



INSTITUT FÜR  
SIEDLUNGSWASSERWIRTSCHAFT  
DER RWTH AACHEN



***LIWATECH***

## **Schlussbericht zum Forschungsvorhaben**

Untersuchung eines neu entwickelten  
Reinigungssystems für den  
Einsatz in Stauraumkanälen

für das



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

Bearbeitung: Dipl.-Ing. J. Dettmar  
Dipl.-Ing. Ph. Stauer

Essen, im Januar 2006

## Schlussbericht

zum Forschungsvorhaben:

### Untersuchung eines neu entwickelten Reinigungssystems für den Einsatz in Stauraumkanälen

Az: IV - 9 042 389

für das

**Ministerium für Umwelt und Naturschutz,  
Landwirtschaft und Verbraucherschutz  
des Landes Nordrhein-Westfalen**

Essen, den 30. 01. 2006

Prof. Dr.-Ing. H. Bode  
(Vorstandsvorsitzender RV Essen)

Aachen, den 20. 01. 2006

Univ.-Prof. Dr.-Ing. J. Pinnekamp  
(Direktor ISA der RWTH Aachen)

## Projektpartner

Partner		Bearbeiter
	<p>Institut für Siedlungswasserwirtschaft der RWTH Aachen (ISA) Univ.-Prof. Dr.-Ing. J. Pinnekamp Mies-van-der-Rohe-Str. 1 52074 Aachen Tel.: 0241 80 25207 Fax: 0241 80 22285 Email: isa@isa.rwth-aachen.de Web: www.isa.rwth-aachen.de</p>	<p>Dipl.-Ing. J. Dettmar Dipl.-Ing. Ph. Staufer</p>
 Ruhrverband	<p>Ruhrverband Essen (RV) Prof. Dr.-Ing. H. Bode Kronprinzenstraße 37 45128 Essen Tel.: 0201 178 0 Fax: 0201 178 1425 Email: info@ruhrverband.de Web: www.ruhrverband.de</p>	<p>Dipl.-Ing. L. Rullich</p>
<b>LIWATECH</b>	<p>Liwatech Gesellschaft Liebau Wasser- und Abwassertechnik Dipl.-Ing. L. Liebau Heubergweg 73 Bad König Tel.: 06063 913779 Fax: 06063 912416 Email: info@liwatech.de Web: www.liwatech.de</p>	<p>Dipl.-Ing. L. Liebau</p>

## Inhalt

<b>1</b>	<b>Veranlassung</b> .....	<b>2</b>
<b>2</b>	<b>Kenntnisstand</b> .....	<b>4</b>
2.1.1	Ablagerungen in Abwasserkanälen.....	4
2.1.2	Entstehung und Folgen von Kanalablagerungen .....	4
2.1.3	Ablagerungen in Stauraumkanälen .....	5
2.2	Verfahren zur Reinigung von Stauraumkanälen.....	6
2.2.1	Allgemeines.....	6
2.2.2	Reinigungsverfahren .....	6
2.3	Wesentliche großtechnische Untersuchungen zur Schwallspülung von Abwasserkanälen und Abwasserleitungen.....	8
2.4	Mathematisch-numerische Berechnung von Schwallwellen.....	9
2.4.1	Grundlagen der hydrodynamischen Strömungssimulation.....	9
2.4.2	Wesentliche mathematisch-numerische Untersuchungen zur Schwallspülung von Abwasserkanälen .....	12
<b>3</b>	<b>Untersuchungen</b> .....	<b>15</b>
3.1	Örtliche Verhältnisse am Stauraumkanal Markstraße .....	15
3.2	Merkmale der eingesetzten Schwallspülklappe.....	16
3.3	Merkmale des verwendeten Programms Fluvius-1Di .....	18
3.4	Versuchsprogramm .....	19
3.4.1	Großtechnische Untersuchungen.....	20
3.4.2	Mathematisch-numerische Untersuchungen .....	23
<b>4</b>	<b>Ergebnisse</b> .....	<b>25</b>
4.1	Großtechnische Untersuchungen .....	25
4.1.1	Hydraulische und stoffliche Gegebenheiten bei Trockenwetter .....	25
4.1.2	Spülversuche zur Grundreinigung.....	26
4.1.3	Spülversuche zur Präventivreinigung .....	30
4.1.4	Beobachtung des Klappenbetriebs.....	32
4.1.5	Schwefelwasserstoffmessungen in der Kanalatmosphäre .....	33

4.1.6	Untersuchungen zum Stofftransport.....	33
4.1.7	Schlussfolgerungen.....	35
4.2	Mathematisch-numerische Untersuchungen.....	36
4.2.1	Strömungsmodell für den Zustand mit Ablagerungen.....	36
4.2.2	Strömungsmodell für den Zustand ohne Ablagerungen.....	38
4.3	Optimierung des Spülbetriebes.....	40
4.3.1	Grundreinigung.....	41
4.3.2	Präventivreinigung.....	41
<b>5</b>	<b>Wirtschaftlichkeitsbetrachtung.....</b>	<b>43</b>
5.1	Schwallspülung kontra Hochdruckreinigung.....	43
5.2	Investitionskosten von Schwallspüleinrichtungen in Stauraumkanälen.....	44
<b>6</b>	<b>Einsatz von Schwallspüleinrichtungen in bestehenden Stauraum- und Regenrückhaltekanälen.....</b>	<b>46</b>
<b>7</b>	<b>Zusammenfassung und Ausblick.....</b>	<b>48</b>

## Verzeichnis der Bilder

Bild 2.1:	Schematische Darstellung von Schwallspüleinrichtungen für die Reinigung von Abwasserkanälen (DETTMAR, 2005) .....	8
Bild 3.1:	Lageplanskizze des Stauraumkanals Markstraße in Bochum .....	15
Bild 3.2:	Lageplanskizze von Schacht 5 mit Entlastungsbauwerk und Ablaufleitung .....	16
Bild 3.3:	Foto der im Stauraumkanal Markstraße eingesetzten Schwallspülklappe .....	17
Bild 3.4:	Positionierung der Lageschalter zur Positionserkennung des Verschlusselements .....	17
Bild 3.5:	Schematische Darstellung der neuen Schwallspülklappe in zwei Ansichten .....	18
Bild 3.6:	Körnungslinie des verwendeten Sand-Kies-Gemisches im Vergleich zu Körnungslinien von Originalablagerungen im SKU Markstraße .....	22
Bild 3.7:	Skizze der Eingabedaten für die Berechnung einer Schwallwelle im Abwasserkanal .....	24
Bild 4.1:	Fotos der im Stauraumkanal vorgefundenen Ablagerungen (linkes und mittleres Foto: unterer Abschnitt; rechtes Foto: oberer Abschnitt) .....	26
Bild 4.2:	Ermittelte Körnungslinien der Ablagerungen im SKU Markstraße .....	27
Bild 4.3:	Gemessene Ablagerungshöhen für den Ausgangszustand, nach 45 und 193 Spülwellen .....	29
Bild 4.4:	Gemessene Wasserstände einer Spülwelle ( $h_{\text{Stau}} = 1,60 \text{ m}$ ) an den 6 Sonden .....	30
Bild 4.5:	Gemessene Schmutzwelle an der Drossel bei der Präventivreinigung am Ende eines Niederschlagsabflussereignisses .....	32
Bild 4.6:	Gemessene Ablagerungshöhen für den Ausgangszustand, nach einer Welle, nach 12 und 48 Schwallwellen mit $h_{\text{Stau}} = 1,0 \text{ m}$ .....	34
Bild 4.7:	Gemessene Konzentrationen abfiltrierbarer Stoffe (AFS) von Schwallwellen bei der Remobilisierung des eingebrachten Sand-Kies-Gemisches am Stauraumkanalablauf .....	35
Bild 4.8:	Berechnete und gemessene Wasserstände an den Sonden 2 und 3 mit einer Stauhöhe von $h_{\text{Stau}} = 1,6 \text{ m}$ .....	37
Bild 4.9:	Berechnete Sohlschubspannungen von Spülwellen verschiedener Stauhöhen 180 m unterhalb der Spülklappe .....	37
Bild 4.10:	Berechnete Durchflüsse am Ablauf des untersuchten Stauraumkanals .....	38
Bild 4.11:	Gemessene Wasserstände einer Schwallwelle mit einer Stauhöhe des Spülwasservolumens von $h_{\text{Stau}} = 1,60 \text{ m}$ bei ablagerungsfreiem Zustand .....	39

Bild 4.12: Berechnete und gemessene Wasserstände an den Sonden 4 und 6 für den Zustand ohne Ablagerungen .....	40
Bild 6.1: Vorgehensweise zur Ermittlung des Bedarfs von Schwallspüleinrichtungen in bestehenden Stauraum- und Regenrückhaltekanälen.....	47
Bild A 1: Schaltschrank des neu entwickelten Reinigungssystems mit Kompressor sowie weiteren Einrichtungen für die Steuerung und Datenübertragung .....	57
Bild A 2: Montierte Füllstandssonde der Endress+Hauser Messtechnik GmbH+Co. (links) und Führung der Strom- und Datenleitungen über eine exgeschützte Quetschdichtung in Schacht 1 (rechts) .....	57
Bild A 3: Eingesetztes Durchflussmessgerät PCM-Pro der Nivus GmbH .....	58
Bild A 4: Eingesetztes Handmessgerät zur punktuellen Bestimmung von Sedimenthöhen .....	58
Bild A 5: Eingesetztes Messgerät (OdaLog) zur kontinuierlichen Erfassung von Schwefelwasserstoff in Kanalatmosphäre .....	59
Bild A 6: In den SKU Markstraße eingebrachte Sand-Kies-Mischung für die Stofftransportuntersuchungen .....	59
Bild B 1: Wasserstandsganglinie einer Schwallwelle im SKU Markstraße mit $h_{\text{Stau}} = 1,7$ m an den Sonden S1 bis S6 .....	60
Bild B 2: Wasserstandsganglinie einer Schwallwelle im SKU Markstraße mit $h_{\text{Stau}} = 1,3$ m an den Sonden S1 bis S6 .....	61
Bild B 3: Wasserstandsganglinie einer Schwallwelle im SKU Markstraße mit $h_{\text{Stau}} = 1,0$ m an den Sonden S1 bis S6 .....	62

