiterentwickelt werden. Tabelle 64 fasst die zum Download bereitstehenden Arbeitshilfen zusammen.

Tabelle 64: Überblick Materialsammlung

Arbeitshilfe	Download-Pfad (www.ikt.de/web-site/kanalreinigung/...)
Protokoll Kanalreinigung	p_kanalreinigung.pdf p_kanalreinigung.dot
Risikomatrix – Bewertung der Ablagerungssituation	bewertung_der_ablagerung.pdf
Marktübersicht Schachtkamerasysteme	schachtkameras.pdf
Marktübersicht Betriebsführungssysteme	betriebsführungssysteme.pdf
Marktübersicht Kanalinformationssysteme	kanalinformationssysteme.pdf
Ablaufschema-Anschaffung EDV-System	edv_anschaffung.pdf
Datenaufnahme-Formular-Störfall	protokoll_stoerfall.pdf protokoll_stoerfall.dot

Ablaufschema-Störfall- und Beschwerdemanagement	stoerfall_ablauf.pdf
Arbeitshilfe-Störfallkatalog	stoerfallkatalog.pdf
Modularer Maßnahmenplan	mod_maßnahmenplan.pdf mod_maßnahmenplan.xls
Einsparpotenzial-Berechnungshilfe	einsparpotenzial.xls
Einsparpotenzial-Betreiberprofile	beispiele_einsparpotenzial.xls

8 Erschließbare Einsparpotenziale

8.1 Datengrundlage

Für die Konzeptentwicklung und -einführung ist es wesentlich, Einsparpotenziale benennen zu können. In diesem Abschnitt sollen daher für kategorisierte Betreiberprofile beispielhafte Kostenrechnungen und Ressourcenplanungen in Anlehnung an den Maßnahmenplan nach Abschnitt 7.1 (Abbildung 199) dargestellt werden.

Als Datengrundlage sollte dabei zunächst auf Literaturrecherchen, Benchmarking-Auswertungen und konkrete Erhebungen bei acht Netzbetreibern (vgl. Tabelle 47) zurückgegriffen werden. Im Verlauf der Untersuchungen zeigte sich allerdings, dass zwar strukturelle Daten zur Gliederung von Kosten erhoben werden konnten (Kostenarten), aber belastbare Werte für die zu erwartenden Aufwendungen nicht verfügbar sind. Durch die beteiligten Betreiber wurden insbesondere folgende Ursachen benannt:

- **Unzureichende Datendokumentation**

Die notwendigen Daten werden von vielen Netzbetreibern nicht oder nur teilweise dokumentiert.

- **Keine Datenfreigabe**

Bei einigen Netzbetreibern lagen zwar nach eigenen Aussagen auch Daten zu den relevanten Fragestellungen vor, diese waren aber für Dritte nicht einsehbar. Zugriffsbeschränkungen resultierten z.B. aus unternehmensinternen Vorgaben, die im Zuge von Benchmarking-Projekten getroffen worden waren.

- **Kein freier Datenzugriff**

Bei einigen der befragten Netzbetreiber waren zwar grundsätzlich Daten dokumentiert worden, allerdings lagen die Daten nur in Rohfassung vor und ein Zugriff auf die Originalquellen zur weiteren Aufbereitung wurde verwehrt.

Vor diesem Hintergrund konnten nur in Einzelfällen Kostendaten erhoben werden, so z.B. zu den Kosten von EDV-Systemen, Inspektionsgeräten und Fahrzeugen. Soweit verfügbar wurden diese in nachfolgenden Beispielrechnungen auch genutzt. Ergänzend wurden einzelne Berechnungsansätze in Anlehnung an Coburg (2006) auf Plausibilität überprüft.

Insgesamt ist die Berechnung mit tatsächlichen Kostendaten aber für das weitere Vorgehen nur von untergeordneter Bedeutung. Im Vordergrund der Ausführungen stehen die Entwicklung einer geeigneten Methodik sowie die Bereitstellung einer praxisorientierten Arbeitshilfe mit Musterkalkulation. Es ist dann die Aufgabe jedes einzelnen

Netzbetreibers, anhand seiner eigenen betriebsinternen Daten entsprechende Kostenvergleiche aufzustellen und Einsparpotenziale zu ermitteln.

8.2 Arbeitshilfe – Einsparpotenziale

Zur vergleichenden Ermittlung von Einsparpotenzialen wurde eine Arbeitshilfe in Form eines Excel-Sheets entwickelt (Abbildung 201). Darin werden die anfallenden Kosten auf vier Kostenträgergruppen verteilt (vgl. Tabelle 65), die sich an den drei Maßnahmengruppen nach Abschnitt 7.1 sowie einer damit verbundenen Umsetzungsphase orientieren.

Netzbetreiber können in die Arbeitshilfe eigene, betriebsinterne Kostenwerte eintragen und so einen Überblick über die Kosten der betrachteten Strategie erhalten. Bei Betrachtung mehrere Strategien ist so ein direkter Vergleich möglich. Als Haupt-Betrachtungszeitraum wird eine Periode von 15 Jahren angesetzt (z.B. Wiederholungsinspektion); eine längere Betrachtung ist aber grundsätzlich möglich und auch im Excel-Sheet berücksichtigt.

In Abbildung 201 wird vertikal nach Kostenträgern (d.h. Maßnahmen, vgl. Tabelle 65) und horizontal nach Zeitraum und Kostenarten (d.h. Personal (P), Sachkosten Invest (SKI), Sachkosten Betrieb (SKB) und Leistungen Dritter (LD)) unterschieden.

Tabelle 65: Kostenträgerstruktur

Organisation	Sachmittel/Dritte	Weiterbildung	Umsetzung
Prozesse beschreiben	Fahrzeug-Check	Betriebspersonal: Überwachen und Be- werten	Inspektion und Kon- trolle
Kostenbetrachtung	Instrumente zur Ablage- rungs-bewertung	Sachbearbeiter: EDV Spül-/Einsatzplanung	Bewertung der Ablage- rungssituation
Entscheidungsvorbe- reitung	mobile Datenerfas- sungs-geräte	Betriebsmanager: Kommunikation, Ziele, Aufgaben,...	Einsatzplanung
Abstimmung mit Über- wachungs- behör- den	Spülplanungstools / EDV-Systeme		Kanalreinigung
Ablauforganisation an- passen	Störfall- und Be- schwerde-bearbeitung		
Aufgaben und Stellen definie- ren			
Kommunikation der neuen Betriebsstrate- gie			

8.3 Berechnungsbeispiele

Beispiele für Kostenberechnungen finden sich für unterschiedliche Strategievarianten im Anhang K – Kostenberechnungsbeispiele. Unterschieden werden vier Betreiberprofile und zwei Strategievarianten (I – Bedarfsorientiert (BKR), II – Nullvariante (NV)).

Tabelle 66: Betreiberprofile

BP I-1000	BP II-400	BP III-200	BP IV-50
Kanalnetzlänge 1.000 km	Kanalnetzlänge 400 km	Kanalnetzlänge 200 km	Kanalnetzlänge 50 km
Einwohnerzahl 200 TEW	Einwohnerzahl 80 TEW	Einwohnerzahl 40 TEW	Einwohnerzahl 10 TEW
Eigene Fahrzeuge 4	Eigene Fahrzeuge 2	Eigene Fahrzeuge 1	Eigene Fahrzeuge keine, Fremdleister
Betriebspersonal 30	Betriebspersonal 20	Betriebspersonal 12	Betriebspersonal 2

Der Aufwand für die bedarfsorientierte Kanalreinigung wird dabei mit dem in Abschnitt 6.3.2 dargestellten linearen Ansatz für die Intervallverlängerung abgeschätzt, d.h. es wird eine Halbierung des Reinigungsaufwandes nach ca. 10 Jahren erwartet.

Um das Einsparpotenzial zu ermitteln, wird der Barwert sämtlicher Kosten für den Anfangszeitpunkt der Planung ermittelt. Hierzu werden im Beispiel ein reiner Kapitalzins von $i = 3\%$ (ohne Inflation) angesetzt und die Kosten ebenfalls ohne Inflation berücksichtigt. Allgemein ergibt sich mit dem Zinssatz i dann der Abzinsungsfaktor a im Jahr n entsprechend zu $a = (1+i)^{-n}$. Die Gesamt-Barwerte werden dann durch Akkumulation der Einzeljahres-Barwerte ermittelt.

Eine Übersicht der Ergebnisse aus den Beispielberechnungen und die sich hieraus ergebenden Einsparpotenziale zeigt Tabelle 67.

Tabelle 67: Kostenberechnungsbeispiele, Einsparpotenziale

Betreiber	BP I – 1000	BP II-400	BP III-200	BP IV-50
Profil	1000 km, 200 TEW, 4 Fzg., 30 Mitarb.	400 km, 80 TEW, 2 Fzg., 20 Mitarb.	200 km, 40 TEW, 1 Fzg., 12 Mitarb.	50 km, 10 TEW, kein Fzg., 2 Mitarb.
NV, P	4317	2200	1108	27
NV, SKI	2232	1122	561	0
NV, SKB	837	468	210	0
NV, LD	77	53	261	302
NV, Gesamt	7463	3843	2141	329
BKR, P	3808	2239	1103	192
BKR, SKI	2083	1029	444	5
BKR, SKB	631	364	158	17
BKR, LD	142	170	324	255
BKR, Gesamt	6663	3802	2029	469
Einsparpotenzial [T Euro]	+800	+41	+112	-140

NV: Nullvariante, BKR: Bedarfsorientierte Kanalreinigung, P: Personalkosten, SKI: Sachkosten-Investitionen, SKB: Sachkosten-Betrieb, LD: Leistungen Dritter, BP: Betreiberprofil

Im Gesamtblick wird deutlich, dass eine nennenswerte Einsparung im Berechnungsbeispiel nur für Betreiber mit größerer Netzlänge zu erwarten ist, da hier der Planungsaufwand und die fixen Investitionskosten einem größeren Betriebskostenvolumen gegenüberstehen, welches im Zuge der Intervallverlängerung anteilig reduziert werden kann.

Hervorzuheben ist in diesem Zusammenhang, dass die Investitionskosten sehr kurzfristig, die Einsparpotenziale aber erst nach einer längeren Betriebsphase (ca. 10 Jahre, wegen Datenerhebung als Basis für Intervallverlängerung) realisiert werden. Organisationsänderungen können damit i.d.R. ohne besonderen Druck allein im Rahmen üblicher Organisationsanpassungen, d.h. altersbedingtes Ausscheiden von

Mitarbeitern, Aussetzen von Ersatzbeschaffungen bei Fahrzeugen, umgesetzt werden.

9 Zusammenfassung und Ausblick

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 bisher nur wenige Kanalnetzbetreiber bedarfsorientierte Reinigungsstrategien umgesetzt haben.

Da bisher nur wenige Erkenntnisse über die Auswirkungen veränderter Reinigungsstrategien auf die Ablagerungssituation im Kanalnetz vorliegen, wurden im Forschungsprojekt verschiedene praktische Versuche durchgeführt. Ziel war es, die Prozesse der Ablagerungsbildung, insbesondere die Geschwindigkeit, mit der Ablagerungen anwachsen, näher zu untersuchen. Zu diesem Zweck wurde auf der vom Ruhrverband betriebenen Kläranlage Bochum-Ölbachtal eine Kanaltteststrecke (3 Rohre mit je 10 m Länge und 300 mm Durchmesser) errichtet, die es ermöglichte, unter realitätsnahen Bedingungen die Bildung, das Wachstum und die Erosion von Kanalablagerungen 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 während der Phase 1 des Forschungsprojektes wurde im Betrieb der Kanaltteststrecke festgestellt, dass es bereits nach wenigen Tagen in einem Kanalrohr zu erheblichen Ablagerungshöhen kommen kann, die nach SüwVO Abw NRW (2013) 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 $I = 1 ‰$, 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, kann Niederschlag durch den vermehrten Feststoffeintrag in das Kanalnetz auch zu einer

Erhöhung der Ablagerungen im Kanalnetz führen, welche dann bei Trockenwetter (unter Voraussetzung einer ausreichenden Transportkapazität) langsam wieder abgetragen werden.

Zusätzlich wurden im Rahmen der Phase 2 weitere Versuche im Zeitraum von Juli 2014 bis April 2015 durchgeführt. Bei diesen Versuchen wurde neben der bisher untersuchten äquivalenten Sandrauheit $k = 0,4$ mm, auch $k = 0,635$ mm untersucht. Dies entspricht den Werten eines alternden Betonrohres. Des Weiteren wurde eine verfugte Natursteinfliese ($k \approx 1,25$ mm) in einem Testrohr verlegt. Bei Untersuchungen zur Ablagerungsdynamik bei dynamischen Tagesgang des Zulaufs in die Testrohre bei einem Gefälle von 1 ‰ und untersuchten äquivalenten Sandrauheiten von 0,4 – 1,25 mm wurden in allen Testrohren im Mittel bis zu doppelt so hohe Ablagerungsmengen je Meter Rohr (vgl. Tabelle 24) festgestellt, wie durch eine konstante Beschickung bei gleichen Randbedingungen.

In einem weiteren Versuchsprogramm ($I = 1$ ‰, $Q = 2$ L/s, $k = 0,4 - 1,25$ mm, Versuchsdauer 30 d) wurde der Einfluss eines Hindernisses auf die Ablagerungsbildung untersucht. Das Hindernis führte innerhalb eines Tages zu Ablagerungsmengen von bis zu 4 L/m. Nach etwa 15 Tagen stellte sich eine konstante Menge von etwa 15 L/m ein. Dies zeigte die starken Auswirkungen eines Hindernisses auf die Entstehung von Ablagerungen und der hydraulischen Einschränkung des Querschnittes. Nach etwa der Hälfte der Versuchsreihe (Versuchstag 17) wurden die Hindernisse aus den Versuchsrohren entfernt, um zu testen, ob es genügt, das Hindernis zu beseitigen oder ob eine Reinigung nötig ist. Bei den Versuchsrohren mit einer Rauheit von 0,4 und 0,635 mm reduzierte sich innerhalb eines Tages die Ablagerungsmenge auf 2,5 L/m. Bei der Natursteinfliese mussten die Ablagerungen zunächst mechanisch aufgelockert werden, bevor diese ausgespült wurden.

Die Versuche an der Kanalteststrecke belegten die These, dass der Erosionswiderstand von Sedimenten mit steigender Sedimentationsdauer steigt. Die aus den Versuchen an der Kanalteststrecke gewonnenen Werte zur Lösung der Verfestigungen waren mit rund 0,2 bis 0,8 N/m² allesamt gering. Um die Datengrundlage durch Laboruntersuchungen weiter auszubauen, wurden Erosionsmessgeräte angefertigt und kalibriert. 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. Die meisten Messwerte lagen unterhalb von 1 N/m². Es ist nicht zu erwarten, dass mineralische Sedimente (ohne das Vorhandensein von ungewöhnlich großen Mengen von Fett oder Bindemitteln) sich 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 Schwefelwasserstoffkonzentrationen sowohl im Abwasser als auch in der Luft gemessen werden konnten. Diese lagen im Bereich von 1 - 10 ppm und waren somit relevant für biogene Schwefelsäurekorrosion. Mit zunehmender Temperatur ($> 15^{\circ}\text{C}$) konnten stark ansteigende Konzentrationen gemessen werden. Diese lagen nach einer Versuchsdauer von 50 Tagen im Mittel bei 45 ppm ($0,06 \text{ mg}_{\text{H}_2\text{S}}/\text{L}$) in der Abluft und bei $2,0 \text{ mg}_{\text{H}_2\text{S}}/\text{L}$ im Abwasser. Zusätzlich wurden die Untersuchungen durch Batchversuche mit unterschiedlichen Sedimenten erweitert. Hierbei stellte sich heraus, dass bei den untersuchten Proben in etwa gleich viel Schwefelwasserstoff ($0,086 - 0,107 \text{ mg}/(\text{m}^2\cdot\text{h})$) aus Ablagerungen wie aus der Sielhaut entstand. Bei den durchgeführten Batchversuchen, welche mit identischen Abwasser wie im Versuchsrohr angesetzt wurden, wurden H_2S -Konzentrationen von bis zu 17 ppm gemessen. Anhand dieser Batchversuche wurden drei Modellansätze zur Vorhersage der entstehenden H_2S -Menge erprobt. Mit dem Modell nach Hvitved-Jacobson et al. (2002) waren die tatsächlich entstandenen Mengen am genauesten abzubilden.