## Verzeichnis der Tabellen

Tabelle 2.1:	Richt- und Grenzwerte für die Abflussspitze bei Trockenwetter für einen ablagerungsfreien Betrieb von Stauraumkanälen.....	5
Tabelle 2.2:	Übersicht wesentlicher Feldversuche zur Schwallspülung in Abwasserkanälen.....	10
Tabelle 2.3:	Wesentliche mathematisch-numerische Untersuchungen zur Schwallspülung von Abwasserkanälen.....	14
Tabelle 4.1:	Gemessene mittlere Sohlschubspannungen bei Trockenwetter .....	25
Tabelle 4.2:	Abwassereigenschaften bei Trockenwetter .....	26
Tabelle 4.3:	Organische Verbindungen und Ammoniumkonzentration des Ablagerungsmaterials .....	28
Tabelle 4.4:	Schwermetallkonzentrationen von Ablagerungsmaterial in Mischwasserkanalisationen .....	31
Tabelle 5.1:	Ermittlung der Jahreskosten für den Einsatz der untersuchten Schwallspülklappe im SKU Markstraße .....	44
Tabelle 5.2:	Investitionskosten von Schwallspüleinrichtungen in Stauraumkanälen.....	45

## Verzeichnis der Abkürzungen und Formelzeichen

Abkürzung	Erläuterung	Einheit
AFS	abfiltrierbare Stoffe	-
ATV	Abwassertechnische Vereinigung e. V.	-
BSB	Biochemischer Sauerstoffbedarf	[mg/l]
CSB	Chemischer Sauerstoffbedarf	[mg/l]
DWA	Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall e.V.	-
FDM	Finite-Differenz-Methode	-
FEM	Finite-Element-Methode	-
FVM	Finite-Volumen-Methode	-
GV	Glühverlust	[%]
$h_{\text{Stau}}$	Stauhöhe	[m]
HD	Hochdruck	-
KAS	Kanalvolumen-aktivierende-Schwallspüleinrichtung	-
KSE	Kammerspüleinrichtung	-
MSR-Technik	Mess-, Steuerungs- und Regelungstechnik	-
MUNLV	Ministerium für Umwelt und Naturschutz, Landwirtschaft und Verbraucherschutz des Landes Nordrhein-Westfalen	-
MURL	Ministerium für Umwelt, Raumordnung und Landwirtschaft des Landes Nordrhein-Westfalen (heute: MUNLV)	-
NAE	Niederschlagsabflussereignis	-
NRW	Nordrhein-Westfalen	-
RRK	Regenrückhaltekanäle	-
SE	Schwallspüleinrichtung	-
SK	Stauraumkanal	-
SKM	Stauraumkanal mit mittig liegender Entlastung	-
SKO	Stauraumkanal mit oben liegender Entlastung	-
SKU	Stauraumkanal mit unten liegender Entlastung	-
SMS	Spüleinrichtung mit Spülwasserbehälter	-
SSE	Schachtspüleinrichtung	-
SüwV Kan	Selbstüberwachungsverordnung Kanal des Landes Nordrhein-Westfalen	-
t	Zeit	[s]
TS	Trockensubstanz	[g/kg]
u	Tiefengemittelte Fließgeschwindigkeit	[m/s]
v	Fließgeschwindigkeit	[m/s]
$V_{\text{Spül}}$	Spülwasservolumen	
x	Räumliche Ausdehnung	[m]

## 1 Veranlassung

In Nordrhein-Westfalen sind nach einer Auswertung der jüngsten Erhebung des Landes (MUNLV, 2005) 1.398 Stauraumkanäle in Betrieb. Mit einem Gesamtspeicherraum von über 1.3 Mio. m<sup>3</sup> stellen die Stauraumkanäle einen beträchtlichen Volumenanteil für die Mischwasserbehandlung in NRW bereit. Da die heutigen Speicherkapazitäten noch nicht den Erfordernissen entsprechen, befinden sich weitere Anlagen in Bau und in der Planung. Darüber hinaus kommt der Optimierung der vorhandenen Anlagen sowohl hinsichtlich ihrer Wirkung auf die Gewässer als auch hinsichtlich des Betriebes zukünftig eine verstärkte Bedeutung zu.

Regenüberlaufbecken sind heute schon überwiegend (62,9 %) mit automatischen Reinigungseinrichtungen ausgerüstet. Dagegen werden nur 11,9 % (166 Stück) der Stauraumkanäle selbsttätig gereinigt (DETTMAR und PINNEKAMP, 2005). Die meisten Betreiber setzen noch verstärkt auf die Selbstreinigung der lang gestreckten Mischwasserspeicher bei Trockenwetter und/oder Niederschlagsabflussereignissen (NAE).

Die nordrhein-westfälische Selbstüberwachungsverordnung Kanal (MURL, 1995a) fordert für Stauraumkanäle regelmäßige Inspektionen zur Feststellung von Ablagerungen. Überschreiten die Sedimenthöhen die Werte des Runderlasses des Ministeriums für Umwelt, Raumordnung und Landwirtschaft (MURL, 1995b), sind entsprechende Reinigungsmaßnahmen durchzuführen. Bei Vorhandensein einer wirksamen automatischen Reinigungseinrichtung kann die Anzahl der Inspektionen gemindert werden und aufwendige Hochdruckspülmaßnahmen können entfallen. Die Inspektionsarbeiten reduzieren sich dann auf eine halbjährliche Sicht- und Funktionskontrolle der Reinigungseinrichtung.

In den letzten Jahren entwickelte automatische Schwallspüleinrichtungen bieten, aufgrund ihrer Fähigkeit mehrere Schwallwellen pro Tag erzeugen zu können, die Möglichkeit, Ablagerungen zeitnah zu entfernen. Dadurch können Schmutzfrachtstöße bei der Abwasserbehandlung und Regenwasserentlastung in Mischsystemen reduziert oder sogar verhindert werden. Kanalvolumen-aktivierende-Schwallspüleinrichtungen (KAS), wie beispielsweise Schwallspülklappen, besitzen wegen ihrer großen aktivierbaren Spülwasservolumina ein hohes Reinigungsvermögen und erscheinen für einen Einsatz in Stauraumkanälen besonders geeignet. Gleichzeitig können KAS auch zur Kanalnetzbewirtschaftung eingesetzt werden. Dennoch sind diese Einrichtungen aufgrund des erwarteten Selbstreinigungseffektes bisher selten installiert worden.

Für eine effiziente Anwendung solcher Einrichtungen in Stauraumkanälen liegen derzeit noch keine fundierten Kenntnisse vor. Daher wurde ein von der Liwatech Gesellschaft, (Bad König) entwickeltes Reinigungssystem auf Basis der Schwallspülmethode in einem großformatigen Stauraumkanal mit Nennweiten von DN 2500 bis DN 3400 des Ruhrverbandes (Essen) eingesetzt und vom Institut für Siedlungswasserwirtschaft der RWTH Aa-

chen (ISA) untersucht. Ziel des Vorhabens war es, die Leistungsfähigkeit und Betriebsstabilität der neuen Einrichtung sowie die Randbedingungen für einen optimalen Spülbetrieb zu ermitteln. Dafür wurden großtechnische und mathematisch-numerische Untersuchungen durchgeführt. Zudem galt es die Wirtschaftlichkeit des betrachteten Reinigungssystems zu bestimmen.

## 2 Kenntnisstand

### 2.1.1 Ablagerungen in Abwasserkanälen

### 2.1.2 Entstehung und Folgen von Kanalablagerungen

Die Entstehung von Ablagerungen in Abwasserkanälen kann auf verschiedene Randbedingungen, die einzeln oder in Kombination auftreten können, zurückgeführt werden. Im Wesentlichen sind es

- hydraulische Randbedingungen, wie z. B. geringer Trockenwetterabfluss oder Rückstau mit der Folge geringer Fließgeschwindigkeiten,
- stoffliche Randbedingungen, wie z. B. große oder schwere Feststoffe,
- bauliche Randbedingungen, wie z. B. flache Sohlengefälle oder Unterbögen, und
- betriebliche Randbedingungen, wie z. B. Abflusshindernisse.

Wassersparende Maßnahmen in den Haushalten und bei industriellen Produktionsprozessen führen zu kleineren Schmutzwasserabflüssen, wodurch die Ablagerungsneigung besonders in Anfangshaltungen verstärkt wird. Methoden der dezentralen Niederschlagswasserbeseitigung, wie beispielsweise Versickerungsmaßnahmen, bewirken ebenfalls eine Reduzierung der Abflüsse sowie Aufkonzentrierung des Abwassers in Mischwasserkanälen und begünstigen dort die Ablagerungsbildung. Ebenso führen die tageszeitlichen Schwankungen des Trockenwetterabflusses zu verstärkter Ablagerungsbildung während abflussarmer Zeiten (Nachtstunden). Auch gestaute Abflussverhältnisse infolge hydraulischer Engpässe im Trocken- und Regenwetterfall haben ein Absinken von Abwasserinhaltsstoffen zu Folge. Bei der Regenwasserbehandlung in Trenn- und Mischsystemen kommt es aufgrund gezielter Sedimentationsprozesse bei Niederschlagsabflussereignissen zu Ablagerungen.