Die zusammengetragenen Erfahrungen von Abwasserbetrieben, die sich mit der Überwachung von Ablagerungen in der Kanalisation systematisch beschäftigt haben, unterstützen in vielen Fällen den strategischen Ansatz bedarfsorientierter Reinigungskonzepte. Die Abwasserbetriebe berichten, dass für sehr viele Einzugsgebiete einer Verlängerung von Reinigungsintervallen oft nichts im Wege steht, insbesondere wenn dort keine baulichen Besonderheiten vorliegen. Dabei ist der Weg von der präventiven Systemreinigung zu einer bedarfsorientierten Kanalreinigung jedoch als langfristiger Prozess zu planen. Wie kann der Wechsel zur bedarfsorientierten Kanalreinigung jedoch unterstützt werden? Im Projekt wurden die wesentlichen Stellschrauben erkannt, sie liegen im Bereich der Organisation, der Sachmittel und der Schulung des Personals.

Die Schulung des Betriebspersonals ist für Netzbetreiber ein zentrales Handlungsfeld zur Förderung des Wechsels zur bedarfsgerechten Kanalreinigung. Hier muss der neue Ansatz vermittelt werden, dass das Unternehmensziel nicht mehr Maximierung der geleisteten Meter Kanalreinigung pro Zeiteinheit ist, sondern viel mehr die vorsorgende Überwachung des Kanalnetzes mit Blick auf die Schutzziele Gewässerschutz, Betriebssicherheit und Hygiene. Das Sammeln von Betriebswissen kann erleichtert werden, wenn standardisierte Dokumentvorlagen genutzt werden. Im Projekt wurden hierzu Arbeitshilfen erarbeitet, z.B. für Protokollierung der Kanalreinigung und für die Katalogisierung von Störfällen.

Da für die bedarfsorientierte Kanalreinigung viele Überwachungsdaten auch haltungsbezogen gesammelt werden, müssen in der Regel auch Datenbanken und Betriebsführungssysteme angepasst oder neu eingeführt werden. Daher besteht auch

Fortbildungsbedarf im Bereich der EDV-Anwendungen. Von der Leitungsebene müssen neue Ziele, Prozesse und Aufgaben mit Politik, Personal und Bürgern kommuniziert werden. Im Projekt wurde die Struktur für eine Fortbildung zum „Kanalbetriebsmanager“ entwickelt und aktuelle Fortbildungsangebote sind bereits verfügbar (www.ikt.de/seminare).

Die zweite Stellschraube sind Investitionen in geeignete Sachmittel. Im Projekt wurden Arbeitsmaterialien und Instrumente zusammengetragen, die bei einem Wechsel zur bedarfsgerechten Kanalreinigung helfen können. Für Kanalreinigungsfahrzeuge wurde ein Fahrzeug-Check entwickelt, der die Leistungsfähigkeit der Pumpe und die Abstimmung auf Schlauch und Düse sichtbar macht. Der Fahrzeug-Check steht Abwasserbetrieben nun zur Verfügung, um die technischen Voraussetzungen für eine schonende und wirksame Kanalreinigung für ihren Betrieb prüfen zu können.

Für die Instrumente zur Ablagerungsbewertung, für mobile Datenerfassungsgeräte und für Spülplanungstools, ggf. mit Störfallmanagement, wurden Marktübersichten als Arbeitshilfe erstellt. Die Übersichten geben wichtige Einstiegsinformationen. Ein Ablaufschema für die Anschaffung von EDV-Systemen ist auf Basis der Erfahrungen von einigen Abwasserbetrieben entstanden, die in diesem Bereich bereits vorangegangen sind und einiges an „Lehrgeld“ zahlen mussten.

Mit Blick auf die Organisation zeigen die Erfahrungen von Abwasserbetrieben, dass bei dem Wechsel zur bedarfsgerechten Kanalreinigung alle Beteiligten frühzeitig und wiederholend einzubinden sind. Eine wiederholte Kommunikation über Ziele, Motive und Visionen ist für einen Strategiewechsel unabdingbar. Eine neue Ablauforganisation ist im Dialog mit den Mitarbeitern zu entwickeln und die neue Vorgehensweise ist auch genauso frühzeitig im Austausch mit den Überwachungsbehörden festzulegen. Die Kostenbetrachtungen nehmen im Maßnahmenpaket Organisation einen zentralen Stellenwert ein. Sie sind Grundlage für die Kommunikation des Wechsels zur bedarfsgerechten Kanalreinigung sowohl intern als auch extern in politischen Gremien und Pressekreisen.

Die im Projekt erarbeiteten Berechnungsbeispiele für verschiedene Szenarien können als Arbeitshilfe dienen (vgl. Übersicht Arbeitshilfen). Allein mit Blick auf die Kosten lohnt sich die Einführung der bedarfsorientierten Kanalreinigung nicht für jeden Netzbetreiber. Berechnungen zeigten, dass gerade für kleine Kommunen mit Kanalnetzlängen deutlich unter 100 Kilometern, die bedarfsorientierte Kanalreinigung kaum Kostenvorteile bringt und im Einzelfall kann die Überwachung der Ablagerungen sogar die Kosten erhöhen. Hervorzuheben ist in diesem Zusammenhang, dass die Investitionskosten sehr kurzfristig, die Einsparpotenziale aber erst nach einer längeren Betriebsphase (ca. 10 Jahre, wegen Datenerhebung als Basis für Intervallverlängerung) realisiert werden. Organisationsänderungen können damit i.d.R. ohne

besonderen Druck allein im Rahmen üblicher Organisationsanpassungen, d.h. altersbedingtes Ausscheiden von Mitarbeitern, Aussetzen von Ersatzbeschaffungen bei Fahrzeugen, umgesetzt werden.

Im Gesamtblick bleibt festzuhalten, dass Netzbetreiber, die eine bedarfsorientierte Kanalreinigung auf Basis von Ergebnissen aus Ablagerungsinspektionen in einem wiederkehrenden Prozess planen und umsetzen, die neue Strategie häufig als betriebssicherer, rechtssicherer und auch wirtschaftlicher bewerten. Jedoch weisen die Untersuchungen darauf hin, dass eine nennenswerte Einsparung überwiegend nur für Betreiber mit größerer Netzlänge zu erwarten ist, da hier der Planungsaufwand und die fixen Investitionskosten einem größeren Betriebskostenvolumen gegenüberstehen, welches im Zuge der Intervallverlängerung anteilig reduziert werden kann. Abschließend kann konstatiert werden: Auch die neue DIN EN 14654 – Teil 1 sieht in der Kanalreinigung einen wichtigen Betriebsprozess im Kanalbetriebsmanagement und fordert inzwischen ein organisatorisches Vorgehen im Sinne der bedarfsorientierten Kanalreinigung.

Die praktischen Versuche lassen darauf schließen, dass die Entscheidung über eine Kanalreinigung nicht aufgrund einer Momentaufnahme des Ablagerungszustandes erfolgen sollte, da die Ablagerungsmengen bedingt durch Niederschläge 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, sodass angepasste Reinigungsintervalle festgelegt werden können. Reinigungsintervalle dürfen nicht beliebig groß gewählt werden, da (wenn auch langsam) die Festigkeit der Ablagerungen und somit der erforderliche Reinigungsaufwand steigt. Die Bildung von Schwefelwasserstoff spielt für die Planung der Reinigungsintervalle eine untergeordnete Rolle, da der positive Effekt einer Reinigung im Hinblick auf die Schwefelwasserstoffproduktion nur wenige Tage Bestand hat.

Erfolgte und geplante Veröffentlichungen und wissenschaftliche Arbeiten

Die Erkenntnisse aus dem Gemeinschaftsprojekt „Untersuchungen zur bedarfsorientierten Kanalreinigung unter Nutzung betrieblicher Synergien“ sind nachfolgend detailliert ausgeführt.

Veröffentlichungen in wissenschaftlichen Fachzeitschriften:

Lange, R.-L. und Wichern, M. (2013): Sedimentation dynamics in combined sewer systems, In Water Science and Technology 68 (4), S. 756-762

Lange, R.-L. und Wichern, M. (2015): Studies on the influence of slope, roughness and runoff on sedimentation in a test sewer, wird in Water Environment Research eingereicht.

Promotion

Lange, R.-L. (2013), Untersuchungen zum Ablagerungsverhalten in der Mischkanalisation als Grundlage der Optimierung von Reinigungsintervallen, Ruhr-Universität Bochum

Bachelor und Masterarbeiten

Sarah Becker, Praktische Untersuchungen zur Schwefelwasserstoffbildung in der Mischwasserkanalisation, Masterarbeit, Ruhr-Universität Bochum

Kadir Bölükbasi, Ursachen und Auswirkungen von Spülstößen in der Kanalisation, Bachelorarbeit, Ruhr-Universität Bochum

Michael Jeskulke, Untersuchungen zum Abflussvermögen von Straßenabläufen, Bachelorarbeit, Ruhr-Universität Bochum

Marcel Rath, Entwicklung eines Prüfprogramms für die Leistungsüberprüfung von Hochdruckspül- und Saugfahrzeugen (Fahrzeug- Check), Masterarbeit, Universität Duisburg- Essen Lehrstuhl für Siedlungswasserwirtschaft und IKT-Institut für Unterirdische Infrastruktur.

Benedikt van Laak Masterarbeit Bedarfsorientierte Kanalreinigung – Entwicklung einer Arbeitshilfe für die Bewertung der Ablagerungssituation in kommunalen Abwassernetzen und eines Entscheidungsmodells für die Anschaffung von EDV-Systemen,

Masterarbeit, Universität Duisburg- Essen Lehrstuhl für Siedlungswasserwirtschaft und IKT-Institut für Unterirdische Infrastruktur.

Tobias Wanders, Untersuchungen zum Ablagerungsverhalten von Feststoffen in der Kanalisation, Bachelorarbeit, Ruhr-Universität Bochum

Projektarbeiten

Carina Haarmann, Ablagerungen in Entwässerungssystemen – Entstehung und Auswirkungen, Projektarbeit Bachelor, Ruhr-Universität Bochum

Philipp Hummel, Gegenüberstellung von Sedimentations- und Erosionsversuche in der Mischwasserkanalisation, Projektarbeit Bachelor, Ruhr-Universität Bochum

Undine Steinacker, Regenentlastungsanlagen in Mischwassersystemen – Bewertung des Spülstoßes im Hinblick auf die Belastung des Vorfluters, Projektarbeit Diplom, Ruhr-Universität Bochum

Carolin Otto, Schwefelwasserbildung in der Mischwasserkanalisation – praktische Untersuchungen zur, Projektarbeit Diplom, Ruhr-Universität Bochum

Tobias Wanders, Bewertung der Einflüsse auf die Ablagerungsdynamik in einer Kanalteststrecke Projektarbeit Master, Ruhr-Universität Bochum

Tanja Wronski, Eintrag von Feststoffen in die Kanalisation, Projektarbeit Bachelor, Ruhr-Universität Bochum

Literaturverzeichnis

- A1-CBISS (2011): OdaLog L2 Odour Control Logger, <http://www.a1-cbiss.com>, eingesehen am 02.01.2015
- AöR Lünen (2007) Kanalspiegelung und Kanalfernsehinspektion. www.abwasser-luennen.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 (1996) ATV-Handbuch: Bau und Betrieb der Kanalisation. 4. Auflage, Ernst und Sohn (Hrsg.)
- ATV-DVWK-A 131 (2000): Bemessung von einstufigen Belebungsanlagen DWK Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall e.V., Hennef, ISBN 3-933707-41-2
- ATV-DVWK-A 198 (2003): Vereinheitlichung und Herleitung von Bemessungswerten für Abwasseranlagen. DWK Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall e.V., Hennef, ISBN 978-3-924063-48-1
- ATV-DVWK-M 154 (2003): Geruchsemissionen aus Entwässerungssystemen – Vermeidung oder Verminderung. DWK Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall e.V., Hennef, ISBN 3-924063-82-6
- ATV-DVWK-Regelwerk Merkblatt 197 (2004) Ausschreibung von Kanalreinigungsleistungen mit dem Hochdruckspülverfahren; Hennef, Juli 2004
- 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
- Bollrich, G. (2007) *Technische Hydromechanik Band 1 Grundlagen*, 6. Auflage; Berlin, Januar 2007
- 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) Kanalreinigungsdüse, 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) Abwasserschächteüberwachung, 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
- Boyle, W. C. (1977): *Energy Recovery from Sanitary Landfills-a Review*. Microbial Energy Conversion. Oxford, Pergamon Press, S. 119-138
- Brombach, H. und Fuchs, S. (2003) Datenpool gemessener Verschmutzungskonzentrationen in Misch- und Trennkanalesationen. 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
- Bundesrepublik Deutschland (2007) Verordnung zum Schutz der Beschäftigten vor Gefährdungen durch Lärm und Vibrationen (Lärm- und Vibrations-Arbeitsschutzverordnung-LärmVibrationsArbSchV) vom 06. März 2007
- Buswell, A. M., und Mueller, H. F. (1952): Mechanism of Methane Fermentation, Industrial and Engineering Chemistry, Vol 44, S. 550-552
- 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 modelling. 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
- Dette, 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., Schübler, 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 (2011) DIN EN ISO 3744 – Akustik, Bestimmung der Schalleistungs- und Schallenergiepegel von Geräuschquellen aus Schalldruckmessungen
- 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
- Deutsches Institut für Normung (1982) DIN 4760: Gestaltabweichungen
- 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
- Donner, J. (2009): Ausbereitung schwefelwasserstoffhaltiger Wässer durch katalytische Oxidation an porphyrinmodifizierten kohlenstoffhaltigen Materialien. Dissertation, Technische Universität Dresden, Dresden
- Dräger Safety AG & Co. KGaA (2009): <http://www.draeger.com>, eingesehen am 20.11.2014
- 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 (2011) Merkblatt DWA-A 199 Teil 2: Dienst- und Betriebsanweisung für das Personal von Abwasseranlagen, Teil 2: Betriebsanweisung für das Personal von Kanalnetzen und Regenwasserbehandlungsanlagen. Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall e. V. (Hrsg.), Ges. zur Förderung der Abwassertechnik (GFA), Hennef
- DWA (2013) Merkblatt DWA-M 145-1: Kanalinformationssysteme-Teil 1: Grundlagen und systemtechnische Anforderungen
- 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
- 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
- Elwas-web (2015) <http://www.elwasweb.nrw.de/elwas-web/index.jsf#>
- Envirosight, LCC (2011) QuickView Zoomkamera, www.envirosight.com

- Envirosight, LCC (2014) QuickView Zoomkamera, www.envirosight.com
- EU-Richtlinie 91/271/EWG (1991) Über die Behandlung von kommunalem Abwasser.
- EU-Richtlinie 2000/14/EG (2000) Angleichung der Rechtsvorschriften der Mitgliedstaaten über umweltbelastende Geräuschemissionen von zur Verwendung im Freien vorgesehenen Geräten und Maschinen
- 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
- Firmeninformation ELAFLEX (2014) Katalog 2014 – Hochdruckschläuche, www.elaflex.de
- 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
- FTK-Forschungsinstitut für Telekommunikation (2006) Informationen auf der Internetseite des Electronic Commerce Info Net, www.ecin.de
- 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
- Gerber, M. (2009): Ganzheitliche stoffliche und energetische Modellierung des Biogasbildungsprozesses. Dissertation, Ruhr-Universität Bochum, Bochum
- 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, Vol. 60, S. 901 – 908
- Greve, T. (2005) Transpondertechnologie bewährt sich in der Praxis. bi UmweltBau
- Guisasola, A.; de Haas, D.; Keller, J.; Yuan, Zh. (2008): Methane Formation in Sewer Systems. Water Research, Vol. 42, S. 1421 – 1430
- Harting, K. (12/2006) Abwasserdruckleitungen-Möglichkeiten und Verfahren zur Reinigung. Kurzbericht des IKT – Institut für Unterirdische Infrastruktur