Ablagerungen und deren Remobilisierung bei Niederschlagsabflussereignissen sind je nach Entwässerungssystem mit verschiedenen Folgen behaftet, die zu nachfolgend aufgeführten Problemen beim Betrieb von Abwasseranlagen führen können (nach SCHMITT, 1992):

Hydraulische Leistungsfähigkeit

- Verkleinerung des vorhandenen Kanalquerschnittes
- Verringerung des Abflusses durch eine Zunahme der Rauheit
- Erhöhung der Entlastungshäufigkeiten an Entlastungsanlagen in Mischsystemen

#### Betriebliche Erschwernisse

- erhöhter Reinigungsaufwand
- gesundheitliche Beeinträchtigung des Betriebspersonals infolge Gasentwicklung unter anaeroben Bedingungen
- biogene Schwefelsäurekorrosion an zementgebundenen Kanalbauwerken als Folge von Schwefelwasserstoffbildung
- Belastung von Kläranlagen durch Frachtstöße bei der Remobilisierung abgelagerter Feststoffe durch Niederschlagsabflussereignisse in Mischsystemen

#### Umweltbeeinflussungen

- erhöhter Schmutzfrachtaustrag aus Mischsystemen bei Remobilisierung abgelagerter Feststoffe durch Niederschlagsabflussereignisse (NAE)
- Geruchsbeeinträchtigung durch Schwefelwasserstoffbildung

Den Folgen der Ablagerungsbildung kommt in Mischsystemen eine größere Bedeutung zu als in Trennsystemen, da hier beispielsweise erhöhte Gewässerbelastungen durch Schmutzfrachtstöße bei NAE kaum eine Relevanz haben.

### 2.1.3 Ablagerungen in Stauraumkanälen

In Stauraumkanälen können feste Abwasserinhaltsstoffe beim Trockenwetterabfluss und bei Niederschlagsabflussereignissen sedimentieren. Folge dieses Prozesses ist, dass durch einen erhöhten Schmutzaustrag bei nachfolgenden Ereignissen in Folge der remobilisierung der abgelagerten Sedimente die aufnehmenden Gewässer stofflich zusätzlich belastet werden. Die Remobilisierung der abgesetzten Stoffe ist nämlich nur dann erwünscht, wenn eine Mischwasserentlastung ausgeschlossen werden kann. Daher wird aus betrieblicher Sicht gefordert, Stauraumkanäle so zu gestalten, dass eine Ablagerungsbildung bei Trocken- und Regenwetterabfluss nicht möglich bzw. eine zügige Selbstreinigung bei Trockenwetter gewährleistet ist.

Die Arbeitsblätter der DWA A 128 (ATV, 1992) und A 166 (ATV, 1999) empfehlen zur Verminderung von Ablagerungen in Stauraumkanälen stark geneigte Sohlflächen zu konstruieren. Nach A 128 und A 166 sind die in Tabelle 2.1 aufgeführten hydraulischen Richt- und Grenzwerte für die Trockenwetterabflussspitze einzuhalten.

**Tabelle 2.1: Richt- und Grenzwerte für die Abflussspitze bei Trockenwetter für einen ablagerungsfreien Betrieb von Stauraumkanälen**

min $h_{WSP}$ [m]	$v$ [m/s]	min $v$ [m/s]	$\tau_0$ [N/m <sup>2</sup> ]	min $\tau_0$ [N/m <sup>2</sup> ]
0,05	0,80	0,50	2,0 – 3,0	1,3

Die Forderung nach einem ausreichend steilen Gefälle kann aus technischen und wirtschaftlichen Gründen in vielen Fällen nicht erfüllt werden. Somit muss nach A 128 bei Fließgeschwindigkeiten unter 0,5 m/s eine Spülmöglichkeit vorgesehen werden.

Darüber hinaus sedimentieren auch unabhängig von der konstruktiven Gestaltung in vielen bestehenden Stauraumkanälen feste Abwasserinhaltsstoffe während der Einstauphasen bei NAE und/oder in Trockenwetterzeiten. Diese Ablagerungen werden durch den Trockenwetter- oder Mischwasserabfluss nicht immer vollständig Richtung Kläranlage weitertransportiert. Das Ziel des Einsatzes automatischer Reinigungseinrichtungen ist es, ablagerungskritische Stauraumkanäle weitgehend ablagerungsfrei zu halten.

## 2.2 Verfahren zur Reinigung von Stauraumkanälen

### 2.2.1 Allgemeines

Der Bildung von Kanalablagerungen kann auf verschiedene Weise begegnet werden. Grundsätzlich bieten sich

- planerische Maßnahmen bei neu zu verlegenden Kanälen,
- bauliche Maßnahmen bei bestehenden Kanälen oder
- betriebliche Maßnahmen der Abflusssteuerung oder Kanalreinigung

an. Planerische Maßnahmen, wie z. B. die Gewährleistung ausreichender Sohlschubspannungen, greifen nur bei neu zu verlegenden Kanälen. Bauliche Maßnahmen bei bestehenden Kanälen, wie z. B. eine Beseitigung von Unterbögen, sind mit hohen Investitionen verbunden und werden üblicherweise nicht durchgeführt. Betriebliche Maßnahmen, wie z. B. eine gezielte Steuerung von Drosselabflüssen an Stauraumkanälen, können der Entstehung von Ablagerungen entgegenwirken. Eine andere betriebliche Maßnahme ist die Reinigung der Abwasserkanäle. Sie kann dann zu einer Verminderung oder sogar zur Vermeidung von Ablagerungen bzw. der mit ihnen verbundenen Folgeproblemen führen, wenn die Reinigung in entsprechend kurzen Intervallen erfolgt. Die kurzen Intervalle sind erforderlich, da die Entstehung von Ablagerungen innerhalb weniger Stunden oder Tage geschehen kann.

### 2.2.2 Reinigungsverfahren

Das **Hochdruckspülverfahren** (Hochdruckreinigung) ist das derzeit vornehmlich angewandte Verfahren zur Reinigung von Abwasserkanälen. Ein Einsatz in Kanälen bis DN 2000 erscheint bei üblichen Reinigungsintervallen von Monaten oder Jahren technisch möglich und wirtschaftlich sinnvoll (ATV, 1982). Bei großen Querschnitten lässt die Leistung des Verfahrens sowohl auf der Druck- als auch auf der Saugseite stark nach. In vie-

len Fällen muss dann das Bedienpersonal manuell unterstützend tätig werden. Besonderes Augenmerk ist auf den Spüldruck und die Vortriebsgeschwindigkeit zu legen, da zu hohe Spüldrücke verbunden mit einem Stillstand der Düse zur Entstehung bzw. Erweiterung von Schäden an der Kanalwand und den Rohrverbindungen führen können. Das dem Kanal entnommene Räumgut wird auf der kommunalen Kläranlage mitbehandelt, deponiert oder anderweitig entsorgt (ATV, 2003).

**Strömungserzeuger** sind Aggregate, die mittels Flügelrad oder Wasserstrahlpumpe den umgebenden Wasserkörper so in Bewegung halten, dass eine Remobilisierung der Feststoffe erzeugt und/oder ein Absetzen verhindert wird. Sie werden aufgrund ihrer punktuellen Wirkungsweise vorwiegend in Becken und seltener in Stauraumkanälen eingesetzt.

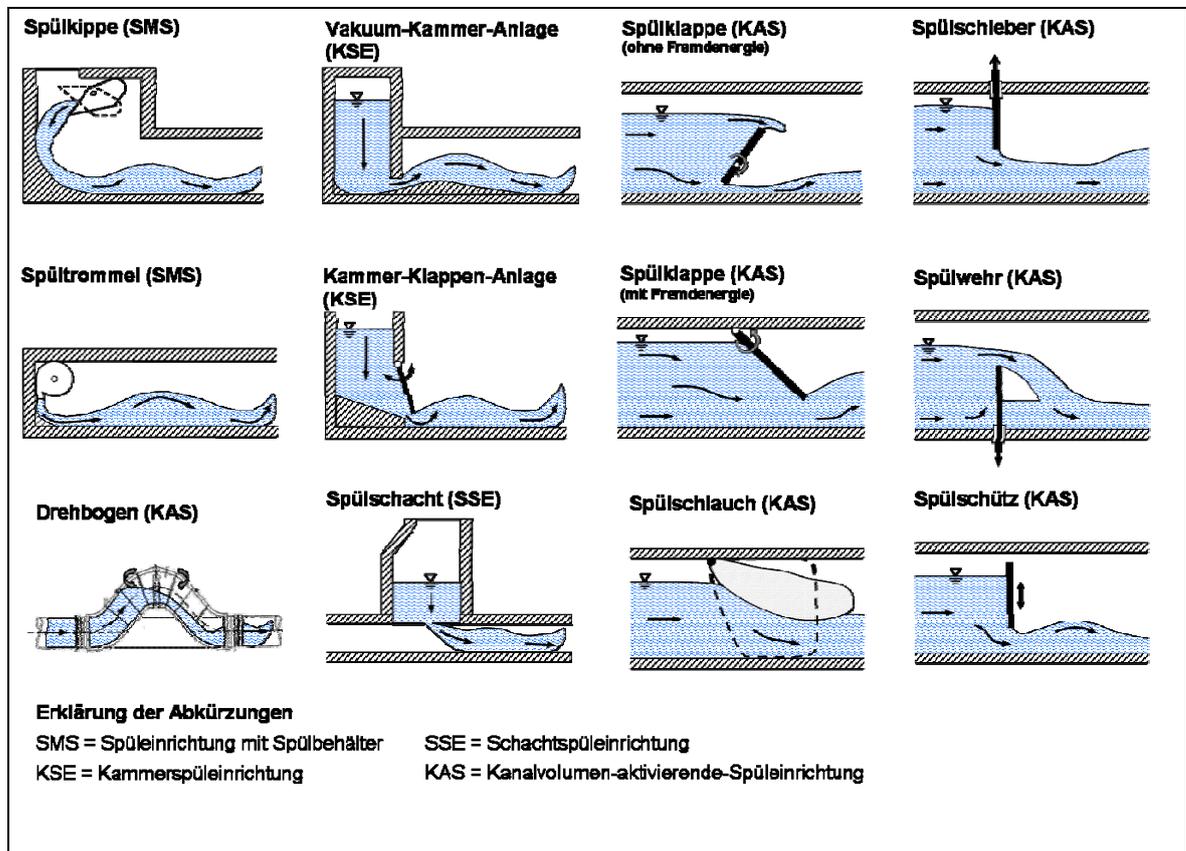
Die **Schwallspülung** ist eines der ältesten Verfahren, das zur Reinigung abwassertechnischer Bauwerke angewendet wird. Die Reinigung von Abwasserkanälen mittels Schwallwellen wurde aus verschiedenen Gründen, wie z. B. erhöhte Gefahren für das Bedienpersonal, großer Personalbedarf oder unzureichende Reinigungsleistung, sukzessive von der Hochdruckreinigung verdrängt. Entwicklungen im Bereich der Mess-, Steuerungs-, Regelungs- und Nachrichtentechnik sowie bei den Werkstoffen ermöglichen heute eine effiziente Anwendung der alten Reinigungsmethode. Neue Schwallspüleinrichtungen bieten nun die Möglichkeit durch regelmäßige Schwallwellen (mehrere pro Tag) Ablagerungen während der Trockenwetterphasen zu vermeiden und/oder am Ende von Niederschlagsabflussereignissen zeitnah zu entfernen.

DETTMAR (2005) hat Schwallspüleinrichtungen (SE) entsprechend ihrer konstruktiven Gestaltung bzw. technischen Ausrüstung in Spüleinrichtungen mit Spülwasserbehälter (SMS), Kammerspüleinrichtungen (KSE), Schachtspüleinrichtungen (SSE) und Kanalvolumen-aktivierende-Schwallspüleinrichtungen (KAS) eingeteilt (s. Bild 2.1).

Von diesen Einrichtungen erscheinen die KAS aufgrund der großen aktivierbaren Spülwasservolumina und der durch den Rückhalt des Abwassers herbeigeführten trockenen Sohle im Spülbereich für die Reinigung von großformatigen und langen Abwasserkanälen besonders geeignet. Zu der Gruppe der Kanalvolumen-aktivierenden-Schwallspüleinrichtungen gehören beispielsweise Spülklappen, Spülschütze, Spülwehre (versenkbare Wehre), schlauchartige Spüleinrichtungen oder der Drehbogen. Je nach technischer Ausrüstung werden diese Einrichtungen mit oder ohne Fremdenergie betrieben. Für weitergehende Information zur Schwallspülung sei auf die Arbeit von DETTMAR (2005) verwiesen.

Derzeit kommt auch bei der Reinigung von Stauraumkanälen (SK) vornehmlich das Hochdruckspülverfahren (Hochdruckreinigung) zum Einsatz (z. B. STEIN et al., 2000; ATV, 1997). Im Gegensatz zur Reinigung von kompakten Regenbecken werden Strömungserzeuger und Schwallspüleinrichtungen in SK nur vereinzelt angewendet.

Spezialverfahren, die für die Entfernung hoher und stark verfestigter Ablagerungen sowie für die Entfernung von Hindernissen angewendet werden, kommen lediglich bei der Grundreinigung von Stauraumkanälen zum Einsatz. Für den regelmäßigen Spülbetrieb haben diese Verfahren eine untergeordnete Bedeutung.



**Bild 2.1:** Schematische Darstellung von Schwallspüleinrichtungen für die Reinigung von Abwasserkanälen (DETTMAR, 2005)

### 2.3 Wesentliche großtechnische Untersuchungen zur Schwallspülung von Abwasserkanälen und Abwasserleitungen

In der Vergangenheit sind zahlreiche großtechnische Untersuchungen zur Schwallspülung von Abwasserkanälen und Abwasserleitungen durchgeführt worden. Gegenstand der Forschungen waren vornehmlich das Reinigungsvermögen, die Strömungsstruktur und der Stofftransport von Schwallwellen sowie die Betriebsstabilität von Schwallspüleinrichtungen. Eine Übersicht wesentlicher großtechnischer Untersuchungen ist in Tabelle 2.2 zusammengestellt.

Zu den ältesten systematischen Untersuchungen zur Schwallspülung gehören die Feldversuche von OGDEN (1898) im Kanalnetz von Ithaca (New York, USA). Des Weiteren sind umfangreiche Untersuchungen von BERTRAND-KRAJEWSKI et al. (2002),

LAPLACE et al. (2002), LORENZEN et al. (1996) sowie von DOHMANN und DETTMAR (2002) in großformatigen bzw. begehbaren Mischwasserkanälen durchgeführt worden. Untersuchungen zur Schwallspülung von Stauraumkanälen sind lediglich von KRAUTH et al. (2001) und BOSSELER et al. (2004) bekannt. Die Ergebnisse der Experimente von KRAUTH mit einem Spülwehr in einem Stauraumkanal (SK) mit oben liegender Entlastung zeigen, dass der SK-Ablauf einen Problempunkt für die Schwallspülung darstellt. Vorgaben für den wirksamen Betrieb von Schwallspüleinrichtungen zur Grund- und Präventivreinigung von Stauraumkanälen wurden bisher nicht erarbeitet.

## 2.4 Mathematisch-numerische Berechnung von Schwallwellen

Allgemeingültige Verfahren zur Berechnung des gesamten Schwallspülvorganges wurden bisher nicht entwickelt. Insbesondere die mathematische Beschreibung der Erosion und des Transportes von abgesetzten Abwasserinhaltsstoffen ist derzeit nur für Teilprozesse und unter bestimmten Randbedingungen möglich. Jedoch lassen sich die hydrodynamischen Vorgänge für die Initial- bzw. Öffnungsphase sowie die Spül- bzw. Ausbreitungsphase bei der Schwallspülung mit ausreichender Genauigkeit durch mathematisch-numerische Verfahren abbilden. Dabei bleiben die Einflüsse des Feststofftransportes auf die strömungsmechanischen Vorgänge allerdings unberücksichtigt.

### 2.4.1 Grundlagen der hydrodynamischen Strömungssimulation

Grundlage der hydrodynamischen Berechnung von Schwallwellen sind die allgemeinen Strömungsgleichungen, die sich aus der Kontinuitätsgleichung und drei Impulsgleichungen, den so genannten Navier-Stokes-Gleichungen, zusammensetzen. Sie liefern eine exakte mathematische Beschreibung der instationären Strömungsvorgänge beim Ablauf von Schwallwellen im Abwasserkanal. Die Navier-Stokes-Gleichungen einer dreidimensionalen, quell- und senkenfreien Strömung für inkompressible Flüssigkeiten können wie folgt formuliert werden (z. B. SCHLICHTING, 1965):

Kontinuität: 
$$\frac{\partial v_i}{\partial x_i} = 0 \quad (\text{Gleichung 2.1})$$

Impuls: 
$$\frac{\partial v_i}{\partial t} + \frac{\delta(v_i v_j)}{\delta x_j} = -\frac{1}{\rho} \frac{\delta p}{\delta x_j} + \nu \frac{\delta^2 v_i}{\delta x_j^2} + F_i \quad (\text{Gleichung 2.2})$$

für: 
$$i = x, y, z \text{ und } j = x, y, z$$

mit: 
$$p = \text{Druck}, \rho = \text{Dichte und } F = \text{äußere Kräfte}$$

**Tabelle 2.2: Übersicht wesentlicher Feldversuche zur Schwallspülung in Abwasserkanälen**

<b>Autor (Jahr)</b>	<b>Ort der Untersuchung</b>	<b>Spül-einrichtung</b>	<b>Abwasserkanal / Abwasserleitung</b>
OGDEN (1898)	Ithaca, USA	Spülbehälter mit Spülheber	Abwasserleitung: I = 4 - 31 ‰ Kreisprofil $\varnothing$ 203 mm
BÉTANT (1910)	Paris, Frankreich	-	Abwasserleitung, Kreisprofil $\varnothing$ 100 mm
FORCHHEIMER (1930)	Wien, Österreich	Spülkammer, Schieber	Abwasserkanal, Eiprofil 700/1050 mm
SCHWEEN (1936)	Dresden, Deutschland	Schieber	Regenwasserkanal: I = 3 - 67 ‰ Eiprofil 300/450, 350/520, 400/600 mm
PISANO et al. (1979)	Dorchester, USA	HD-Fahrzeug Gummiblase, Schieber	Mischwasserkanal Kreisprofil $\varnothing$ 305 mm, $\varnothing$ 381 mm
FÜHRBÖTER (1980)	Hamburg, Deutschland	Schieber	Mischwasserkanal: I = 0,3 ‰ Kreisprofil DN 2600
BROMBACH (1982)	Bad Mergentheim, Deutschland	Schieber	Mischwasserkanal: L = 1908 m, I = 15 ‰ Kreisprofil DN 300, DN 400
RISTENPART (1995)	Hildesheim, Deutschland	Schieber	Mischwasserkanal: I < 1 ‰ Kreisprofil DN 1500
CHEBBO et al. (1996)	Marseilles, Frankreich	selbsttätige Spülklappe	Mischwasserkanal, Eiprofil 1200/1800 mm
SAKAKIBARA (1996)	Osaka, Japan	Pumpe	Mischwasserkanal, Kreisprofil $\varnothing$ bis 6000 mm
LORENZEN et al. (1996)	Hannover, Deutschland	Schieber	Mischwasserkanal: I < 1,2 ‰ Kreisprofil DN 1800 bis DN 2400 u. Rechteckprofil 2000/4000 mm
LÜTZNER u. BARTH (1996)	Dresden, Deutschland	Drehbogen	Mischwasserkanal: L = 700 m; I = 1 ‰ Kreisprofil DN 1200
LAINÉ et al. (1998)	Paris, Frankreich	selbsttätige Spülklappe	Mischwasserkanal: L = 950 m; I = 1 ‰ Eiprofil 1000/1900 mm
LORENZEN (2000)	Göttingen, Deutschland	selbsttätige Spülklappe	Schmutz- und Mischwasserkanäle, Kreisprofil DN 200 - DN 800
KRAUTH et al. (2001)	Sigmaringen, Deutschland	versenkbares Wehr	Stauraumkanal: L = 210 m; I = 3 ‰ Rechteckprofil 2780/2000 mm
LAPLACE et al. (2002)	Marseille, Frankreich	selbsttätige Spülklappe	Mischwasserkanal: L = 120 m; I = 0,2 - 0,3 ‰ Eiprofil 1100/1700 mm
BERTRAND-KRAJEWSKI et al. (2002)	Lyon, Frankreich	selbsttätige Spülklappe	Mischwasserkanal: L = 300 m; I = 4 ‰ Eiprofil 1200/1800 mm
DOHMANN u. DETTMAR (2002)	Aachen, Deutschland	selbsttätige Spülklappe	3 Mischwasserkanäle: I $\leq$ 1 ‰ Kreisprofil DN 1200, L = 450 m Kreisprofil DN 1200, L = 140 m Eiprofil 1500/1000 mm, L = 600 m
BOSELER et al. (2004)	Solingen, Deutschland	Spülsack	Stauraumkanal: I = 2,4 ‰; L = 300 m Kreisprofil DN 2000