- Hebel, U. (2014) Betriebsführungssysteme – Vorgehensweise bei der Anschaffung?, Vortrag im Rahmen des IKT-Workshops „Betriebsführungssysteme und Kanaldatenbanken, Stuttgart, unveröffentlicht
- Hvitved-Jacobsen, Th.; Vollertsen, J.; Nielsen, P.H. (2002): Sewer Processes: Microbial and Chemical Process Engineering of Sewer Networks. CRC Press Inc., Boca Raton, ISBN: 978-1439881774
- Hvitved-Jacobsen, Th.; Vollertsen, J.; Nielsen, P.H. (1998): A process and model concept for microbial wastewater transformation in gravity sewers, Water Science & Technology, Vol. 37, S. 233 - 241
- IBAK GmbH (2011) TV-Inspektionskamerawagen – Produktübersicht. www.ibak.de
- IKT (2007), Protokoll der ersten Diskussionsrunde am 21. Juni 2007 zur vorliegenden Diplomarbeit „Entwicklung einer bedarfsgerechten Reinigungsstrategie für eine mittelgroße Stadt in NRW“, Hemer
- Industrial Scientific (2014): Elektrochemische Sensoren, <http://www.indsci.de/Dienstleistungen/schulungen/wissenswertes-zu-gasen/electrochemischer-sensor/>, eingesehen am 20.11. 2014
- 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
- Jessel, W. (2001): Gase – Dämpfe – Gasesstechnik Handbuch für die Anwendung und Auslegung sicherheitsgerichteter Gaswarnanlagen, Dräger Safety AG & Co. KGaA, Lübeck, ISBN 3-9808076-0-6
- 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
- Kanalreinigungsarbeiten Gladbeck (2014) Begleitung der Kanalreinigungsarbeiten der Stadt Gladbeck vom 15.04.2014
- Kanalreinigungsarbeiten Velbert (2014) Begleitung der Kanalreinigungsarbeiten der Technischen Betriebe Velbert vom 31.03.2014
- 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
- KEG Kanalreinigungstechnik GmbH (2014) 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 (2013) Verordnung zur Selbstüberwachung von Abwasseranlagen. Selbstüberwachungsverordnung Abwasser – SüwVO Abw
- Land Nordrhein-Westfalen (2013) 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
- Liu, Y., Ni, B.-J., Ganigué, R., Werner, U., Sharma, K. R., Yuan, Zh. (2015): Sulfide and Methane Production in Sewer Sediment. *Water Research*, Vol. 70, S. 550 – 359
- Lohse, M. (1986) Schwefelverbindungen in Abwasserableitungsanlagen unter besonderer Berücksichtigung der biogenen Schwefelsäurekorrosion. In: Veröffentlichungen des Institutes für Siedlungswasserwirtschaft der Universität Hannover, Heft 62
- Lübken, M.; Gehring, T.; Wichern, M. (2010): Microbiological Fermentation of lignocellulosic Biomass: current State and Prospects of Mathematical Modeling. *Applied Microbiology Biotechnology*, Vol. 85, S. 1643-1652
- 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 Grundlagen 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) Anforderungen 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)
- Momber, A. (1993) Handbuch Druckwasserstrahl Technik; Beton Verlag, Düsseldorf
- Mortimer, Ch. E. und Müller, U. (2014): Chemie das Basiswissen der Chemie. 11. Auflage, Georg Thieme Verlag, Stuttgart, New York, ISBN 9783134843118
- Müller, C., Wansing, P. und Vogt, H.-J. (2011) Präsentation beim Workshop „Betriebsführungssysteme 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
- Nielsen, A. H.; Vollertsen, J.; Stokbro Jensen, H.; Madsen, H. I.; Hvitved-Jacobsen, Th. (2006): Aerobic and Anaerobic Transformations of Sulfide in a Sewer System – Field Study and Model Simulations. *Water Environment Research*, Vol. 80, S. 16-25

- 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 Erfassung von Tätigkeiten in der Kanalisation. Vortrag. Gelsenkirchen
- Ostmann, R. (2011) Störfallmeldung bei der IKT-Betreiber-Hotline für Störfälle
- Peu, P.; Picard, S.; Diara, A.; Girault, R.; Béline, F.; Bridoux, G.; Dabert, P. (2012): Prediction of Hydrogen Sulphide during Anaerobic Digestion of organic Substrates. *Bioresource Technology*, Vol. 121, S. 419 – 424.
- Pisano, W. C. (1996) Summary: United States "Sewer solids" settling characterization 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
- P&W Umwelttechnik GmbH (2014) Übersicht des Produktes: Die Sehende Nordseedüse. www.pw-umwelttechnik.de
- Reuber, J. (2004) Physikalische und numerische Simulation von Stauraumkanälen mit unten liegender Entlastung. Rheinisch-Westfälische Technische Hochschule Aachen, Aachen.
- Ries, T. (1993): Reduzierung der Schwefelwasserstoffbildung im Faulraum durch Zugabe von Eisenchlorid. Schriftenreihe der Siedlungswasserwirtschaft Bochum, Band 25
- 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.
- Saračević, E (2009): Zur Kenntnis der Schwefelwasserstoffbildung und -vermeidung in Abwasserdruckleitungen. Dissertation, Technischer Universität Wien, Wien
- Schaffner, J. (2010) Numerische Modellierung des Einflusses von Unterwasserständen auf die Effektivität von Spülwellen. In: Technische Universität Darmstadt (Hrsg.) DAWAKO-Darmstädter Wasserbauliches Kolloquium. Schwallspülmessungen in Abwasserkanälen und angeschlossenen Gewässern. Sammlung Abstracts, Darmstadt
- Schlüter, M. (2005) Handbuch Kanalreinigung: IKT-Institut für Unterirdische Infrastruktur, Gelsenkirchen
- Schmitt, F., und Seyfried, C., (1992): Sulfate Reduction in Sewer Sediments. Water Science and Technology, Vol. 25, S. 83-90
- 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
- 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
- Svardal, K. (1991): Anaerobe Abwasserreinigung – Ein Modell zur Berechnung und Darstellung der maßgebenden chemischen Parameter. Wiener Mitteilungen, Band 95

- 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
- Tanaka, N.; Hvitved-Jacobsen, T. (2001): Sulfide Production and Wastewater Quality – Investigations in a Pilot plant Pressure Sewer. *Water Science and Technology*, Vol. 43, S. 129-136.
- 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
- Treinen, M. (2014a) Experteninterview Herr Bauer (KasselWasser) vom 11.08.2014, IKT-Institut für Unterirdische Infrastruktur
- Treinen, M. (2014b) Experteninterview Herr Späth (Münchner Stadtentwässerung) vom 20.05.2014, IKT-Institut für Unterirdische Infrastruktur
- Treinen, M. (2014c) Experteninterview Herr Wesselborg (Tiefbauamt Bottrop) vom 27.06.2014, IKT-Institut für Unterirdische Infrastruktur
- Treinen, M. (2014d) Onlineumfrage „Bedarfsorientierte Kanalreinigung“, IKT-Institut für Unterirdische Infrastruktur
- 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
- van Laak, B. (2014) „Bedarfsorientierte Kanalreinigung – Entwicklung einer Arbeitshilfe für die Bewertung der Ablagerungssituation in kommunalen Abwassernetzen und eines Entscheidungsmodells für die Anschaffung von EDV-Systemen“, IKT-Institut für Unterirdische Infrastruktur
- van Laak, B. (2014a) Protokolle zur Reinigungsbegleitung der Stadt Gladbeck vom 15.04.2014 und 24.04.2014, IKT-Institut für Unterirdische Infrastruktur
- van Laak, B. (2014b) Protokolle zur Reinigungsbegleitung der Stadt Herne vom 12.06.2014 und 23.07.2014, IKT-Institut für Unterirdische Infrastruktur
- van Laak, B. (2014c) Protokolle zur Reinigungsbegleitung der technischen Betriebe Velbert vom 31.03.2014 und 01.04.2014, IKT-Institut für Unterirdische Infrastruktur
- 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
- Verein Deutscher Ingenieure (VDI) 4630 (2012): Vergärung organischer Stoffe-Substratcharakterisierung, Probenahme, Stoffdatenerhebung, Gärversuche. Beuth Verlag GmbH, Berlin

- 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
- Wielenberg, M. (1996) Reinigung von Abwasserkanälen durch Hochdruckspülung; Vulkan-Verlag, Essen, 1996
- 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.
- Zustands-, Prozess- und Wirkungsanalyse zur Entwicklung einer bedarfsorientierten Reinigungsstrategie für Kanalnetze (2008), Bochum, Dezember 2008

Anhang K – Kostenberechnungsbeispiele

K 1 Berechnungsannahmen

Kostensätze für

Betriebspersonal: 35 TEuro

Sachbearbeiter: 45 TEuro

Werkleitung: 60 TEuro

Kanalreinigungsfahrzeug 400 TEuro

Intervallanpassung für bedarfsorientierte Reinigungsstrategie nach Abschnitt 6.3.2, Tabelle 52.

Zinssatz für Abzinsung: 3%

K 2 Betreiberprofil – IV-50

- **10.000 EW, > 50 km, Fremdleister** → mehr Kontrolle für Intervallverlängerung
- **Variante 1 (50-BKR):** Bedarfsorientierte Reinigung mit Intervallverlängerung nach Abschnitt 6.3.2, Tabelle 52
- **Variante 2 (50-NV):** Weiter wie bisher

Prozesse beschreiben

Variante 1 (50-BKR):

Die Prozesse werden im ersten Jahr durch den Sachbearbeiter (0,5 PMon – 45 TEuro/a) auf Grundlage von Interviews mit dem Betriebspersonal (0,2 PMon – 35 TEuro/a) beschrieben. Besondere Investitionen sind nicht erforderlich. Für Verbrauchsmaterialien werden pauschal 0,25 TEuro/a angesetzt. Ähnliche Kosten für die Fortschreibung der Prozessbeschreibung werden nach Abschluss der Einführungsphase (Ende 2. Jahr) für 0,2 PMon angesetzt. Weitere Kosten für die Prozesskontrolle werden jährlich mit 1 Woche Sachbearbeiter angesetzt.

Variante 2 (50-NV):

Es fallen keine Kosten an.

Kostenbetrachtung

Variante 1 (50-BKR):

Begleitend zur Prozessbeschreibung wird eine Kostenbetrachtung durch den betriebsinternen Kanalbetriebsmanager/Sachbearbeiter anhand der vorliegenden Arbeitshilfe durchgeführt (ca. 25% des Aufwandes für die Prozessbeschreibung durch Sachbearbeiter). Einsparpotentiale werden ermittelt.

Variante 2 (50-NV):

Es fallen keine Kosten an.

Entscheidungsvorbereitung

Variante 1 (50-BKR):

Die Entscheidung durch den Werksausschuss wird durch die Werkleitung in Abstimmung mit Sachbearbeitung und Personalrat auf Grundlage der Prozessbeschreibung und Kostenbetrachtung vorbereitet (ca. 0,5 PMon – Mischkostenansatz: 60 TEuro/a).

Variante 2 (50-NV):

Es fallen keine Kosten an.

Abstimmung mit Überwachungsbehörden

Variante 1 (50-BKR):

Die Einführung einer bedarfsorientierten Kanalreinigungsstrategie mit den Überwachungsbehörden erfolgt durch die Sachbearbeitung nach Abstimmung mit der Werkleitung. Der Aufwand wird als vergleichbar mit der Entscheidungsvorbereitung angesetzt (ca. 0,5 PMon – Mischkostenansatz: 60 TEuro/a).

Variante 2 (50-NV):

Es fallen keine Kosten an.

Ablauforganisation anpassen

Variante 1 (50-BKR):

Hier fällt der wesentliche Aufwand für die Entwicklung und Organisation der bedarfsorientierten Reinigung an. Betroffen sind die Werkleitung (einschließlich Betriebsrat) (1 PMon – 60 TEuro/a) und die Sachbearbeitung/Kanalbetriebsmanagement (2 PMon – 45 TEuro/a).

Variante 2 (50-NV):

Es fallen keine Kosten an.

Aufgaben und Stellen und definieren

Variante 1 (50-BKR):

Hier fällt der wesentliche Aufwand für die Umsetzung der Organisationsentwicklung an. Betroffen sind die Werkleitung (einschließlich Betriebsrat) (0,25 PMon – 60 TEuro/a) und die Sachbearbeitung/Kanalbetriebsmanagement (0,5 PMon – 45 TEuro/a).

Variante 2 (50-NV):

Es fallen keine Kosten an.

Kommunikation der neuen Betriebsstrategie

Variante 1 (50-BKR):

Die begleitende Kommunikation zwischen Kanalbetriebsmanagement (0,1 PMon – 45 TEuro/a) und ausführendem Betriebspersonal (2 Personen x 0,15 PMon – 35 TEuro/a) umfasst die Vermittlung von Zielsetzungen, Verantwortungsbereichen und Tätigkeitsschwerpunkten. Vertiefte Informationen werden im Rahmen der Schulungen gegeben. Dieser Aufwand fällt jeweils in den ersten zwei Jahren an, und wird anschließend mit dem halben Ansatz fortgeschrieben.

Variante 2 (50-NV):

Es fallen keine Kosten an.

Fahrzeug-Check

Variante 1 (50-BKR):

Es wird von einem Fremdleister-Fahrzeug ausgegangen, das einem Fahrzeug-Check unterzogen wird (je Fahrzeug: 0,25 PMon, Personal (35 TEURO/a), 1,5 TEURO Leistung Dritter, Betriebsmittel 0,250 TEURO). Prüfung zunächst im Zwei-Jahresrythmus (3x), danach Drei-Jahresrythmus.

Variante 2 (50-NV):

Es fallen keine Kosten an, da auf einen Fahrzeugcheck als Leistungsüberprüfung verzichtet wird.

Instrumente zur Ablagerungsbewertung

Variante 1 (50-BKR):

Beschaffung z.B. Kanalspiegels (2 TEuro), Einsatzdauer 5 Jahre. Es wird aufgrund der Netzgröße von der Anschaffung eines verhältnismäßig günstigen Systems ausgegangen.

Variante 2 (50-NV):

Es fallen keine Kosten an.

Mobile Datenerfassungsgeräte

Variante 1 (50-BKR):

Es fallen keine Kosten an. Aufwendungen sind in den Kosten für die Fremdleistung enthalten.

Variante 2 (50-NV):

Es fallen keine Kosten an.

Spülplanungstools

Variante 1 (50-BKR):

Aufgrund der Betreibergröße ist keine EDV-Unterstützung durch KIS/BFS notwendig. Es wird von einer eigenen Datenbank ausgegangen. Weitere Leistungen werden vom Fremdleister erbracht. Geschätzt wird der einmalige Aufwand für entsprechende Personalleistung für die Einrichtung (ca. 0,5 PMon intern; 45 TEuro/a). Jährliche Kosten in Höhe von 0,1 PMon Sachbearbeiter entstehen durch die Pflege der Datenbank.

Variante 2 (50-NV):

Es fallen keine Kosten an, da alle Leistungen über den Dienstleister abgedeckt sind. Diese sind in den Aufwendungen für die Kanalreinigung enthalten.

Störfall- und Beschwerdebearbeitung

Variante 1 (50-BKR):

Eine Störfallbearbeitung wird aufgrund der Betreibergröße mittels Papierprotokollen und Telefon-Hotline gewährleistet. Dazu werden Aufwendungen für Personalleistung und Einrichtung (ca. 0,1 PMon intern; 45 TEuro/a). Zusätzlich werden jährlich pauschal 0,2 TEuro für Materialverbrauch und Telefonkosten angesetzt.

Variante 2 (50-NV):

Es fallen keine Kosten für zusätzliche Software an.

Betriebspersonal: Überwachen und Bewerten**Variante 1 (50-BKR):**

In der Einführungsphase wird das Betriebspersonal gesondert geschult und auf die Überwachung des Fremdleisters sowie die neuen Betriebsprozesse vorbereitet. Aufwand entsteht für Personaleinsatz des Betriebspersonals (2 x 0,5 PMon – 35 TEuro), interne Schulungsleitung durch die Sachbearbeitung (0,5 PMon – 45 TEuro) sowie Leistungen Dritter (1 TEuro). Nachschulungen im Zwei-Jahresrythmus (jeweils 1/2 des Personals).

Variante 2 (50-NV):

Für Fort- und Weiterbildungen entsteht jährlich Aufwand für den Personaleinsatz (Betriebspersonals 1 x 0,5 PMon – 35 TEuro), interne Schulungsleitung durch die Sachbearbeitung entfallen. Es werden Leistungen Dritter (1 TEuro) in Anspruch genommen. Nachschulungen im Vier-Jahresrythmus (jeweils 1/2 des Personals).

Sachbearbeiter: EDV-Spül-/Einsatzplanung**Variante 1 (50-BKR):**

Einführung in den EDV-Einsatz (eigene Datenbank) wird zweijährlich mit 0,25 PMon Sachbearbeiter (45 TEuro) angesetzt. Aufwand für Schulung der Sachbearbeitung entfallen.

Variante 2 (50-NV):

Es fallen keine Kosten an.

Kanalbetriebsmanager: Kommunikation, Ziele, Aufgaben**Variante 1 (50-BKR):**

Personalaufwand für Führungsaufgaben: In der Einführungsphase der ersten beiden Jahre wird dieser Aufwand auf ca. 1 PMon/a (45 TEuro/a) geschätzt, anschließend in der Umsetzung auf 0,5 PMon/a (45 TEuro/a) (Überwachung Fremdleistung).

Variante 2 (50-NV):

Personalaufwand für Führungsaufgaben: Der Aufwand wird auf ca. 0,5 PMon/a (45 TEuro/a) geschätzt.

Inspektion und Kontrolle**Variante 1 (50-BKR):**

Für die Erhebung von Ablagerungsdaten per Schachtkontrolle wird ein Mitarbeiter eingesetzt. Dabei dient die Kontrolle der Überwachung des Fremdleisters und wird hier mit einem Aufwand von $0,5 \cdot \text{PMon}$ (35 TEuro/a) angesetzt. Dieser reduziert sich nach 2 Jahren auf die Hälfte und nach 10 Jahren entfällt dieser Aufwand ganz. Fahrzeugkosten werden in diesem Zeitraum zu 2 TEuro/a angesetzt.

Variante 2 (50-NV):

Es fallen keine Kosten an.

Bewertung der Ablagerungssituation**Variante 1 (50-BKR):**

Die Bewertung mit Risikoabschätzung (Intervallempfehlung) wird unmittelbar durch den Fremdleister im Zuge von der Reinigung umgesetzt. Zusatzaufwand ist in den Kosten für die Kanalreinigung enthalten. Die Plausibilitätskontrollen durch den Sachbearbeiter werden auf 1 Woche/a (45 TEuro/a) abgeschätzt. Nach 10 Jahren entfallen diese Kosten.

Variante 2 (50-NV):

Es fallen keine Kosten an.

Einsatzplanung**Variante 1 (50-BKR):**

Der Aufwand für die Einsatzplanung durch den Sachbearbeiter entfallen. Dieser ist in den Kanalreinigungskosten des Fremdleisters enthalten.

Variante 2 (50-NV):

Es fallen keine Kosten an.

Kanalreinigung**Variante 1 (50-BKR):**

Eigene Personal- und Fahrzeugkosten entstehen nicht. Die Aufwendungen für Fremdreinigung werden aufgrund der Netzlänge auf jährlich 25 TEuro geschätzt ($0,5 \cdot 50\text{km} \cdot 1 \text{ TEuro/km}$). Das beinhaltet am Anfang ein Reinigungsintervall von zwei Jahren. Danach wird das Intervall gemäß Abschnitt 6.3.2, Tabelle 52 verlängert. Für die zusätzlichen Aufwendungen der bedarfsorientierten Reinigungsstrategie wird ein Zuschlag nach Coburg (2006) von 20% auf die Fremdleistung aufgeschlagen.

Variante 2 (50-NV):

Eigene Personal- und Fahrzeugkosten entstehen nicht. Die Aufwendungen für Fremdreinigung werden aufgrund der Netzlänge auf jährlich 25 TEuro geschätzt ($0,5 \cdot 50 \text{ km} \cdot 1 \text{ TEuro/km}$). Das beinhaltet ein festes Reinigungsintervall von zwei Jahren.

K 3 Betreiberprofil III-200

- **40.000 EW, > 200 km, ein Fahrzeug** => Übergang zu Fremdleistung nach abgeschlossener Intervallverlängerung (Kenntnisgewinn abgeschlossen)
- **Variante 1 (200-BKR):** Bedarfsorientierte Reinigung mit Intervallverlängerung nach Abschnitt 6.3.2, Tabelle 52: Intervallverlängerung, Zeitlicher Verlauf, Erfahrungsbeispiel
- **Variante 2 (200-NV):** Weiter wie bisher

Prozesse beschreiben**Variante 1 (200-BKR):**

Die Prozesse werden im ersten Jahr durch den Sachbearbeiter (1 PMon – 45 TEuro/a) auf Grundlage von Interviews mit dem Betriebspersonal (1 PMon – 35 TEuro/a) beschrieben. Besondere Investitionen sind nicht erforderlich. Für Verbrauchsmaterialien werden pauschal 1 TEuro/a angesetzt. Ähnliche Kosten für die Fortschreibung der Prozessbeschreibung werden nach Abschluss der Einführungsphase (Ende 2. Jahr) für 0,5 PMon angesetzt. Weitere Kosten über für die Prozesskontrolle werden jährlich mit 1 Woche Sachbearbeiter angesetzt.

Variante 2 (200-NV):

Es fallen keine Kosten an.

Kostenbetrachtung**Variante 1 (200-BKR):**

Begleitend zur Prozessbeschreibung wird eine Kostenbetrachtung durch den betriebsinternen Kanalbetriebsmanager/Sachbearbeiter anhand der vorliegenden Arbeitshilfe durchgeführt (ca. 25% des Aufwandes für die Prozessbeschreibung durch Sachbearbeiter). Einsparpotentiale werden ermittelt.

Variante 2 (200-NV):

Es fallen keine Kosten an.

Entscheidungsvorbereitung**Variante 1 (200-BKR):**

Die Entscheidung durch den Werksausschuss wird durch die Werkleitung in Abstimmung mit Sachbearbeitung und Personalrat auf Grundlage der Prozessbeschreibung und Kostenbetrachtung vorbereitet (ca. 1 PMon – Mischkostenansatz: 60 TEuro/a).

Variante 2 (200-NV):

Es fallen keine Kosten an.

Abstimmung mit Überwachungsbehörden**Variante 1 (200-BKR):**

Die Einführung einer bedarfsorientierten Kanalreinigungsstrategie mit den Überwachungsbehörden erfolgt durch die Sachbearbeitung nach Abstimmung mit der Werkleitung. Der Aufwand wird als vergleichbar mit der Entscheidungsvorbereitung angesetzt (ca. 1 PMon – Mischkostenansatz: 60 TEuro/a).

Variante 2 (200-NV):

Es fallen keine Kosten an.

Ablauforganisation anpassen**Variante 1 (200-BKR):**

Hier fällt der wesentliche Aufwand für die Entwicklung und Organisation der bedarfsorientierten Reinigung an. Betroffen sind die Werkleitung (einschließlich Betriebsrat) (1 PMon – 60 TEuro/a) und die Sachbearbeitung/Kanalbetriebsmanagement (4 PMon – 45 TEuro/a).

Variante 2 (200-NV):

Es fallen keine Kosten an.

Aufgaben und Stellen und definieren**Variante 1 (200-BKR):**

Hier fällt der wesentliche Aufwand für die Umsetzung der Organisationsentwicklung an. Betroffen sind die Werkleitung (einschließlich Betriebsrat) (0,25 PMon – 60 TEuro/a) und die Sachbearbeitung/Kanalbetriebsmanagement (0,5 PMon – 45 TEuro/a).

Variante 2 (200-NV):

Es fallen keine Kosten an.

Kommunikation der neuen Betriebsstrategie

Variante 1 (200-BKR):

Die begleitende Kommunikation zwischen Kanalbetriebsmanagement (0,25 PMon – 45 TEuro/a) und ausführendem Betriebspersonal (12 Personen x 0,25 PMon – 45 TEuro/a) umfasst die Vermittlung von Zielsetzungen, Verantwortungsbereichen und Tätigkeitsschwerpunkten. Vertiefte Informationen werden im Rahmen der Schulungen gegeben. Dieser Aufwand fällt jeweils in den ersten zwei Jahren an, und wird anschließend mit dem halben Ansatz fortgeschrieben.

Variante 2 (200-NV):

Es fallen keine Kosten an.

Fahrzeug-Check

Variante 1 (200-BKR):

Es wird von einem Fahrzeug ausgegangen, das einem Fahrzeug-Check unterzogen wird (je Fahrzeug: 0,25 PMon eigenes Personal (35 TEURO/a), 1,5 TEURO Leistung Dritter, Betriebsmittel 0,250 TEURO). Prüfung zunächst im Zwei-Jahresrhythmus (3x), danach Drei-Jahresrhythmus. Nach dem 10. Jahr entfällt das eigene Reinigungsfahrzeug und ein Fahrzeug-Check ist nicht mehr als Aufwand zu kalkulieren.

Variante 2 (200-NV):

Es wird von einem Fahrzeug ausgegangen, das einem Fahrzeug-Check unterzogen wird (je Fahrzeug: 0,25 PMon eigenes Personal (35 TEURO/a), 1,5 TEURO Leistung Dritter, Betriebsmittel 0,250 TEURO). Prüfung im Drei-Jahresrhythmus.

Instrumente zur Ablagerungsbewertung

Variante 1 (200-BKR):

Beschaffung z.B. einer Schachtskamera bzw. eines elektronischen Kanalspiegels (10 TEuro), Einsatzdauer 5 Jahre. Es wird von der Anschaffung eines verhältnismäßig günstigen Systems ausgegangen.

Variante 2 (200-NV):

Es fallen keine Kosten an.

Mobile Datenerfassungsgeräte

Variante 1 (200-BKR):

Regelmäßige Beschaffung (Drei-Jahresrythmus) von Geräten (1,5 TEuro) je Fahrzeug (1x). Ab dem 10. Jahr werden aufgrund der Abschaffung des Reinigungsfahrzeugs keine eigenen mobilen Geräte mehr benötigt.

Variante 2 (200-NV):

Regelmäßige Beschaffung (Drei-Jahresrythmus) von Geräten (1,5 TEuro) je Fahrzeug (1x).

Spülplanungstools

Variante 1 (200-BKR):

Aufgrund der Betreibergröße können bestehende KIS-Lösungen mitgenutzt werden. Ggf. ist eine Beschaffung und Anpassung von Fachschalen und Lizenzbedingungen sowie Einrichtung entsprechender Arbeitsplätze notwendig. Geschätzt wird Aufwand (alle 8 Jahre) für diese zusätzliche EDV-Investition (ca. 10 TEuro) und entsprechende Personalleistung für die Beschaffung und Einrichtung (ca. 1,5 PMon intern; 45 TEuro/a). Hinzu kommen jährliche Wartungs- und Supportkosten von ca. 1,5 TEuro/a als Leistung Dritter).

Variante 2 (200-NV):

Aufgrund der Betreibergröße entstehen hier keine zusätzlichen Kosten für EDV-Unterstützung der Kanalreinigung. Es wird von jährlichen Kosten in Höhe von 0,5 TEuro ausgegangen (Verbrauchsmaterial, Arbeitsplatz, etc.)

Störfall- und Beschwerdebearbeitung

Variante 1 (200-BKR):

Aufgrund der Betreibergröße können auch hier bestehende KIS-Lösungen mitgenutzt werden. Geschätzt wird der Aufwand (alle 8 Jahre) für ein zusätzliches EDV-Modul (Investition ca. 5 TEuro (einfaches System)) und entsprechende Personalleistung für die Beschaffung und Einrichtung (ca. 0,15 PMon intern; 45 TEuro/a). Hinzu kommen zusätzliche jährliche Wartungs- und Supportkosten von ca. 0,15 TEuro/a als Leistung Dritter).

Variante 2 (200-NV):

Es fallen keine Kosten für zusätzliche Software an.

Betriebspersonal: Überwachen und Bewerten**Variante 1 (200-BKR):**

In der Einführungsphase wird das Betriebspersonal gesondert geschult und auf die neuen Betriebsprozesse vorbereitet. Aufwand entsteht für Personaleinsatz des Betriebspersonals (12 x 0,5 PMon – 35 TEuro), interne Schulungsleitung durch die Sachbearbeitung (1 PMon – 45 TEURO) sowie Leistungen Dritter (2,5 TEuro). Nachschulungen im Drei-Jahresrythmus (jeweils 1/3 des Personals).

Variante 2 (200-NV):

Für Fort- und Weiterbildungen entsteht jährlich Aufwand für den Personaleinsatz (Betriebspersonals 2 x 0,5 PMon – 35 TEuro), interne Schulungsleitung durch die Sachbearbeitung (0,25 PMon – 45 TEURO) sowie Leistungen Dritter (1,5 TEuro). Nachschulungen im Drei-Jahresrythmus (jeweils 1/3 des Personals).

Sachbearbeiter: EDV-Spül-/Einsatzplanung**Variante 1 (200-BKR):**

Einführung in den EDV-Einsatz. Aufwand für Schulung der Sachbearbeitung (0,25 PMon – 45 TEuro) sowie Leistungen Dritter (abgedeckt durch Anschaffung EDV). Regelmäßige Anwendertreffen und Wissensupdates (ca. 1 TEuro/a Leistungen Dritter).

Variante 2 (200-NV):

Regelmäßige Anwendertreffen und Wissensupdates entfallen, da keine zusätzliche Software genutzt wird. Es wird ein Aufwand von 1 TEuro jährlich für Weiterbildungsmaßnahmen abgeschätzt.

Kanalbetriebsmanager: Kommunikation, Ziele, Aufgaben

Variante 1 (200-BKR):

Personalaufwand für Führungsaufgaben: In der Einführungsphase der ersten beiden Jahre wird dieser Aufwand auf ca. 1,5 PMon/a (45 TEuro/a) geschätzt, anschließend in der Umsetzung auf 0,5 PMon/a (45 TEuro/a).

Variante 2 (200-NV):

Personalaufwand für Führungsaufgaben: Dieser Aufwand wird auf ca. 0,5 PMon/a (45 TEuro/a) geschätzt.

Inspektion und Kontrolle

Variante 1 (200-BKR):

Für die Erhebung von Ablagerungsdaten per Schachtkontrolle werden z.B. zwei Mitarbeiter ganzjährig eingesetzt. Die Hälfte der Einsätze kann über Synergieeffekte mit der Schachtinspektion und/oder Kanalreinigung selbst erbracht werden. Der Personalaufwand wird daher in den ersten 10 Jahren mit $0,5 \cdot 2 \cdot 12$ PMon (35 TEuro/a) angesetzt. Fahrzeugkosten werden in diesem Zeitraum zu 5 TEuro/a angesetzt. Nach 10 Jahren erfolgt der Umstieg auf einen Fremdleister für die Kanalreinigung. Die entstehenden Kosten sind in dem Aufwand für Kanalreinigungsarbeiten enthalten.

Variante 2 (200-NV):

Es fallen keine Kosten an.

Bewertung der Ablagerungssituation

Variante 1 (200-BKR):

Die Bewertung mit Risikoabschätzung (Intervallempfehlung) wird unmittelbar durch das Betriebspersonal im Zuge von Reinigung und Inspektion ohne besonderen Zusatzaufwand umgesetzt. Die Plausibilitätskontrollen durch den Sachbearbeiter werden auf 1 Woche/a (45 TEuro/a) abgeschätzt.

Variante 2 (200-NV):

Es fallen keine Kosten an.

Einsatzplanung

Variante 1 (200-BKR):

Der Aufwand für die Einsatzplanung durch den Sachbearbeiter wird auf jährlich 0,5 PMon (45 TEuro/a).

Variante 2 (200-NV):

Der Aufwand für die Einsatzplanung durch den Sachbearbeiter wird auf jährlich 0,5 PMon (45 TEuro/a).

Kanalreinigung

Variante 1 (200-BKR):

In den ersten beiden Jahren wird mit einem Fahrzeug jährlich 50% des Netzes gereinigt, um weiterhin das Zwei-Jahresintervall aufrecht zu erhalten. Nach dem zweiten Jahr wird bedarfsorientiert auch mit längeren Intervallen gearbeitet (Linearer Ansatz, Intervallverlängerung entsprechend Abschnitt 6.3.2, Tabelle 52). Fahrzeugkosten (400 TEuro) entstehen für ein Fahrzeug als Anfangsinvestition. Nach 10 Jahren werden die Arbeiten komplett als Leistung Dritter abgerechnet. Hierfür wird der Aufwand aufgrund der Netzgröße zu 80% der Eigenleistungskosten abgeschätzt. Der Personalaufwand liegt in den ersten zehn Jahren bei jährlich $1 \cdot 2,5 \cdot 12$ PMon (35 TEuro), danach entfällt er. Zusätzlich wird bis zum 10. Jahr für Wartungs- und Reparaturzeiten ein Aufwand von 20% der Eigenleistung als Leistung Dritter geschätzt. Die Betriebsmittel in den ersten 10 Jahren werden nach dem Schlüssel 40/40/20 (Fahrzeugkosten/Personalkosten/Betriebsmittel) angesetzt zu 20% der vorgenannten Kosten.

Variante 2 (200-NV):

Es wird eine Reinigungsstrategie mit festgelegten Reinigungsintervallen verfolgt. Dabei wird das gesamte Netz im Zwei-Jahresrhythmus komplett gereinigt. Fahrzeugkosten (400 TEuro) entstehen für ein Fahrzeug als Anfangsinvestition und ein Fahrzeug als Reinvestition nach 10 Jahren (mit Restbuchwert -50% nach weiteren 5 Jahren). Zusätzlich wird ab dem 10. Jahr für Wartungs- und Reparaturzeiten ein Aufwand von 20% der Eigenleistung als Leistung Dritter geschätzt. Der Personalaufwand liegt in bei jährlich $1 \cdot 2,5 \cdot 12$ PMon (35 TEuro). Die Betriebsmittel werden nach dem Schlüssel 40/40/20 (Fahrzeugkosten/Personalkosten/Betriebsmittel) angesetzt zu 20% der vorgenannten Kosten.

K 4 Betreiberprofil II-400

- 80.000 EW, > 400 km, zwei Fahrzeug => Übergang zu einem Fahrzeug (mit Fremdleister für 20% Ausfall)
- **Variante 1 (400-BKR):** Bedarfsorientierte Reinigung mit Intervallverlängerung nach Abschnitt 6.3.2, Tabelle 52
- **Variante 2 (400-NV):** Weiter wie bisher

Prozesse beschreiben**Variante 1 (400-BKR):**

Die Prozesse werden im ersten Jahr durch den Sachbearbeiter (3 PMon – 45 TEuro/a) auf Grundlage von Interviews mit dem Betriebspersonal (3 PMon – 35 TEuro/a) beschrieben. Besondere Investitionen sind nicht erforderlich. Für Verbrauchsmaterialien werden pauschal 2 TEuro/a angesetzt. Ähnliche Kosten für die Fortschreibung der Prozessbeschreibung werden nach Abschluss der Einführungsphase (Ende 2. Jahr) für 1 PMon angesetzt. Weitere Kosten über für die Prozesskontrolle werden jährlich mit 1 Woche Sachbearbeiter angesetzt.