$\varnothing$  = Durchmesser; L = Länge des Abwasserkanals im Unterwasser; I = Sohlgefälle des Abwasserkanals

Die bei einer Massenbilanzbetrachtung ermittelte Kontinuitätsgleichung enthält aufgrund der zuvor gemachten Einschränkungen nur noch den Divergenzterm. Die Impulsgleichungen umfassten Terme für die lokale [1] und konvektive Beschleunigung [2], den Druckgradienten [3], den Reibungsterm [4] und äußere Kräfte [5], wie z. B. die Gravitationskraft. Die Lösung der Navier-Stokes-Gleichungen erfordert den Einsatz numerischer Verfahren und die Einführung problemspezifischer Randbedingungen. Hierfür bieten sich unter-

schiedliche Methoden an, wie die Finite-Differenzen-Methoden (FDM), die Finite-Elemente-Methode (FEM) und die Finite-Volumen-Methode (FVM).

Es hat sich gezeigt, dass die mathematisch-numerische Strömungsberechnung auf Basis der vollständigen dreidimensionalen Navier-Stokes-Gleichungen insbesondere durch die frei beweglichen Ränder (Wasseroberfläche, Wellenfront) zu Instabilitäten (BÜRGISSER, 1999) führt und erhebliche Rechnerkapazitäten benötigt. Infolgedessen bleibt eine Anwendung der Gleichungen bei Planungsaufgaben nur auf wenige Ausnahmefälle beschränkt. Praxisnäher und gängiger ist die numerische Modellierung auf Grundlage der zeitlich gemittelten Strömungsgleichungen (Reynoldsgleichungen) und unter Verwendung einer tiefen- bzw. breitenintegrierten Form.

Die zeitliche Mittelung der Navier-Stokes-Gleichungen (Gleichungen 2.1 und 2.2) führt auf die turbulenten Reynoldsgleichungen, die nicht mehr geschlossen lösbar sind und daher zusätzliche Modellannahmen (Turbulenzmodelle) erforderlich machen (z. B. RODI, 1978). Durch die Integration der Reynoldsgleichungen und der ebenfalls über die Fließtiefe sowie die Annahme weiterer Vereinfachungen (z. B. KUIPERS und VREUGDENHIL, 1973) lassen sich die zweidimensionalen Flachwassergleichungen herleiten:

$$\text{Kontinuität:} \quad \frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial(v_i h)}{\partial x_i} = 0 \quad (\text{Gleichung 2.3})$$

$$\text{Impuls:} \quad \frac{\partial v_i}{\partial t} + v_j \frac{\partial(v_i)}{\partial x_j} = -g \cdot \frac{\partial}{\partial x_i} (h + z_{so}) - \frac{1}{\rho} \frac{\partial(T_{ij} + D_{ij})}{\partial x_j} + F_i \quad (\text{Gleichung 2.4})$$

mit:  $z_{so}$  = geodätische Höhe der Sohle,  $\rho$  = Dichte,  $T$  = Turbulenz,  $D$  = Dispersion,

$F$  = äußere Kräfte sowie  $i = x, y$  und  $j = x, y$

Die in den Gleichungen 2.3 und 2.4 auftretenden Strömungsgrößen sind zeitlich gemittelte Werte. Die Impulsgleichung umfasst Terme für die lokale [1] und konvektive Beschleunigung [2], den Druckgradienten [3], die Turbulenz [4], die Dispersion [5] und für äußere Kräfte [6].

Eine Dimensionsreduzierung durch die Vernachlässigung des horizontalen  $y$ -Impulses und des vertikalen  $z$ -Impulses bei den allgemeinen Strömungsgleichungen (Gleichungen 2.1 und 2.2) führt auf die eindimensionalen Flachwassergleichungen, die auch als die Saint-Venant'schen Differentialgleichungen (DE SAINT-VENANT, 1871) bekannt sind:

$$\text{Kontinuität:} \quad \frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial(uh)}{\partial x} = 0 \quad (\text{Gleichung 2.5})$$

$$x\text{-Impuls:} \quad \frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} = -g \frac{\partial h}{\partial x} \quad (\text{Gleichung 2.6}).$$

mit:  $u = \text{Fließgeschwindigkeit,}$

Die Anwendung der Saint-Venant-Gleichungen bedingt die Beachtung verschiedener Voraussetzungen, die im Folgenden aufgeführt sind:

- die Strömung kann als eindimensional betrachtet werden,
- die Krümmung der Stromfäden ist gering,
- Energie-, Wasserspiegel- und Sohlgefälle sind klein ( $\sin \alpha \approx \tan \alpha$ ),
- Reibungs- und Turbulenzeffekte können analog zur stationären Strömung gesehen werden,
- die Kanalsole ist über die Zeit unveränderlich und
- die Dichte des Wassers ist konstant.

Die Lösung der Flachwassergleichungen macht ebenfalls den Einsatz einer der zuvor erwähnten numerischen Methoden erforderlich. Schwierigkeiten bei der numerischen Lösung von ein- oder zweidimensionalen Gleichungssystemen bereitet insbesondere die Abbildung der Wellenfront auf trockener Sohle (z. B. MOLINARO und NATALE, 1994; CADAM, 2000).

Die praktische Anwendung mathematisch-numerischer Verfahren erfordert üblicherweise eine Kalibrierung spezifischer Parameter, wie z. B. der Sohlrauheit. Zur Erfassung besonderer Strömungsverhältnisse, wie z. B. eine steile Wellenfront oder ein Wechselsprung, existiert eine Vielzahl mathematischer Lösungsalgorithmen, um die ein numerisches Modell erweitert werden kann.

#### 2.4.2 Wesentliche mathematisch-numerische Untersuchungen zur Schwallspülung von Abwasserkanälen

Eine mathematisch-numerische Untersuchung zur Schwallspülung von Abwasserkanälen kann mit ein- oder mehrdimensionalen Modellen durchgeführt werden. Die bisher durchgeführten Berechnungen konzentrieren sich vornehmlich auf eine eindimensionale Betrachtung der Strömungsvorgänge. Bei wenigen mathematisch-numerischen Untersuchungen wurde auch der Feststofftransport berücksichtigt.

Bei Untersuchungen von GATKE und BOCHERDING (1996), CAMPISANO und MODICA (2003), CAMPISANO et al. (2005), FAN (2004), DETTMAR (2005) sowie DETTMAR und STAUFER (2005) kamen eindimensionale Modelle basierend auf den Saint-Venant'schen Differentialgleichungen zum Einsatz. LAINÉ et al. (1998), SCHAFFNER et al. (2004) und KIRCHHEIM et al. (2005) haben mit Hilfe der dreidimensionalen Reynoldsgleichungen Schwallströmungen in Abwasserkanälen abgebildet. Die von den Autoren verwendeten Programme unterscheiden sich bei den Annahmen zur Initialisierung von Spülwellen, beim Berechnungsalgorithmus, bei der Diskretisierung sowie der Kalibrierung und Verifizierung der Modelle (s. Tabelle 2.3). Die mathematische Beschreibung für die Initialisierung einer Schwallwelle an der Spüleinrichtung geschieht mit einer aus empirischen Daten erhaltenen Zuflussgangsganglinie oder durch die Annahme eines in sich zusammenfallenden Wasserkörpers (Dammbruch). Eine detaillierte Modellierung des Öffnungsvorganges einer Schwallspüleinrichtung ist in vielen Fällen zu aufwendig und bleibt somit auf wenige Forschungsanwendungen beschränkt.

Der Stofftransport wird nur von LAINÉ et al. (1998) und CAMPISANO et al. (2005) näher betrachtet, während die übrigen der oben genannten Autoren von den berechneten Sohl-schubspannungen oder Fließgeschwindigkeiten auf den Reinigungsprozess schließen. LAINÉ et al. bildeten die makroskopischen Ablagerungsbewegungen in einem Abwasserkanal mit einem Mehrphasenmodell ab. Die Ablagerungen wurden als hoch viskose Flüssigkeit modelliert. CAMPISANO et al. verwendeten ein numerisches Modell mit dimensionslosen Kennzahlen basierend auf den De-Saint-Venant-Exner Gleichungen für die Strömungsberechnung und eine von der Meyer-Peter und Müller-Gleichung abgeleitete Formel für die Ermittlung des Sedimenttransportes.

Eine Modellierung von Schwallwellen zur Reinigung von Stauraumkanälen und damit verbundenen Strömungseigenschaften an der Drosseleinrichtung sind bis dato nicht bekannt.