Variante 2 (400-NV):

Es fallen keine Kosten an.

Kostenbetrachtung**Variante 1 (400-BKR):**

Begleitend zur Prozessbeschreibung wird eine Kostenbetrachtung durch den betriebsinternen Kanalbetriebsmanager/Sachbearbeiter anhand der vorliegenden Arbeitshilfe durchgeführt (ca. 25% des Aufwandes für die Prozessbeschreibung durch Sachbearbeiter). Einsparpotentiale werden ermittelt.

Variante 2 (400-NV):

Es fallen keine Kosten an.

Entscheidungsvorbereitung

Variante 1 (400-BKR):

Die Entscheidung durch den Werksausschuss wird durch die Werkleitung in Abstimmung mit Sachbearbeitung und Personalrat auf Grundlage der Prozessbeschreibung und Kostenbetrachtung vorbereitet (ca. 2 PMon – Mischkostenansatz: 60 TEuro/a).

Variante 2 (400-NV):

Es fallen keine Kosten an.

Abstimmung mit Überwachungsbehörden

Variante 1 (400-BKR):

Die Einführung einer bedarfsorientierten Kanalreinigungsstrategie mit den Überwachungsbehörden erfolgt durch die Sachbearbeitung nach Abstimmung mit der Werkleitung. Der Aufwand wird als vergleichbar mit der Entscheidungsvorbereitung angesetzt (ca. 2 PMon – Mischkostenansatz: 60 TEuro/a).

Variante 2 (400-NV):

Es fallen keine Kosten an.

Ablauforganisation anpassen

Variante 1 (400-BKR):

Hier fällt der wesentliche Aufwand für die Entwicklung und Organisation der bedarfsorientierten Reinigung an. Betroffen sind die Werkleitung (einschließlich Betriebsrat) (2 PMon – 60 TEuro/a) und die Sachbearbeitung/Kanalbetriebsmanagement (6 PMon – 45 TEuro/a).

Variante 2 (400-NV):

Es fallen keine Kosten an.

Aufgaben und Stellen und definieren

Variante 1 (400-BKR):

Hier fällt der wesentliche Aufwand für die Umsetzung der Organisationsentwicklung an. Betroffen sind die Werkleitung (einschließlich Betriebsrat) (0,25 PMon – 60 TEuro/a) und die Sachbearbeitung/Kanalbetriebsmanagement (0,5 PMon – 45 TEuro/a).

Variante 2 (400-NV):

Es fallen keine Kosten an.

Kommunikation der neuen Betriebsstrategie

Variante 1 (400-BKR):

Die begleitende Kommunikation zwischen Kanalbetriebsmanagement (0,25 PMon – 45 TEuro/a) und ausführendem Betriebspersonal (20 Personen x 0,25 PMon – 45 TEuro/a) umfasst die Vermittlung von Zielsetzungen, Verantwortungsbereichen und Tätigkeitsschwerpunkten. Vertiefte Informationen werden im Rahmen der Schulungen gegeben. Dieser Aufwand fällt jeweils in den ersten zwei Jahren an, und wird anschließend mit dem halben Ansatz fortgeschrieben.

Variante 2 (400-NV):

Es fallen keine Kosten an.

Fahrzeug-Check

Variante 1 (400-BKR):

Es wird von zwei Fahrzeugen ausgegangen, die einem Fahrzeug-Check unterzogen werden (je Fahrzeug: 0,25 PMon eigenes Personal (35 TEURO/a), 1,5 TEURO Leistung Dritter, Betriebsmittel 0,250 TEURO). Prüfung zunächst im Zwei-Jahresrythmus (3x), danach Drei-Jahresrythmus.

Variante 2 (400-NV):

Es wird von zwei Fahrzeugen ausgegangen, die einem Fahrzeug-Check unterzogen werden (je Fahrzeug: 0,25 PMon eigenes Personal (35 TEURO/a), 1,5 TEURO Leistung Dritter, Betriebsmittel 0,250 TEURO). Prüfung zunächst im Drei-Jahresrythmus.

Instrumente zur Ablagerungsbewertung

Variante 1 (400-BKR):

Beschaffung z.B. einer Schachtskamera bzw. eines elektronischen Kanalspiegels (15 TEuro), Einsatzdauer 5 Jahre.

Variante 2 (400-NV):

Es fallen keine Kosten an.

Mobile Datenerfassungsgeräte

Variante 1 (400-BKR):

Regelmäßige Beschaffung (Drei-Jahresrythmus) von Geräten (1,5 TEuro) je Fahrzeug (2x). Ab dem 10. Jahr werden aufgrund der Reduzierung auf ein Reinigungsfahrzeug nur noch ein mobiles Gerät benötigt (1,5 TEuro)

Variante 2 (400-NV):

Regelmäßige Beschaffung (Drei-Jahresrythmus) von Geräten (1,5 TEuro) je Fahrzeug (2x).

Spülplanungstools

Variante 1 (400-BKR):

Aufgrund der Betreibergröße können bestehende KIS-Lösungen mitgenutzt werden. Ggf. ist eine Beschaffung und Anpassung von Fachschalen und Lizenzbedingungen sowie Einrichtung entsprechender Arbeitsplätze notwendig. Geschätzt wird Aufwand (alle 8 Jahre) für diese zusätzliche EDV-Investition (ca. 15 TEuro) und entsprechende Personalleistung für die Beschaffung und Einrichtung (ca. 3 PMon intern; 45 TEuro/a). Hinzu kommen jährliche Wartungs- und Supportkosten von ca. 2,5 TEuro/a als Leistung Dritter).

Variante 2 (400-NV):

Aufgrund der Betreibergröße können bestehende KIS-Lösungen mitgenutzt werden. Der für die Kanalreinigung anfallende jährliche Aufwand für diese EDV-Unterstützung wird auf ca. 1 TEuro geschätzt. Hinzu kommen jährliche Wartungs- und Supportkosten von 0,5 TEuro/a als Leistung Dritter).

Störfall- und Beschwerdebearbeitung

Variante 1 (400-BKR):

Aufgrund der Betreibergröße können auch hier bestehende KIS-Lösungen mitgenutzt werden. Geschätzt wird Aufwand (alle 8 Jahre) für ein zusätzliches EDV-Modul (Investition ca. 10 TEuro) und entsprechende Personalleistung für die Beschaffung und Einrichtung (ca. 0,25 PMon intern; 45 TEuro/a). Hinzu kommen zusätzliche jährliche Wartungs- und Supportkosten von ca. 0,25 TEuro/a als Leistung Dritter).

Variante 2 (400-NV):

Es fallen keine Kosten für zusätzliche Software an.

Betriebspersonal: Überwachen und Bewerten

Variante 1 (400-BKR):

In der Einführungsphase wird das Betriebspersonal gesondert geschult und auf die neuen Betriebsprozesse vorbereitet. Aufwand entsteht für Personaleinsatz des Betriebspersonals (20 x 0,5 PMon – 35 TEuro), interne Schulungsleitung durch die Sachbearbeitung (2 PMon – 45 TEURO) sowie Leistungen Dritter (4 TEuro). Nachschulungen im Drei-Jahresrhythmus (jeweils 1/3 des Personals).

Variante 2 (400-NV):

Für Fort- und Weiterbildungen entsteht jährlich Aufwand für den Personaleinsatz (Betriebspersonals 5 x 0,5 PMon – 35 TEuro), interne Schulungsleitung durch die Sachbearbeitung (0,5 PMon – 45 TEURO) sowie Leistungen Dritter (4 TEuro). Nachschulungen im Drei-Jahresrhythmus (jeweils 1/3 des Personals).

Sachbearbeiter: EDV-Spül-/Einsatzplanung

Variante 1 (400-BKR):

Einführung in den EDV-Einsatz. Aufwand für Schulung der Sachbearbeitung (0,5 PMon – 45 TEuro) sowie Leistungen Dritter (abgedeckt durch Anschaffung EDV). Regelmäßige Anwendertreffen und Wissensupdates (ca. 1,5 TEuro/a Leistungen Dritter).

Variante 2 (400-NV):

Regelmäßige Anwendertreffen und Wissensupdates (ca. 2 TEuro/a Leistungen Dritter).

Kanalbetriebsmanager: Kommunikation, Ziele, Aufgaben

Variante 1 (400-BKR):

Personalaufwand für Führungsaufgaben: In der Einführungsphase der ersten beiden Jahre wird dieser Aufwand auf ca. 2,5 PMon/a (45 TEuro/a) geschätzt, anschließend in der Umsetzung auf 0,75 PMon/a (45 TEuro/a).

Variante 2 (400-NV):

Personalaufwand für Führungsaufgaben: Dieser Aufwand wird auf ca. 0,75 PMon/a (45 TEuro/a) geschätzt.

Inspektion und Kontrolle

Variante 1 (400-BKR):

Für die Erhebung von Ablagerungsdaten per Schachtkontrolle werden z.B. zwei Mitarbeiter ganzjährig eingesetzt. Die Hälfte der Einsätze kann über Synergieeffekte mit der

Schachtinspektion und/oder Kanalreinigung selbst erbracht werden. Der Personalaufwand wird daher mit $0,5 \cdot 2 \cdot 12$ PMon (35 TEuro/a) angesetzt. Fahrzeugkosten werden zu 5 TEuro/a angesetzt.

Variante 2 (400-NV):

Es fallen keine Kosten an.

Bewertung der Ablagerungssituation

Variante 1 (400-BKR):

Die Bewertung mit Risikoabschätzung (Intervallempfehlung) wird unmittelbar durch das Betriebspersonal im Zuge von Reinigung und Inspektion ohne besonderen Zusatzaufwand umgesetzt. Die Plausibilitätskontrollen durch den Sachbearbeiter werden auf 1 Woche/a (45 TEuro/a) abgeschätzt.

Variante 2 (400-NV):

Es fallen keine Kosten an.

Einsatzplanung

Variante 1 (400-BKR):

Der Aufwand für die Einsatzplanung durch den Sachbearbeiter wird auf jährlich 0,75 PMon (45 TEuro/a).

Variante 2 (400-NV):

Der Aufwand für die Einsatzplanung durch den Sachbearbeiter wird auf jährlich 0,75 PMon (45 TEuro/a).

Kanalreinigung

Variante 1 (400-BKR):

In den ersten beiden Jahren wird mit den zwei Fahrzeugen jährlich 50% des Netzes gereinigt, um weiterhin das Zwei-Jahresintervall aufrecht zu erhalten. Nach dem zweiten Jahr wird bedarfsorientiert auch mit längeren Intervallen gearbeitet (Linearer Ansatz, Intervallverlängerung entsprechend Abschnitt 6.3.2, Tabelle 52). Fahrzeugkosten (400 TEuro) entstehen für zwei Fahrzeuge als Anfangsinvestition und ein Fahrzeug als Reinvestition nach 10 Jahren (mit Restbuchwert -50% nach weiteren 5 Jahren). Zusätzlich wird ab dem 10. Jahr für Wartungs- und Reparaturzeiten ein Aufwand von 20% der Eigenleistung als Leistung Dritter geschätzt. Der Personalaufwand liegt in den ersten zehn Jahren bei jährlich $2 \cdot 2,5 \cdot 12$ PMon (35 TEuro), danach bei

1*2,5*12 PMon (35 TEuro). Die Betriebsmittel werden nach dem Schlüssel 40/40/20 (Fahrzeugkosten/Personalkosten/Betriebsmittel) angesetzt zu 20% der vorgenannten Kosten.

Variante 2 (400-NV):

Es wird eine Reinigungsstrategie mit festgelegten Reinigungsintervallen verfolgt. Dabei wird das gesamte Netz im Zwei-Jahresrhythmus komplett gereinigt. Fahrzeugkosten (400 TEuro) entstehen für zwei Fahrzeuge als Anfangsinvestition und zwei Fahrzeuge als Reinvestition nach 10 Jahren (mit Restbuchwert -50% nach weiteren 5 Jahren). Zusätzlich wird ab dem 10. Jahr für Wartungs- und Reparaturzeiten ein Aufwand von 20% der Eigenleistung als Leistung Dritter geschätzt. Der Personalaufwand liegt in bei jährlich 2*2,5*12 PMon (35 TEuro). Die Betriebsmittel werden nach dem Schlüssel 40/40/20 (Fahrzeugkosten/Personalkosten/Betriebsmittel) angesetzt zu 20% der vorgenannten Kosten.

K 5 Betreiberprofil I-1000

- 200.000 EW, > 1000 km, weitgehend Eigenleistung, vier Fahrzeuge
- **Variante 1 (1000-BKR):** Bedarfsorientierte Reinigung mit Intervallverlängerung nach Abschnitt 6.3.2, Tabelle 52
- **Variante 2 (1000-NV):** Weiter wie bisher

Prozesse beschreiben

Variante 1 (1000-BKR):

Die Prozesse werden im ersten Jahr durch den Sachbearbeiter (3 PMon – 45 TEuro/a) auf Grundlage von Interviews mit dem Betriebspersonal (3 PMon – 35 TEuro/a) beschrieben. Besondere Investitionen sind nicht erforderlich. Für Verbrauchsmaterialien werden pauschal 2 TEuro/a angesetzt. Ähnliche Kosten für die Fortschreibung der Prozessbeschreibung werden nach Abschluss der Einführungsphase (Ende 2. Jahr) für 1 PMon angesetzt. Weitere Kosten über für die Prozesskontrolle werden jährlich mit 1 Woche Sachbearbeiter angesetzt.

Variante 2 (1000-NV):

Es fallen keine Kosten an.

Kostenbetrachtung

Variante 1 (1000-BKR):

Begleitend zur Prozessbeschreibung wird eine Kostenbetrachtung durch den betriebsinternen Kanalbetriebsmanager/Sachbearbeiter anhand der vorliegenden Arbeitshilfe durchgeführt (ca. 25% des Aufwandes für die Prozessbeschreibung durch Sachbearbeiter). Einsparpotentiale werden ermittelt.

Variante 2 (1000-NV):

Es fallen keine Kosten an.

Entscheidungsvorbereitung

Variante 1 (1000-BKR):

Die Entscheidung durch den Werksausschuss wird durch die Werkleitung in Abstimmung mit Sachbearbeitung und Personalrat auf Grundlage der Prozessbeschreibung und Kostenbetrachtung vorbereitet (ca. 2 PMon – Mischkostenansatz: 60 TEuro/a).

Variante 2 (1000-NV):

Es fallen keine Kosten an.

Abstimmung mit Überwachungsbehörden

Variante 1 (1000-BKR):

Die Einführung einer bedarfsorientierten Kanalreinigungsstrategie mit den Überwachungsbehörden erfolgt durch die Sachbearbeitung nach Abstimmung mit der Werkleitung. Der Aufwand wird als vergleichbar mit der Entscheidungsvorbereitung angesetzt (ca. 2 PMon – Mischkostenansatz: 60 TEuro/a).

Variante 2 (1000-NV):

Es fallen keine Kosten an.

Ablauforganisation anpassen

Variante 1 (1000-BKR):

Hier fällt der wesentliche Aufwand für die Entwicklung und Organisation der bedarfsorientierten Reinigung an. Betroffen sind die Werkleitung (einschließlich Betriebsrat) (2 PMon – 60 TEuro/a) und die Sachbearbeitung/Kanalbetriebsmanagement (6 PMon – 45 TEuro/a).

Variante 2 (1000-NV):

Es fallen keine Kosten an.

Aufgaben und Stellen und definieren

Variante 1 (1000-BKR):

Hier fällt der wesentliche Aufwand für die Umsetzung der Organisationsentwicklung an. Betroffen sind die Werkleitung (einschließlich Betriebsrat) (0,25 PMon – 60 TEuro/a) und die Sachbearbeitung/Kanalbetriebsmanagement (0,5 PMon – 45 TEuro/a).

Variante 2 (1000-NV):

Es fallen keine Kosten an.

Kommunikation der neuen Betriebsstrategie

Variante 1 (1000-BKR):

Die begleitende Kommunikation zwischen Kanalbetriebsmanagement (0,25 PMon – 45 TEuro/a) und ausführendem Betriebspersonal (30 Personen x 0,25 PMon – 45 TEuro/a) umfasst die Vermittlung von Zielsetzungen, Verantwortungsbereichen und Tätigkeitsschwerpunkten. Vertiefte Informationen werden im Rahmen der Schulungen gegeben. Dieser Aufwand fällt jeweils in den ersten zwei Jahren an, und wird anschließend mit dem halben Ansatz fortgeschrieben.

Variante 2 (1000-NV):

Es fallen keine Kosten an.

Fahrzeug-Check

Variante 1 (1000-BKR):

Es wird von vier Fahrzeugen ausgegangen, die einem Fahrzeug-Check unterzogen werden (je Fahrzeug: 0,25 PMon eigenes Personal (35 TEURO/a), 1,5 TEURO Leistung Dritter, Betriebsmittel 0,250 TEURO). Prüfung zunächst im Zwei-Jahresrythmus (3x), danach Drei-Jahresrythmus.

Variante 2 (1000-NV):

Es wird von vier Fahrzeugen ausgegangen, die einem Fahrzeug-Check unterzogen werden (je Fahrzeug: 0,25 PMon eigenes Personal (35 TEURO/a), 1,5 TEURO Leistung Dritter, Betriebsmittel 0,250 TEURO). Prüfung zunächst im Drei-Jahresrythmus.

Instrumente zur Ablagerungsbewertung

Variante 1 (1000-BKR):

Beschaffung z.B. einer Schachtskamera bzw. eines elektronischen Kanalspiegels (15 TEuro), Einsatzdauer 5 Jahre.

Variante 2 (1000-NV):

Es fallen keine Kosten an.

Mobile Datenerfassungsgeräte

Variante 1 (1000-BKR):

Regelmäßige Beschaffung (Drei-Jahresrythmus) von Geräten (1,5 TEuro) je Fahrzeug (4x). Ab dem 10. Jahr werden aufgrund der Reduzierung auf zwei Reinigungsfahrzeuge nur noch zwei mobile Geräte benötigt (2*1,5 TEuro)

Variante 2 (1000-NV):

Regelmäßige Beschaffung (Drei-Jahresrythmus) von Geräten (1,5 TEuro) je Fahrzeug (4x).

Spülplanungstools

Variante 1 (1000-BKR):

Aufgrund der Betreibergröße können bestehende KIS/BFS-Lösungen mitgenutzt werden. Ggf. ist eine Beschaffung und Anpassung von Fachschalen und Lizenzbedingungen sowie Einrichtung entsprechender Arbeitsplätze notwendig. Geschätzt wird Aufwand (alle 8 Jahre) für diese zusätzliche EDV-Investition (ca. 60 TEuro) und entsprechende Personalleistung für die Beschaffung und Einrichtung (ca. 6 PMon intern; 45 TEuro/a). Hinzu kommen jährliche Wartungs- und Supportkosten von ca. 5 TEuro/a als Leistung Dritter).

Variante 2 (1000-NV):

Aufgrund der Betreibergröße können bestehende KIS/BFS-Lösungen mitgenutzt werden. Der für die Kanalreinigung anfallende jährliche Aufwand für diese EDV-Unterstützung wird auf ca. 1 TEuro geschätzt. Hinzu kommen jährliche Wartungs- und Supportkosten von 1 TEuro/a als Leistung Dritter).

Störfall- und Beschwerdebearbeitung

Variante 1 (1000-BKR):

Aufgrund der Betreibergröße können auch hier bestehende KIS/BFS-Lösungen mitgenutzt werden. Geschätzt wird Aufwand (alle 8 Jahre) für ein zusätzliches EDV-Modul (Investition ca. 25 TEuro) und entsprechende Personalleistung für die Beschaffung

und Einrichtung (ca. 1 PMon intern; 45 TEuro/a). Hinzu kommen zusätzliche jährliche Wartungs- und Supportkosten von ca. 0,5 TEuro/a als Leistung Dritter).

Variante 2 (1000-NV):

Es fallen keine Kosten für zusätzliche Software an.

Betriebspersonal: Überwachen und Bewerten

Variante 1 (1000-BKR):

In der Einführungsphase wird das Betriebspersonal gesondert geschult und auf die neuen Betriebsprozesse vorbereitet. Aufwand entsteht für Personaleinsatz des Betriebspersonals (30 x 0,5 PMon – 35 TEuro), interne Schulungsleitung durch die Sachbearbeitung (3 PMon – 45 TEURO) sowie Leistungen Dritter (7 TEuro). Nachschulungen im Drei-Jahresrhythmus (jeweils 1/3 des Personals).

Variante 2 (1000-NV):

Für Fort- und Weiterbildungen entsteht jährlich Aufwand für den Personaleinsatz (Betriebspersonals 5 x 0,5 PMon – 35 TEuro), interne Schulungsleitung durch die Sachbearbeitung (0,5 PMon – 45 TEURO) sowie Leistungen Dritter (4 TEuro). Nachschulungen im Drei-Jahresrhythmus (jeweils 1/3 des Personals).

Sachbearbeiter: EDV-Spül-/Einsatzplanung

Variante 1 (1000-BKR):

Einführung in den EDV-Einsatz. Aufwand für Schulung der Sachbearbeitung (1 PMon – 45 TEuro) sowie Leistungen Dritter (abgedeckt durch Anschaffung EDV). Regelmäßige Anwendertreffen und Wissensupdates (ca. 2 TEuro/a Leistungen Dritter).

Variante 2 (1000-NV):

Regelmäßige Anwendertreffen und Wissensupdates (ca. 2 TEuro/a Leistungen Dritter).

Kanalbetriebsmanager: Kommunikation, Ziele, Aufgaben

Variante 1 (1000-BKR):

Personalaufwand für Führungsaufgaben: In der Einführungsphase der ersten beiden Jahre wird dieser Aufwand auf ca. 3 PMon/a (45 TEuro/a) geschätzt, anschließend in der Umsetzung auf 1 PMon/a (45 TEuro/a).

Variante 2 (1000-NV):

Personalaufwand für Führungsaufgaben: Dieser Aufwand wird auf ca. 1 PMon/a (45 TEuro/a) geschätzt.

Inspektion und Kontrolle

Variante 1 (1000-BKR):

Für die Erhebung von Ablagerungsdaten per Schachtkontrolle werden z.B. zwei Mitarbeiter ganzjährig eingesetzt. Die Hälfte der Einsätze kann über Synergieeffekte mit der Schachtinspektion und/oder Kanalreinigung selbst erbracht werden. Der Personalaufwand wird daher mit $0,5 \cdot 2 \cdot 12$ PMon (35 TEuro/a) angesetzt. Fahrzeugkosten werden zu 5 TEuro/a angesetzt.

Variante 2 (1000E-U):

Es fallen keine Kosten an.

Bewertung der Ablagerungssituation

Variante 1 (1000-BKR):

Die Bewertung mit Risikoabschätzung (Intervallempfehlung) wird unmittelbar durch das Betriebspersonal im Zuge von Reinigung und Inspektion ohne besonderen Zusatzaufwand umgesetzt. Die Plausibilitätskontrollen durch den Sachbearbeiter werden auf 1 Woche/a (45 TEuro/a) abgeschätzt.

Variante 2 (1000-NV):

Es fallen keine Kosten an.

Einsatzplanung

Variante 1 (1000-BKR):

Der Aufwand für die Einsatzplanung durch den Sachbearbeiter wird auf jährlich 1 PMon (45 TEuro/a).

Variante 2 (1000-NV):

Der Aufwand für die Einsatzplanung durch den Sachbearbeiter wird auf jährlich 1 PMon (45 TEuro/a).

Kanalreinigung

Variante 1 (1000-BKR):

In den ersten beiden Jahren wird mit den vier Fahrzeugen jährlich 50% des Netzes gereinigt, um weiterhin das Zwei-Jahresintervall aufrecht zu erhalten. Nach dem zweiten Jahr wird bedarfsorientiert auch mit längeren Intervallen gearbeitet (Linearer Ansatz, Intervallverlängerung entsprechend Abschnitt 6.3.2, Tabelle 52). Fahrzeugkosten (400 TEuro) entstehen für vier Fahrzeuge als Anfangsinvestition und zwei Fahrzeuge als Reinvestition nach 10 Jahren (mit Restbuchwert -50% nach weiteren 5 Jahren). Der Personalaufwand liegt in den ersten zehn Jahren bei jährlich $4 \cdot 2,5 \cdot 12$ PMon (35 TEuro), danach bei $2 \cdot 2,5 \cdot 12$ PMon (35 TEuro). Die Betriebsmittel werden nach dem Schlüssel 40/40/20 (Fahrzeugkosten/Personalkosten/Betriebsmittel) angesetzt zu 20% der vorgenannten Kosten.

Variante 2 (1000-NV):

Es wird eine Reinigungsstrategie mit festgelegten Reinigungsintervallen verfolgt. Dabei wird das gesamte Netz im Zwei-Jahresrythmus komplett gereinigt. Fahrzeugkosten (400 TEuro) entstehen für vier Fahrzeuge als Anfangsinvestition und vier Fahrzeuge als Reinvestition nach 10 Jahren (mit Restbuchwert -50% nach weiteren 5 Jahren). Der Personalaufwand liegt in bei jährlich $4 \cdot 2,5 \cdot 12$ PMon (35 TEuro). Die Betriebsmittel werden nach dem Schlüssel 40/40/20 (Fahrzeugkosten/Personalkosten/Betriebsmittel) angesetzt zu 20% der vorgenannten Kosten.

Anlage Protokoll Kanalreinigung

Die nachfolgenden Abbildungen dienen zur besseren Einschätzung der örtlichen Gegebenheiten.

Bildbeispiele zur Bewertung der Ablagerungshöhe



wenig < 10 %



mittel 10 % - 20 %



viel > 20 %

Bildbeispiele zur Bewertung Fließ-/Strömungsverhalten



gleichmäßig



unruhig



langsam

A 2 Risikomatrix

Auswirkung	Risikobewertung				
	unkritisch	kritisch	überfällig		
groß					
mittel					
gering					





Die Risikomatrix macht deutlich, dass Bewertungen von Ablagerungssituationen im Hinblick auf die im Einzelfall erwartbaren Auswirkungen abgestuft werden können. Sind die zu erwartenden negativen Auswirkungen beispielsweise recht groß, können Reinigungsintervalle auch verkürzt werden, obwohl die dokumentierten Ablagerungen vergleichsweise noch gering sind. Sind die zu erwartenden Auswirkungen dagegen eher unbedeutend, kann im Einzelfall auch ein Reinigungsintervall trotz vergleichsweise vieler Ablagerungen beibehalten werden.

A 3 Marktübersicht Schachtkameras






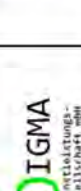

Hersteller	Qin *	EnviroSight (Qintron, EVO) **	E-robotics **	Microm Head **
Produkt	QinView Schachtkamera	QinView Schachtkamera	FullView Schachtkamera	Schachtk. Zoom Kamera
Logo				
Kamera mit Drehung und Teleskop-Länge				
Steuer- und Bedieneinheit				
Abmessungen	200 mm x 100 mm 25 x 45 mm	200 mm x 100 mm 25 x 45 mm	200 mm x 100 mm 25 x 45 mm	200 mm x 100 mm 25 x 45 mm
Grundbeschriftung	<ul style="list-style-type: none"> Kamerakopf mit Drehung Teleskopstange Steuergerät über eine Kabelführung Bedieneinheit zur Kamera- und Langstreckeneinstellung Antennen mit Übertragungseinheit 	<ul style="list-style-type: none"> elektrische Kamerakopf Teleskopstange Steuergerät Bedieneinheit zur Bedienung und Verankerung Langstrecke mit Antenne integriert als Wasserrohr Aufhängesystem (V10 - 200 V AC) 12 m Kabel mit 3 Jahren Garantie Transportkoffer für Kamera, Wasser, Steuergerät, Kabel, Antenne Langstrecke 	<ul style="list-style-type: none"> Kamerakopf Teleskopstange Steuergerät Aufnahme- und Übertragungseinheit 	<ul style="list-style-type: none"> Kamerakopf Überwindet bei Maximal 2,30 m AC 12 V DC 100 m Kabel, SD Card 64GB zur 1000 m Fahrtstrecke 1 Fahrtstrecke 10 m, 4 Übertragungseinheit
Teleskopstange	<ul style="list-style-type: none"> max. Ca. 2 m bis 7 m nach oben verlegbar, fest gesichert mit Stahlfeder Kabelführung Kamerabefestigung durch Absenkerhaken Hilfswinkelstütze mit Schweißnaht 10 m Kabel mit 3 Jahren Garantie max. 10 m bis 100 m 	<ul style="list-style-type: none"> 3,0 m / 1,5 m Kabelleistungs-Teleskop 7,3 m / 1,5 m Kabelleistungs-Teleskop 4,5 m / 1,5 m Kabelleistungs-Teleskop (Gesamtlänge / nutzbarer Länge) > bis 5 m Tiefe feststellbar nach oben verlegbar Kabelführung Hilfswinkelstütze mit Schweißnaht 	<ul style="list-style-type: none"> Standard Teleskopstange bis 6 m Tiefe 1,00 m bis 6,00 m Tiefe feststellbar, Kabel (10 m) nach oben verlegbar Kabelführung Hilfswinkelstütze durch Kamerasystem anklammernde 2x Kabelleistungsstange 	<ul style="list-style-type: none"> Standard Teleskopstange bis 6 m Tiefe festen Koppelstange bis 10 m Tiefe Hilfswinkelstütze Kabelführung
Kamerakopf	<ul style="list-style-type: none"> 1/4" CCD Kamerakopf 432x 2mm (bis optisch und 12x digital) bestmögliche Auflösung 500 TV Linien max. Lichtempfindlichkeit 1.4 lx verschiebbar nach unten Kamerastellung Kameraposition (Druckhöhe ca. 1 m) Vorlauf (Überdruckzone) Hilfswinkelstütze zur Kamerastellung und Fixierung Miner-Hilfswinkel zur manuellen Ausrichtung der Kamera Elektronik mit EX-Schutz nachrüstbar 	<ul style="list-style-type: none"> 1/4" EX-view (HD CCD) Kamerakopf 432x 2mm (bis optisch, 12x digital) max. Lichtempfindlichkeit 1,4 lx elektronische Abblendeblende aus Folie (automatisch / manuell) mit Druckhöhe 1 bis EX-geschützt 	<ul style="list-style-type: none"> Auflösung 1100 x 1000 1/4" CCD Kamerakopf 300x 2mm (bis optisch und 12x digital) Auflösung 1100 x 1000 Lichtempfindlichkeit 0,35 lx Fokus: manuell und automatisch elektrische Kippvorrichtung mit Zielverstellung 	<ul style="list-style-type: none"> Videokamera 750x576, 22x optische, 4x digitale Zoom 4 Schwenkfelder mit je 3 High-View-er LED-Spots Leuchte Abblendeblende 10 m von Objektiv entfernt Kamera manuell 360° drehbar, 90° abschließbar Kabellose Kamerakopf bis 10 m (Optik max. 20 m) Fokus: manuell und automatisch elektronische Abblendeblende aus Folie
Beleuchtung	<ul style="list-style-type: none"> 12 High Flow or LED aktivierbar 	<ul style="list-style-type: none"> 72 hoch MW Xenon Leuchtstrahl 1000 lumen (gesamt) Beleuchtungsstärke Halbtag 1200 K Lichttemperatur 	<ul style="list-style-type: none"> High Efficiency LED-Beleuchtung 	<ul style="list-style-type: none"> 4 LED-Beleuchtungsstrahl 2000 lumen (gesamt) Beleuchtungsstärke
Elektronik	<ul style="list-style-type: none"> Steuerung für den Betrieb zum Bedienen 12 V DC Betrieb Ansteuerung für Fokus, Zoom, Ausblende und Beleuchtung elektronische Gehäuse Farbe für Zoom, Fokus, Blendung elektronische und manuelle Fokus Video (DVI) für externe Monitor oder Audio-Video-Übertragung Flach-panel Kopplung integrierter TFT-Monitor 5,6" Leistungsfähiger SD-Speicheranschluss 	<ul style="list-style-type: none"> Zoom / Fokus / Blendung Auto / Manual Fokus elektronische Beleuchtung (doppelt / einzeln / aus) Minimale Anzeige Mini / Datenmessung (Messung vom Kamerastandort / Schacht Durchmesser, Schacht Tiefe, Spracher / Soft, Mikro, Kalibrierung, Feststimmfunktion) Über die Antenne Erfahrungswerte sind DMS 143/145 Fokus und Videoübertragung CF-Karte Schichtdaten USB, LAN Over-kill 7 kg, beschleunigungsfähig 	<ul style="list-style-type: none"> Minibutton integriert in stabiles Gehäuse Monitor (7" HD-LED) optional (10") Aufzeichnung mit optionalem Digitalrecorder Ein-Aus-Schalter externer Monitor für 120 V Betrieb eingebaute Stromversorgung für Kamerastrom separate Full-Redundanzversorgung für Kamerastrom eingebaute Full-LED-Beleuchtung SD-Speicheranschluss 	<ul style="list-style-type: none"> Defekte Standard-Überwinden mit Nachsch. Frageprot. integrierte Ingerichtungsgeber TFT-Monitor 6,4" Kamerastellung (Zoom, Fokus, elektronisch / manuell) über Joystick LED-Schwerer für genauere elektronische Einblendeblende St. Indikatoren (LED, V/A/H, Video) SD-Speicheranschluss Erfahrungswerte für Live-Übertragung Standard-Videoübertragung DVI für externe Displays
Mögliche Stromversorgung	<ul style="list-style-type: none"> Netzteil 230 V AC / 0 V DC mit 10 m Stromversorgungsleitung 12 V mit Lancia-Schleife Altko - Fire in Fleck output 12 V DC / 200 W AC Fire-Modul 12 V (Auto Zigaretten-Anschlüsse) 10 m mit Lancia-Schleife Power-Modul 12 V (Auto Zigaretten-Anschlüsse) 20 m mit Lancia-Schleife 	<ul style="list-style-type: none"> mit Akkubetrieb möglich (2,3 Stunden) lange Laufzeit -> mehrere Akkus pro Tag möglich Adapter für Zigarettenanzahl (12 V) mit 6 m Kabel 	<ul style="list-style-type: none"> Akkubetrieb oder Netzbetrieb Netzteil und Ladegerät integriert Akkubetrieb 1,5 Stunden (mit optionalem Zusatzakku 5 Stunden) 	<ul style="list-style-type: none"> Akkubetrieb oder Netzbetrieb Netzteil 230 V AC / 12 V DC Akkubetrieb 4 Stunden
Zubehör/Standardausrüstung	<ul style="list-style-type: none"> Transportkoffer für Schachtkamera Teleskopstange (SD) mit Front-Test mit 68 Fenster-arte Damen mit Lancia Elektronik der Antenne, Mikrovergabe Tastatur und Schalter für den Außenbereich Halbtag mit Teleskopstange an Steuerung montiert 	<ul style="list-style-type: none"> Digitaler Decoder / View-er Optische Web-Kamera für die Sicht nach unten, zur Schacht- und Teleskopposition Zentraler für hochgenaue Akkustellung in den Schacht Teleskop-Einstellung Langstreckeneinstellung Teleskop 10 m Videoübertragung Antenne zu unten mit externer Monitor oder mit mit Überwinden des Schachtes mit geeigneter Kamera-entwurf Kamerapositions-SD Stichtestfunktion des Kamerakopfes nach Montage des Videoübertragung Transportkoffer / Schutz der Anlage vor Transportstößen 	<ul style="list-style-type: none"> Transportkoffer (160 Liter) mit Schmutzfangkammer für Kamera und Zubehör Einstellung von Manufaktur mit digitaler Teleskopführung elektronische Teleskop Übertragungspunkt für Chargennummer Schalterprot. 2000 Elektronik der Anlage Werkzeuge elektronische 230 V Spannung Zigarettenanzahl 230 V Spannung 	<ul style="list-style-type: none"> Netzteil mit Akkubetrieb Stake mit Fotostandort Kabellose 10 m 12V DC (12V) - Adapter Stromversorgungsblende Schachtkamera mit SD-Speicheranschluss mit DMX-ESB-2
Kosten	Standardpaket ca. 9500 €	Standardpaket ca. 9750 €	Standardpaket ca. 12000 €	Standardpaket ca. 8200 €