**Tabelle 2.3: Wesentliche mathematisch-numerische Untersuchungen zur Schwallspülung von Abwasserkanälen**

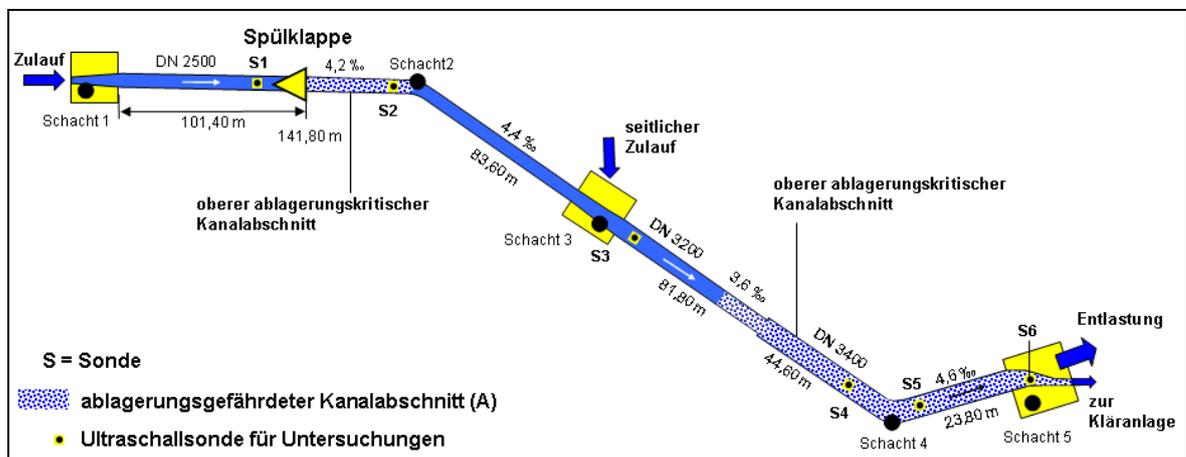
<b>Autor</b>	<b>Initialisierung</b>	<b>Diskretisierung</b>	<b>Programm</b>	<b>Kalibrierung</b>
CAMPISANO und MODICA (2003)	Zuflussganglinie	1D-Finite Volumen	-	keine
FAN (2004)	Zuflussganglinie	1D-Finite Differenzen	SWMM (EXTRAN)	keine
GATKE und BORCHERDING (1996)	Zuflussganglinie	1D-Finite Differenzen	EXTRAN	Labordaten
LAINÉ et al. (1998)	Zuflussganglinie	3D-Finite Elemente	FLUENT	keine
SCHAFFNER et al. (2004)	Dammbruch	3D-Finite Volumen	StarCD	keine
DETTMAR (2005)	Dammbruch	1D-Finite Volumen	Fluvius	keine
DETTMAR und STAUFER (2005)	Dammbruch	1D-Finite Volumen	Fluvius	keine
KIRCHHEIM et al. (2005)	Dammbruch	3D-Finite Volumen	StarCD	keine
CAMPISANO et al. (2005)	Zuflussganglinie	1D-Finite Volumen	-	Labordaten

### 3 Untersuchungen

Die durchgeführten Untersuchungen umfassen Versuche in dem vom Ruhrverband Essen betriebenen Stauraumkanal Markstraße in Bochum sowie mathematisch-numerische Simulationen. Im Rahmen der Feldversuche wurde eine neu entwickelte Schwallspülklappe in den Stauraumkanal eingesetzt.

#### 3.1 Örtliche Verhältnisse am Stauraumkanal Markstraße

Der Stauraumkanal Markstraße besitzt eine unten liegende Entlastung und ist zudem durch eine Länge von rund 400 m, Nennweiten von DN 2500 bis DN 3400 sowie Sohlengefälle zwischen 3,6 ‰ und 4,6 ‰ gekennzeichnet. Die Lageplanskizze in Bild 3.1 verdeutlicht die örtlichen Gegebenheiten.

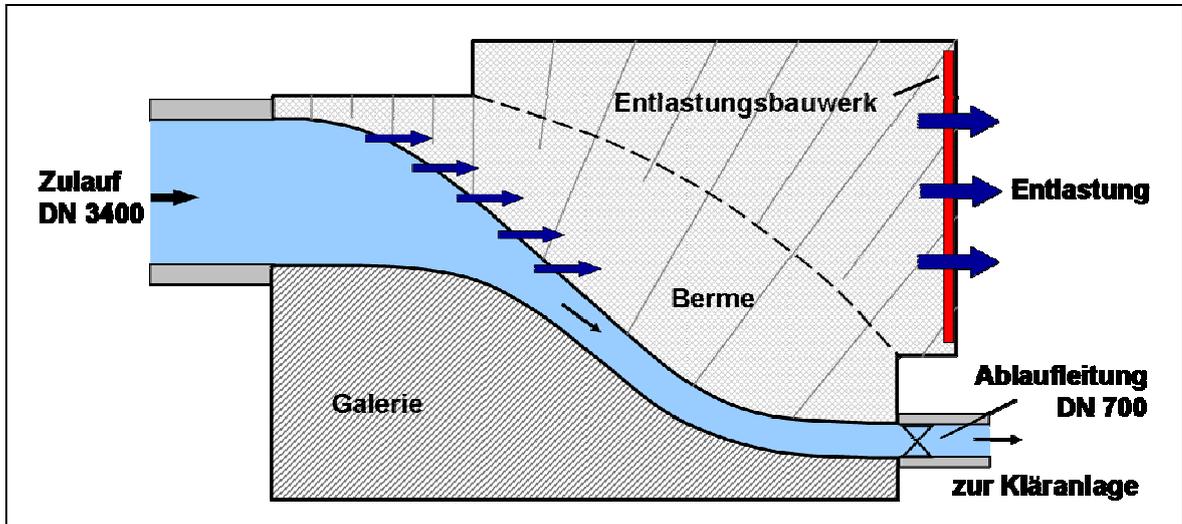


**Bild 3.1:** Lageplanskizze des Stauraumkanals Markstraße in Bochum

Der Standort der Klappe wurde aufgrund der Erfahrungen aus vorausgegangenen Forschungsvorhaben festgelegt. Neben den die Reinigung betreffenden Verhältnissen, wie Einstellung des Spülwasservolumens, sind auch technische Belange, z.B. Stromversorgung, Datenfernübertragung, zu beachten.

Die installierte Schwallspülklappe unterteilt den SK in einen rund 300 m langen Spül- und einen rund 100 m langen Staubereich. Am Schacht 3 ist ein seitlicher Zulauf angeschlossen. Oberhalb der Schächte 2, 4 und 5 liegen ablagerungsgefährdete Kanalabschnitte. Hier sind die Sohlenschubspannungen des Trockenwetterabflusses zu gering, um einen dauerhaft ablagerungsfreien Betrieb des Kanals zu gewährleisten. Dabei begünstigen die großen Nennweiten und die Umlenkungen im Trassenverlauf die Sedimentationsvorgänge. Beobachtungen haben ergeben, dass die gleichmäßigen Sohlengefälle in den Haltungen durch Unterbögen unterbrochen werden.

Im Schacht 5 des Stauraumkanals sind das Entlastungsbauwerk und der Übergang des Speicherkanals (DN 3400) zur Ablaufleitung (DN 700) angeordnet. Die konstruktive Ausbildung dieses Schachtbauwerkes ist in Bild 3.2 dargestellt.



**Bild 3.2:** Lageplanskizze von Schacht 5 mit Entlastungsbauwerk und Ablaufleitung

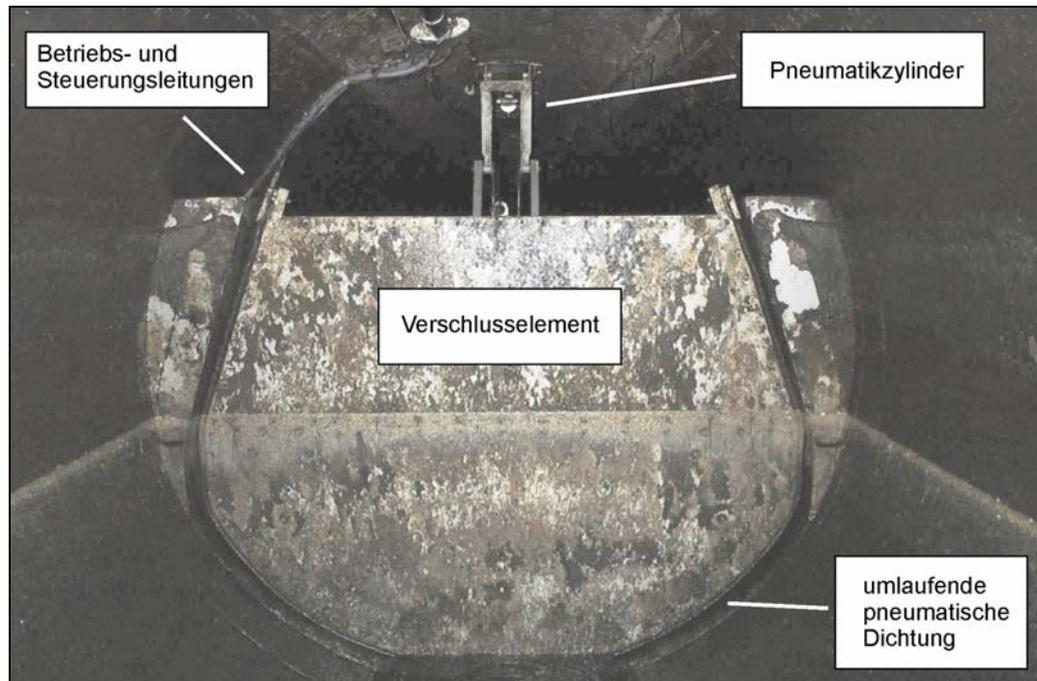
Der Übergang wird durch ein sich verjüngendes offenes Gerinne geschaffen, das die Nennweiten DN 3400 und DN 700 miteinander verbindet. Eine hoch liegende Galerie und eine niedrig liegende Bermenfläche begrenzen das Gerinne zu den Seiten. Die Abflussdrosselung bei Niederschlagsabflussereignissen erfolgt durch einen im Bereich der Ablaufleitung angeordneten Elektroschieber, der bei Spülvorgängen vollständig geöffnet wird.