* Alle Angaben sind die Eigenschaften der Hersteller zu entnehmen.
 ** www.nitec.co.uk/Products/Products.asp?product=143
 www.galaxyvon.de/produkte/produkte.asp?product=143
 www.galaxyvon.de/produkte/produkte.asp?product=143
 www.galaxyvon.de/produkte/produkte.asp?product=143
 www.galaxyvon.de/produkte/produkte.asp?product=143

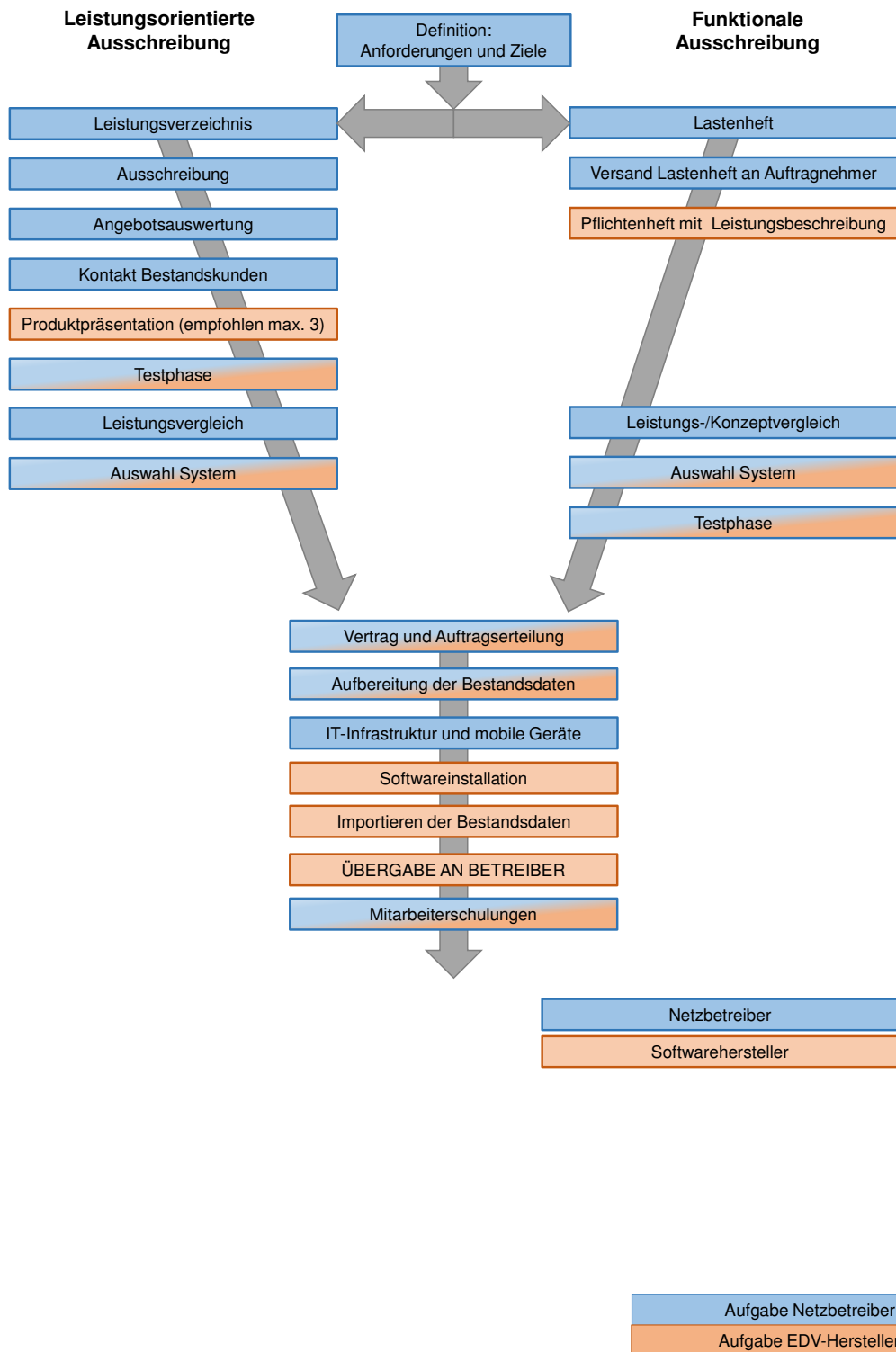
A 4 Marktübersicht Betriebsführungssysteme

Hersteller	HST Systemtechnik GmbH & Co KG	GreenGate AG	InfoDot GmbH	Mettenmeier GmbH
Programm	KANO	GS-Service	BfsDot	Optimus
Logo				
Module des Kanalbetriebs	<ul style="list-style-type: none"> • Konfiguration • Betriebsmittel • Tätigkeiten • Ressourcen • Lagerverwaltung • Adressverwaltung • Kostenstellenverwaltung • Hfstabellen • Betriebsführung • Aufgaben • Terminplanung • Auftragsverwaltung • Tourenverwaltung • Bestellwesen • Störfallmanagement • Workflowmodul • Grafikviewer • Mobile Auftragsverwaltung • Auswertung/Berichtswesen • Berichtseditor • Berichtserstellung • Excel-Export • Dokumentenverwaltung • Dokumente 	<p>• GS-Service ist ein branchenneutrales System ohne Fachmodule für den Kanalbetrieb oder andere Aufgaben. Mit GS-Service lassen sich fachspezifische Applikationen kundenspezifisch erstellen, so wurden bereits Applikationen für den Kläranlagenbetrieb, Kanalnetze mit Sonderbauwerken, die Gewässerunterhaltung, für die Indirektenleiterüberwachung etc. bei einer Vielzahl von Kunden erfolgreich in Betrieb genommen. Das System kann über verschiedene Plattformen mobil eingesetzt werden.</p>	<ul style="list-style-type: none"> • Betriebsführungssystem • Kosten/Leistungsrechnung • Berichtswesen • Zeiterfassung • Stundenabrechnung 	<ul style="list-style-type: none"> • Objektverwaltung • Betriebsmittelmanagement • Instandhaltungsmanagement • Störungsmanagement • Ressourcenmanagement • Prozessmanagement • Auftragsverwaltung • Kostenstellen • Projekt- und Auftragsplanung • Workforcenmanagement • Mobile Erfassung und Rückmeldung (Optimus Smart) • Dokumentenverwaltung • ERP-System • Abrechnung • Controlling und Reporting
Fachschalen	<ul style="list-style-type: none"> • Wasser • Gas • Strom • Kanal • Kläranlage • Industrie • Beleuchtung • Wellness • Indirektenleiter • weitere Fachschalen auf Anfrage 	<ul style="list-style-type: none"> • Kanal • Wasser • Strom • Fernwärme • Abwasser • Hausanschlusskontrollen • Industrie 	<ul style="list-style-type: none"> • Kanal • Straßenreinigung • Strassenunterhaltung • Spielplatz • Grünflächen • Baum • Versorger für Gas/Wasser/Strom/Wärme 	<ul style="list-style-type: none"> • Kanal • Wasser • Gas • Strom • Abwasser • Wärme • Beleuchtung • Schwimmbäder
Dokumentenverwaltung	ja	ja	ja	ja
Grafiksystem	ja	ja	ja	ja
Welche zusätzlichen Grafiksysteme können angebunden werden	<p>KANO verfügt über einen eigenen Grafikviewer. Dieser zeichnet sich durch besondere Merkmale wie der visuellen Darstellung und der hohen Performance aus. Der Grafikviewer kann stationär oder mobil eingesetzt werden. KANO ist aber auch in der Lage jeden bestehenden Grafikviewer anzubinden. Es stehen bereits Anbindungen zu den führenden Grafikviewern zur Verfügung.</p>	<ul style="list-style-type: none"> • ArcGIS • BingMaps • GoogleMaps • OpenStreetMap • OviMap • YahooMap • DXF • Smallworld • SIAS • LocationViewer • BavariaGIS • GemGIS/SynerGIS • IKS • Intergraph • Magellan • MapBender • OpenGIS • PolyGIS/Calgos • Bentley/isisNET • STRAKAT • S&K Tiffany 	<ul style="list-style-type: none"> • Smallworld GIS • Shape • MapInfo • OracleSpatial • WMS 	<p>OPTIMUS verfügt über einen Grafikviewer, welcher die OGC-Standards WMS und WFS wiedergeben kann. Zusätzlich sind Einsprungschnittstellen zu verschiedenen Geoinformationssystemen verfügbar. Die Integration zum Mettenmeier Produkt MGC ist besonders tiefgreifend. Der MGC kann GeoDaten sowohl online, als auch offline zur Verfügung stellen.</p>
ERP-System	<ul style="list-style-type: none"> • Schnittstellen zu den führenden Systemen 	<ul style="list-style-type: none"> • Realisierte Schnittstellen zu SAP, Navision, kvasy, Wilken, Datev, OK-RS, Portolan 	<ul style="list-style-type: none"> • Eigenes • Schnittstellen zu SAP, New System u.a. 	<ul style="list-style-type: none"> • Eigenes • Schnittstellen zu SAP, Wilken, Navision, LIMA und Schleupen
Auskunftssystem (lesender oder web-basierender Zugriff)	<p>KANO besitzt kein reines Auskunftssystem. KANO verfügt über eine Benutzerverwaltung, welche die Vergabe von Rechten auf allen Ebenen der Mitarbeiter ermöglicht. KANO steht als Client-Server oder als web-basiertes System zur Verfügung.</p>	<p>Reines Auskunftssystem über Rechtevergabe und Webservice möglich.</p>	<p>web-basierendes Auskunftssystem</p>	<ul style="list-style-type: none"> • Im Optimus Lizenzpaket ausschließlich lesender Zugriff • Für spezielle Aufgabenstellungen wurden Web-Interfaces realisiert
Mobile Auftragsbearbeitung möglich mit anschließender Synchronisation	ja	ja	ja	ja
Anbindung an Schacht-erkennungssysteme möglich	ja, die Anbindung an Transponder, Barcodes oder Schachtkamerasysteme ist problemlos möglich.	ja, die Anbindung an RFID oder Barcodes ist möglich.	ja	ja, die Anbindung an Barcodes oder NFC-Tags ist möglich.

A 5 Marktübersicht Kanalinformationssysteme

Barthauer Software GmbH BaSYS 8.3.4 SP4 	Dataver Informatik AG Dataver Abwasser 	IBAK Helmut Hunger GmbH & Co KG IKIS der Kanaldatenmanager 	DW-Informationssysteme GmbH S&K Tiffany 	DIGMA Dienstleistungsgesellschaft mbH Digma SAN, DDV, KUS, KSP, KRS 	CADMAP Consulting Ingenieurgesellschaft mbH KANDIS Produktfamilie 	tandler.com GmbH ++SY-STEMS 
<ul style="list-style-type: none"> • Kanalplanung • Kanalkataster • Kanalanlagenplanung • Kanalzustandsprüfung und -bewertung • Betriebs- und Wartungsmanagement • Generalentwässerungsplanung • Kanalauskunft 	<ul style="list-style-type: none"> • Stammdatenverwaltung • Hydraulische Daten • Zustandserfassung- und -bewertung • Maßnahmenplanung mit Kostenberechnung • Visualisierung • Liegenschaftsentwässerung • Kennzahlen • Datenkontrolle • Import • Export • Betrieblicher Unterhalt • Baulicher Unterhalt • Berichte • Statistiken • Dataver mobile 	<ul style="list-style-type: none"> • Kanaldatenverwaltung mit TV-Inspektion • Optionale Feldanwendung: IKAS32 • Klassifizierung und Bewertung • Sanierungsplanung • Reinigungsdatenverwaltung • IKAS Cleaner • GBO Punktobjekte 	<ul style="list-style-type: none"> • KABE Verwaltung Kanalbetrieb • KANU Kanal Zustand- und Dichtigkeitsprüfung • GBS grafisches Bearbeitersystem • Zustand des Kanalnetzes • Bewertung • Touren • Hydraulik • Vermögen • Sanierung • Betrieb/Wartung • Baumaßnahmen • Kleinkanalanlagen • Indirekteileiter • Dokumentenverwaltung • Berichterstellung aus der Datenbank • Datenbankabfragen • Liegenschaftsinformationssystem 	<ul style="list-style-type: none"> • Kommunale und rechtliche Anforderungen (Digma SAN, Digma KSP) • Zustandserfassung von Kanälen und Schächten (Digma SAN, Digma KUS) • Niederschlagsentwässerung im Trennverfahren (Digma SAN) • Kanalreinigung und strategische Konzepte (Digma KRS) 	<p>Die KANDIS Produktfamilie umfasst eine "einfache" Betriebsführungssystem mit "novakANDIS Kanalbetrieb pro", innerhalb der Module können beliebige Aufgaben definiert, geplant und dokumentiert werden. Für die einzelnen betrieblichen Aufgaben wie Reinigung, Probenahmen etc. stehen jeweils spezifische Ergebnisklassen für die fachlichen Ergebnisse bereit. Ergänzt wird das System um mobile Erfassung mit novamOBEL oder der KANDIS App (Android).</p>	<ul style="list-style-type: none"> • Graphisches Informationssystem • Kanalnetzberechnung • Grundstücksentwässerungsinformationssystem • Sanierungsmodul • Sanierungsverwaltung • Vermögensverwaltung • Regenabwasser • Gewässerkataster und Gewässerunterhalt • Koordinatentransformation • Wasserversorgung und Gasversorgung • Kostenberechnung • Zustandserfassung und Zustandsbewertung • Überflutungsanalyse
<ul style="list-style-type: none"> • Abwasser • Wasser • Gas • Kabel 	<ul style="list-style-type: none"> • Dataver Abwasser • Dataver Wasser • Dataver Straße • Dataver Statik <p>Die Fachschalen dienen der Erfassung, dem Unterhalt und der Sanierung der jeweiligen Infrastruktur.</p>	<ul style="list-style-type: none"> • Kanal 	<ul style="list-style-type: none"> • Abwasser • Gewässer • Umwelt • Baukataster • Straßenkataster • Spielplatzkataster • Gebäudekataster • Lampenkataster • Verkehrsschilder • Grundstücke/Gebühren 	<ul style="list-style-type: none"> • Kanal • Wasser 	<p>Das Kanalmanagementsystem KANDIS umfasst umfangreiche Fachmodule von der Bestandserfassung über Module zum Kanalzustand, der Zustandsklassifizierung, Betriebsführung, Kanal-sanierung, Kanahydraulik, Kanalvermögen bis hin zu Spezialmodulen für indirekteileiter, Gewässerunterhaltung, Hochwassererschütz und Projektverwaltung mit, jeweils den entsprechenden Schnittstellen. Auch spezielle Module für die Systemintegration mit ERP-Systemen gehören zum Umfang. Neben den Desktopsystemen gehören Serverysteme und mobile Anwendungen zur Produktfamilie.</p>	<ul style="list-style-type: none"> • Kanalsystem • Gewässer • 2D-Oberflächenmodell • Trinkwasser • Gas
ja	ja	ja	ja	ja	ja	ja
<ul style="list-style-type: none"> • Bidirektionale, interaktive Unterstützung von <ul style="list-style-type: none"> • Autodesk (AutoCAD) • Bentley (Microstation) • ESRI (ArcGIS) • Intergraph (Geomea) • BrixCAD • Supermap 	<p>DATAVER verfügt über einen eigenen Viewer, zusätzlich können beliebige CAD-Daten über DXF eingebunden werden. Außerdem besteht die Möglichkeit, WMS-Server anzubinden. Des Weiteren können auch Shape-Dateien eingelesen und angezeigt werden.</p>	<p>Das zentrale Bedienelement ist die IKIS-Netzgrafik. Die Anbindung weiterer Systeme wird über Datenbank-Verknüpfungen realisiert.</p>	<p>Schnittstellen zu allen gängigen Fremdsystemen: AutoCAD, dxf, dwg, ESRI Shape etc.</p>	<ul style="list-style-type: none"> • Digma CAD • MapGuide 	<ul style="list-style-type: none"> • ArcGIS • ArcEditor für Erfassungsarbeitsplätze • ArcSDE für Meinplatzlösungen oder bei Verwindung der Versanierung • ArcView für Auskunftsarbeitsplätze 	<p>Das System der tandler.com GmbH behaltet als Basiskomponente immer ein vollwertiges GIS. Daher ist ein Graphikviewer immer Bestandteil einer ++SY-STEMS Installation.</p> <ul style="list-style-type: none"> • Autodesk (AutoCAD) • ESRI (ArcGIS)
ja	ja	ja	ja	ja	ja	ja