### 3.2 Merkmale der eingesetzten Schwallspülklappe

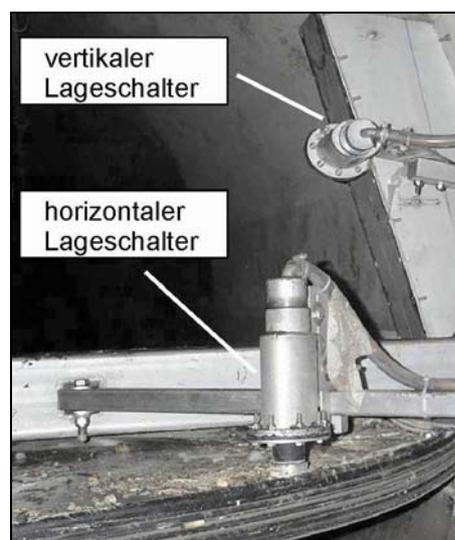
Vor der Durchführung der Untersuchungen wurde die für großformatige Abwasserkanäle konzipierte Schwallspülklappe rund 100 m unterhalb von Schacht 1 des Stauraumkanals installiert (s. Bild 3.1). Das Foto in Bild 3.3 zeigt das neue Reinigungssystem im montierten Zustand.

Die Klappe setzt sich aus einem rahmenlosen Verschlusselement mit umlaufender pneumatischer Dichtung, einer Betriebsstation mit Druckluftherzeugung und elektropneumatischer Steuerung, die zwei Lageschalter einschließt, einem Pneumatikzylinder, 2 Ultraschallsonden sowie Betriebs- und Steuerleitungen zusammen. Der Pneumatikzylinder und die Mechanik zur Öffnung der Schwallspülklappe sind unterstromseitig angeordnet. Jeweils eine der Ultraschallmesssonden ist oberhalb bzw. unterhalb der Spülklappe angeordnet, um über die Messung der Wasserstände den Spülbetrieb zu steuern. Die in Bild 3.4 näher dargestellten Lageschalter (horizontal bzw. vertikal) geben die Position des Verschlusselements an. Sie dienen zur Steuerung und Überwachung des Spülbe-

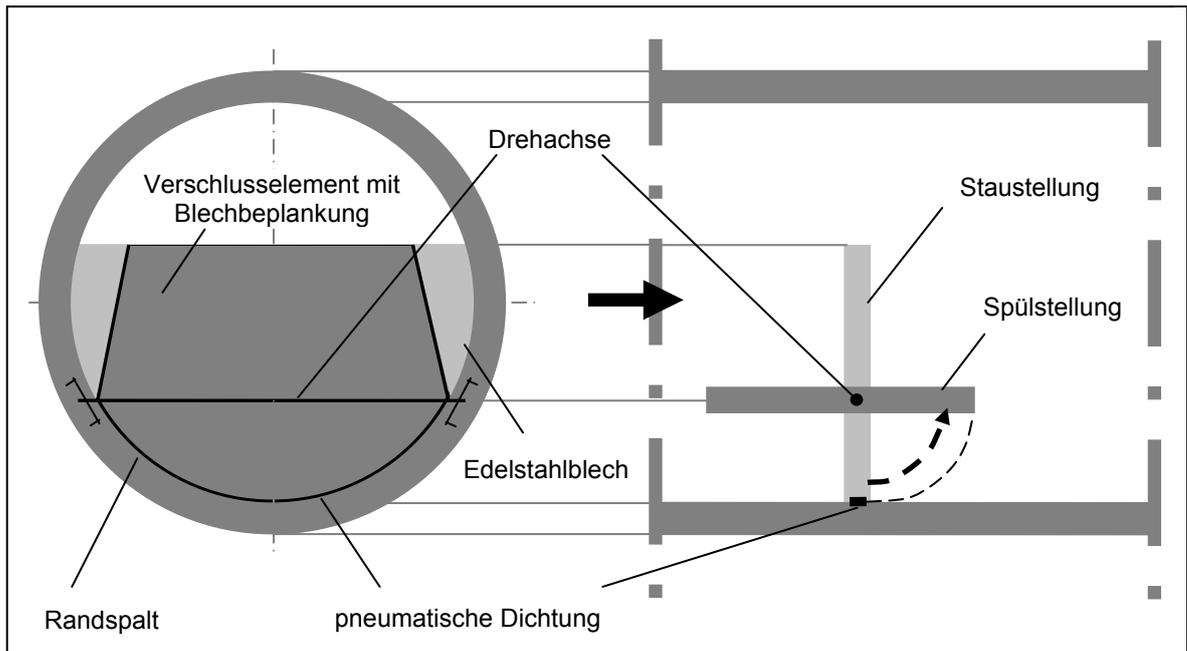
triebs. Für die nachträgliche Installation sind alle Einzelteile des Systems so konstruiert, dass sie durch einen Regelschacht zum Standort im Abwasserkanal transportiert und dort miteinander verbunden werden können. Die Bauteile und das Funktionsprinzip der Spül-  
einrichtung sind in Bild 3.5 schematisch dargestellt.



**Bild 3.3:** Foto der im Stauraumkanal Markstraße eingesetzten Schwallspülklappe



**Bild 3.4:** Positionierung der Lageschalter zur Positionserkennung des Verschlusselements



**Bild 3.5:** Schematische Darstellung der neuen Schwallspülklappe in zwei Ansichten

In der Staustellung verschließt die Klappe den unteren Kanalquerschnitt und erzeugt durch den Rückhalt des zufließenden Abwasserstroms ein Spülwasservolumen, das durch die Stauhöhe sowie die Profil- und Gefälleverhältnisse im Staubereich bestimmt wird. Dazu wird das Verschlusselement mit Hilfe des Pneumatikzylinders in eine vertikale Position (Staustellung) gedreht und die umlaufende pneumatische Dichtung aktiviert. Zur Freigabe des gestauten Spülwasservolumens wird die Dichtung entlüftet und das Verschlusselement in die Ausgangs- bzw. Spülstellung gebracht. Durch die schlagartige Öffnung des Klappenelementes wird eine Schwallwelle erzeugt. Ein für die Druckerzeugung verwendeter Kompressor, Mess- und Steuerungseinrichtungen für den Betrieb der Klappe sowie Komponenten für die Datenübertragung sind in einem in unmittelbarer Nähe des Schachtes 1 aufgestellten Schaltschranks untergebracht (s. Bild A 1, Anhang). Hierüber erfolgt auch die Energieversorgung des Systems.

### 3.3 Merkmale des verwendeten Programms Fluvius-1Di

Für die durchgeführten Simulationen wurde das mathematisch-numerische Modell FLUVIUS-1Di verwendet. Das Berechnungsprogramm wurde von SCHRAMM (2002) für die eindimensionale instationäre Berechnung von Strömungen in naturnahen abflussschwachen Fließgewässern entwickelt. Daher ist FLUVIUS in der Lage, diskontinuierliche Fließzustände, wie z. B. Wechselsprünge oder dammbruchinduzierte Schwall- bzw. Sunkströmungen, zu erfassen. Des Weiteren können Beschleunigungs- und Verzögerungseffekte infolge einer sich in Fließrichtung stark ändernden Gerinnegeometrie oder Betriebsrauheit, kleine Fließtiefen sowie ein Trockenfallen der Sohle berücksichtigt wer-

den. Kernstück des mathematisch-numerischen Modells ist die Lösung der Saint-Venant-Gleichungen (Gleichungen 2.5 und 2.6) mit Hilfe der konservativen Methode von Godunov. Die Anwendung eines konservativen Verfahrens ist nötig, da nur ein solches die Berechnung diskontinuierlicher Fließzustände erlaubt. Godunov benutzt die Integraldarstellung der Erhaltungsgleichungen und benötigt daher eine Diskretisierung der Berechnungsdomäne nach der Methode der finiten Volumen. Funktionswerte werden nicht wie bei der Methode der finiten Differenzen an diskreten Knoten bestimmt, sondern als Mittelwerte über ein finites Volumen (Berechnungszelle) berechnet. Ein Vorteil der Methode der finiten Volumen gegenüber anderen numerischen Methoden liegt darin, dass Bilanzfehler nicht auftreten können.

Die Anwendung der Godunov-Methode setzt bereichsweise konstante Werte in den Berechnungszellen zu einem bestimmten Zeitpunkt voraus, damit der numerische Fluss zwischen zwei Zellen mit Hilfe von lokalen Riemann-Problemen exakt ermittelt werden kann. Das Riemann-Problem beschreibt den diskontinuierlichen Übergang zwischen zwei Bereichen gleichförmigen Fließens für jeden Berechnungszeitschritt, wie z. B. bei der plötzlichen Freigabe eines Wasserkörpers, wobei so genannte Schock- und Verdünnungswellen auftreten. Zur Vermeidung langer Rechenzeiten erfolgt die Bestimmung der Flussterme mit dem Verfahren von Roe. Es wird zunächst eine Näherungslösung des Fließzustandes berechnet und für diese dann der physikalische Fluss ermittelt. Aus der Vielzahl schwacher Lösungen wird mit Hilfe der Entropiebedingung die physikalisch sinnvolle bestimmt.

Die Geschwindigkeit von Schockwellen an der Wellenfront (Schockgeschwindigkeit) entspricht der Fließgeschwindigkeit des Spülwellenkopfes. Ihre Bestimmung ist für die numerische Lösung diskontinuierlicher Strömungsphänomene unbedingt erforderlich. Zur Auflösung von Schockgeschwindigkeiten kommt in FLUVIUS die Rankine-Hugoniot-Sprungbedingung zur Anwendung.