A 6 Ablaufschema-Anschaffung EDV-System



A 7 Datenaufnahme-Fomular-Störfall

An das
 IKT- Institut für Unterirdische Infrastruktur
 Exterbruch 1
 45886 Gelsenkirchen

Rückantwort
per Fax: 0209 17806-88
per Mail: info@ikt.de



Rückmeldebogen

-Störfälle-



Verstopfungen im öffentlichen Bereich	Fotos vorhanden		Anzahl im Jahr		
	ja	nein	2011	2012	2013
Wurzeleinwuchs					
Rückstauverhältnisse					
Baumaßnahmen					
Gestürzte Schmutzfänger					
Bauliche Mängel					
Fremdmängel					
Geringes Sohlgefälle					
Illegal entsorgte Abfälle					
Geringe Abflussverhältnisse					
Sonstiges:					

Institution: _____

Name: _____

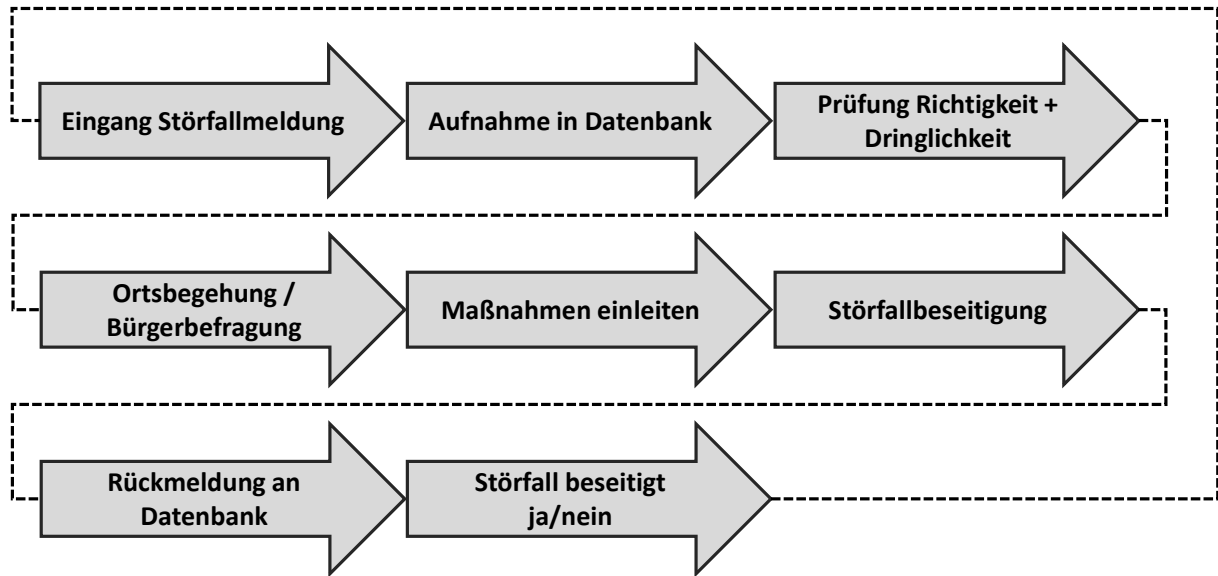
Straße: _____

PLZ Ort: _____

Telefon: _____

E-Mail: _____

A 8 Ablaufschema Störfall- und Beschwerdemanagement



A 9 Störfallkatalog

Störfallkatalog

ARBEITSHILFEN FÜR DIE BEWERTUNG VON STÖRFÄLLEN



Wurzeleinwuchs



Wurzeleinwuchs [Backnang, 2014]

mögliche Ursachen: Eindringen von Wurzeln, Wurzelraum etc. → Baumstandorte etc.

Standfestigkeit: gefährdet (Brüche, Risse)

Betriebssicherheit: gefährdet (Abflusshindernis)

Dichtheit: gefährdet (Brüche, Risse)

Dauerhaftigkeit: gefährdet

Auftreten: wiederkehrender Störfall

Kategorie 1: kurzfristig zu beseitigender Störfall

Empfehlungen zur Beseitigung:

kurzfristig: Rotationsdüse, Kettenschleuder, Wurzelschneider, Kanalroboter, Schneidkorb, händische Entfernung; chemische Verfahren (z.B. Herbizide)
langfristig: Wurzelraum an anderer Stelle, Inliner, Abdichtung der Muffen

Bemerkungen:

Rückstau



Rückstau [Vordereifel, 2014]

mögliche Ursachen: hohe Ablagerungen, verfestigte Ablagerungen, Geröll

Standfestigkeit: nicht gefährdet

Betriebssicherheit: gefährdet (Abflusshindernis)

Dichtheit: nicht gefährdet

Dauerhaftigkeit: nicht gefährdet

Auftreten: wiederkehrender Störfall

Kategorie 1: kurzfristig zu beseitigender Störfall

Empfehlungen zur Beseitigung:

kurzfristig: Kanalreinigung → Freispülen

langfristig: Ursachenanalyse durch Kamerabefahrung

Bemerkungen:

Baumaßnahme



Bauschutt [Backnang, 2014]

mögliche Ursachen: unsachgemäße Beseitigung von Bauschutt

Standfestigkeit: nicht gefährdet

Betriebssicherheit: gefährdet (Abflusshindernis)

Dichtheit: nicht gefährdet

Dauerhaftigkeit: nicht gefährdet

Auftreten: einmaliger Störfall

Kategorie 1: kurzfristig zu beseitigender Störfall

Empfehlungen zur Beseitigung:

kurzfristig: lockere Ablagerungen: Kanalreinigung → Freispülung,
verfestigte Ablagerungen: Fräsen; manuelle Reinigung

langfristig: keine, da Baumaßnahmen nur kurz- bis mittelfristig

Bemerkungen:

Gestürzter Schmutzfänger



Gestürzter Schmutzfänger [Gladbeck, 2014]

mögliche Ursachen: defekte Schmutzfänger

Standfestigkeit: nicht gefährdet

Betriebssicherheit: gefährdet (Abflusshindernis)

Dichtheit: nicht gefährdet

Dauerhaftigkeit: nicht gefährdet

Auftreten: einmaliger Störfall

Kategorie 1: kurzfristig zu beseitigender Störfall

Empfehlungen zur Beseitigung:

kurzfristig: manuelle Entfernung

Bemerkungen:

Baulicher Mangel



Baulicher Mangel [Rendsburg, 2014]

mögliche Ursachen: Frost-, Material- oder Herstellungsfehler, Druckstöße, starke Korrosion, Materialermüdung, unvorsichtige Bauarbeiten

Standfestigkeit: gefährdet (Brüche, Risse)

Betriebssicherheit: gefährdet (Abflusshindernis)

Dichtheit: gefährdet (Brüche, Risse)

Dauerhaftigkeit: gefährdet

Auftreten: einmaliger Störfall

Kategorie 1: kurzfristig zu beseitigender Störfall

Empfehlungen zur Beseitigung:

kurzfristig: Freispülen und örtliche Reparaturverfahren

langfristig: Erneuerung in offener/geschlossener Bauweise

Bemerkungen:

Fremdmangel



Einragender Stutzen [Vordereifel, 2014]

mögliche Ursachen: einragende Stutzen (Hausanschlüsse)

Standfestigkeit: nicht gefährdet

Betriebssicherheit: gefährdet (Abflusshindernis)

Dichtheit: gefährdet (Brüche, Risse)

Dauerhaftigkeit: nicht gefährdet

Auftreten: einmaliger Störfall

Kategorie 1: kurzfristig zu beseitigender Störfall

Empfehlungen zur Beseitigung:

kurzfristig: Fräsen; Abdichtung; örtliche Reparaturverfahren

langfristig: keine

Bemerkungen:

Geringses Sohlgefälle



Geringses Sohlgefälle [Vordereifel, 2014]

mögliche Ursachen: Tiefpunkte, Flachstrecken oder hydraulisch ungünstige Gegebenheiten

Standfestigkeit: nicht gefährdet

Betriebssicherheit: gefährdet

Dichtheit: nicht gefährdet

Dauerhaftigkeit: nicht gefährdet

Auftreten: wiederkehrender Störfall

Kategorie 2: mittelfristig zu beseitigender Störfall

Empfehlungen zur Beseitigung:

kurzfristig: Kanalreinigung, Freispülen

langfristig: Herstellen Sohlgefälle in offener/geschlossener Bauweise

Bemerkungen:

Unsachgemäße Einleitung



Betonreste, Papier [Herne, 2014]

mögliche Ursachen: unsachgemäße Beseitigung von Abfall

Standfestigkeit: nicht gefährdet

Betriebssicherheit: gefährdet (Abflusshindernis)

Dichtheit: nicht gefährdet

Dauerhaftigkeit: nicht gefährdet

Auftreten: einmaliger Störfall

Kategorie 1: kurzfristig zu beseitigender Störfall

Empfehlungen zur Beseitigung:

kurzfristig: Kanalreinigung, Freispülen, händische Entfernung

langfristig: Bürgerinformation

Bemerkungen:

Geringer Abfluss



Geringer Abfluss [Velbert, 2014]

mögliche Ursachen: zu geringe Abwassereinleitungen, geringe Anzahl von Hausanschlüssen

Standfestigkeit: nicht gefährdet

Betriebssicherheit: gefährdet

Dichtheit: nicht gefährdet

Dauerhaftigkeit: nicht gefährdet

Auftreten: wiederkehrender Störfall

Kategorie 2: mittelfristig zu beseitigender Störfall

Empfehlungen zur Beseitigung:

kurzfristig: Kanalreinigung, Freispülen

langfristig: keine, wenn möglich Anschlussanzahl erhöhen

Bemerkungen:

Klappernder Kanaldeckel



Klappernder Kanaldeckel [Gladbeck, 2014]

mögliche Ursachen: Schachtkopf, Schachtring

Standfestigkeit: nicht gefährdet

Betriebssicherheit: nicht gefährdet

Dichtheit: nicht gefährdet

Dauerhaftigkeit: nicht gefährdet

Auftreten: einmaliger Störfall

Kategorie 1: kurzfristig zu beseitigender Störfall

Empfehlungen zur Beseitigung:

kurzfristig: Antiklapperring; Schachtabdeckung austauschen

langfristig: Schachtkopfsanierung

Bemerkungen:

Geruchsbelästigung



Geruchsbelästigung [Backnang, 2014]

mögliche Ursachen: Biogene Schwefelsäurekorrosion, Fäulnisprozesse, schlechte Durchlüftung

Standfestigkeit: nicht gefährdet

Betriebssicherheit: nicht gefährdet

Dichtheit: nicht gefährdet

Dauerhaftigkeit: nicht gefährdet

Auftreten: wiederkehrender Störfall

Kategorie 2: mittelfristig zu beseitigender Störfall

Empfehlungen zur Beseitigung:

kurzfristig: Kanalreinigung, Geruchsfilter

langfristig: Geruchsfilter, Geruchsverschlüsse, Abflussverhältnisse optimieren

Bemerkungen:

Rattenbefall



Rattenbefall [IKT, 2014]

mögliche Ursachen: unsachgemäße Beseitigung von Abfall

Standfestigkeit: nicht gefährdet

Betriebssicherheit: nicht gefährdet

Dichtheit: nicht gefährdet

Dauerhaftigkeit: nicht gefährdet

Auftreten: wiederkehrender Störfall

Kategorie 2: mittelfristig zu beseitigender Störfall

Empfehlungen zur Beseitigung:

kurzfristig: Rattengift/köder auslegen

langfristig: Rattengift/köder auslegen

Bemerkungen:

Versackung / Versenkung



Versackung/ Muffenversatz [Backnang, 2014]

mögliche Ursachen: Frost-, Material- oder Herstellungsfehler, Druckstöße, starke Korrosion, Materialermüdung, unvorsichtige Bauarbeiten

Standfestigkeit: gefährdet (Brüche, Risse)

Betriebssicherheit: gefährdet (Abflusshindernis)

Dichtheit: gefährdet (Brüche, Risse)

Dauerhaftigkeit: gefährdet

Auftreten: einmaliger Störfall

Kategorie 1: kurzfristig zu beseitigender Störfall

Empfehlungen zur Beseitigung:

kurzfristig: örtliches Reperaturverfahren

langfristig: Erneuerung in offener/geschlossener Bauweise

Bemerkungen:

Ausblasung Geruchsverschluss



Aerosolbildung [Herne, 2014]

mögliche Ursachen: Kanalreinigungsarbeiten mit Hochdruckwasserstrahlen

Standfestigkeit: nicht gefährdet

Betriebssicherheit: nicht gefährdet

Dichtheit: nicht gefährdet

Dauerhaftigkeit: nicht gefährdet

Auftreten: wiederkehrender Störfall

Kategorie 2: mittelfristig zu beseitigender Störfall

Empfehlungen zur Beseitigung:

kurzfristig: Druck und Durchfluss bei Reinigung reduzieren

langfristig: Düsen mit großen Strahlwinkeln, Erneuerung der Dachentlüftung in Toiletten; Erneuerung der Be- bzw. Entlüftung der Leitungen

Bemerkungen:

A 12 Einsparpotentiale-Betreiberprofile

Betreiber	BP I – 1000	BP II-400	BP III-200	BP IV-50
Profil	1000 km, 200 TEW, 4 Fzg., 30 Mitarb.	400 km, 80 TEW, 2 Fzg., 20 Mitarb.	200 km, 40 TEW, 1 Fzg., 12 Mitarb.	50 km, 10 TEW, kein Fzg., 2 Mitarb.
NV, P	4317	2200	1108	27
NV, SKI	2232	1122	561	0
NV, SKB	837	468	210	0
NV, LD	77	53	261	302
NV, Gesamt	7463	3843	2141	329
BKR, P	3808	2239	1103	192
BKR, SKI	2083	1029	444	5
BKR, SKB	631	364	158	17
BKR, LD	142	170	324	255
BKR, Gesamt	6663	3802	2029	469
Einsparpotenzial [T Euro]	<u>+800</u>	<u>+41</u>	<u>+112</u>	<u>-140</u>