Da die zuvor genannten Strömungsphänomene auch bei der Reinigung von Abwasserkanälen mit Schwallwellen auftreten, wie beispielsweise bei der schlagartigen Freigabe eines aufgestauten Spülwasservolumens, der Ausbreitung von Schwallwellen auf „trockenen“ Sohlen von Abwasserkanälen oder den Abflussprozessen am Ablauf von Stauraumkanälen, ist das gewählte mathematisch-numerische Programm dazu geeignet, reinigungsrelevante Strömungsgrößen, wie z. B. Abfluss, Fließgeschwindigkeit oder Sohl-schubspannung, zu bestimmen.

### 3.4 Versuchsprogramm

Mit dem Ziel, die Randbedingungen für einen optimalen Betrieb des neu entwickelten Reinigungssystems sowie dessen Leistungsfähigkeit und Stabilität zu ermitteln, wurden von Mai 2004 bis Juli 2005 umfangreiche großtechnische Untersuchungen im Stauraumkan-

nal Markstraße unternommen. Zudem wurden mathematisch-numerische Untersuchungen durchgeführt.

### 3.4.1 Großtechnische Untersuchungen

#### 3.4.1.1 Allgemeines

Die großtechnischen Untersuchungen im Stauraumkanal Markstraße dienten der Ermittlung des Reinigungsvermögens, der durch die eingesetzte Spülklappe erzeugten Schwallwellen. Dazu wurden umfangreiche Spülversuche mit „natürlichen“ und „künstlichen“ Ablagerungsmaterialien unternommen. Die durchgeführten Feldversuche lassen sich den folgenden Arbeitspunkten zuordnen:

- Hydraulische und stoffliche Untersuchungen bei Trockenwetter,
- Spülversuche zur Grundreinigung,
- Spülversuche zur Präventivreinigung,
- Beobachtung des Klappenbetriebes,
- Schwefelwasserstoffmessungen in der Kanalatmosphäre und
- Stofftransportuntersuchungen.

Zur Bestimmung der hydraulischen Gegebenheiten bei Trockenwetter und Niederschlagsabflussereignissen (NAE) erfolgten kontinuierliche Wasserstandsmessungen. Dafür kamen sechs hoch auflösende Wasserstandsmesssonden (Prosonic FMU 40) der Endress+Hauser Messtechnik GmbH+Co (s. Bild A 2, Anhang) zum Einsatz. Die Verteilung (Betriebspunkte) dieser fest installierten Ultraschallsonden (S1 - S6) im Stauraumkanal ist Bild 3.1 zu entnehmen. Es wurden minimale Aufnahmeintervalle von bis zu zwei Sekunden eingestellt, die auch eine Erfassung der Schwallwellen, abgesehen vom Schwallwellenkopf, erlaubten. Zudem wurden bei einer Vielzahl der erzeugten Schwallwellen die Durchflusswerte unter Anwendung eines mobilen Messgerätes der Nivus GmbH (PCM-Pro) aufgezeichnet (s. Bild A 3, Anhang). Dies erfolgte durch eine parallele Messung von Fließtiefe und Fließgeschwindigkeit an verschiedenen Punkten des Stauraumkanals in der Nähe der Ultraschallsonden. Hierbei wurden minimale Aufnahmeintervalle von bis zu fünf Sekunden eingestellt.

Die Abwassereigenschaften des Trockenwetter- und Schwallwellenabflusses wurden durch Analysen wesentlicher Parameter mit Hilfe von Stichproben bestimmt. Die zeitliche und räumliche Entwicklung der betrachteten Ablagerungsmaterialien konnte mit Hilfe eines selbst gefertigten punktuellen Höhenstandsmessgerätes bestimmt werden (s. Bild A 4, Anhang). In mittleren Abständen von 2,5 m entlang der Sohlmittellinie wurden die Sedimenthöhen manuell aufgenommen. Bei der Ermittlung der Ablagerungsvolumina

wurde vereinfachend eine ebene Sedimentverteilung im Messquerschnitt angenommen. Die Messpunkte wurden linear miteinander verbunden. Die Ermittlung wesentlicher Ablagerungsparameter geschah ebenfalls mittels Beprobung der sedimentierten Abwasserinhaltsstoffe.

#### 3.4.1.2 Spülversuche zur Grundreinigung

Die Grundreinigung von Abwasserkanälen mittels Schwallspülung ist in der Regel eine singuläre Maßnahme. Hierbei sollen bereits vorhandene Ablagerungen mit einer Vielzahl von Schwallwellen beseitigt werden.

Bei den Spülversuchen zur Grundreinigung war zu ermitteln, ob die umfänglichen Ablagerungen im Stauraumkanal Markstraße mit Hilfe von Schwallwellen zu entfernen waren. Dazu wurde ein nahezu kontinuierlicher Spülbetrieb von Schwallwellen mit Stauhöhen zwischen 1,0 und 1,7 m eingestellt und das Reinigungsvermögen verschiedener Schwallwellen untersucht. Zudem konnten mit der Erfassung von Wasserständen und Durchflüssen die notwendigen Daten für die Kalibrierung und Verifizierung der verwendeten mathematisch-numerischen Modelle bereitgestellt werden.

#### 3.4.1.3 Spülversuche zur Präventivreinigung

Die Präventivreinigung von Abwasserkanälen soll mittels Schwallspülung dauerhaft ablagerungsfreie Kanalsohlen schaffen. Dafür sind bei Trockenwetter und/oder am Ende von Niederschlagsabflussereignissen Schwallwellen zu generieren, die eine zeitnahe Beseitigung von Ablagerungen ermöglichen bzw. eine Ablagerungsbildung verhindern.

Die Spülversuche zur Präventivreinigung dienten der Bestimmung des einzustellenden Spülbetriebes hinsichtlich der Wellengröße (Volumen, Stauhöhe), deren Anzahl und Verteilung, um erwartete Ablagerungen umgehend beseitigen zu können. Die Versuche bei der Präventivreinigung erfolgten mit Originalablagerungen. Ferner wurden Schwallwellen bei einem weitgehend ablagerungsfreien Zustand betrachtet.

#### 3.4.1.4 Beobachtung des Klappenbetriebes

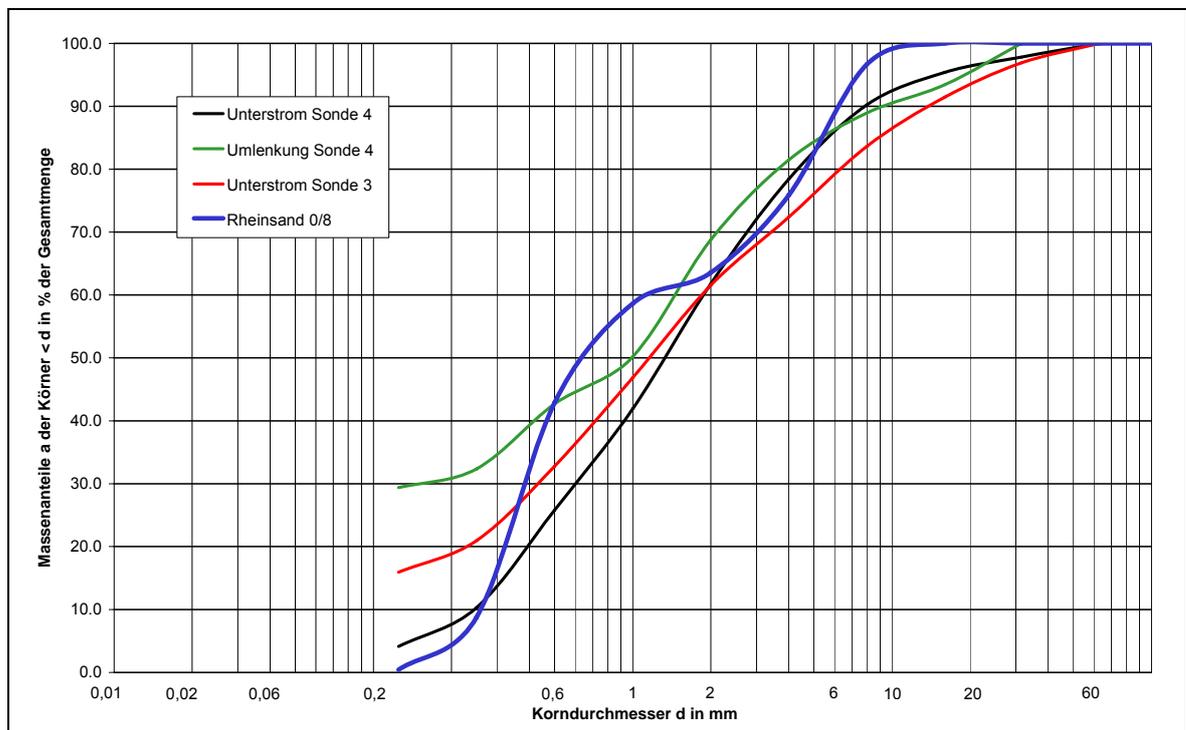
Der Betrieb der eingesetzten Schwallspülklappe wurde während der Spülversuche durch kontinuierliche Wasserstandsmessungen (s. Bild 3.1) im Stau- und Spülbereich der Einrichtung über mehrere Monate beobachtet. Darüber hinaus erfolgte eine wöchentliche Inaugenscheinnahme der Klappe. Im Mittelpunkt des Monitorings stand die Erfassung der Betriebsstabilität der neuen Einrichtung sowie die Feststellung etwaiger konstruktiver Mängel. Die gewonnenen Erkenntnisse lieferten Vorgaben für die Durchführung von Instandhaltungs- und Wartungsarbeiten.

### 3.4.1.5 Schwefelwasserstoffmessungen in der Kanalatmosphäre

Zur Erfassung eventueller Ausgasungsvorgänge bei den Spülungen erfolgten Schwefelwasserstoffmessungen an verschiedenen Punkten im Stauraumkanal. Dafür wurden Gasdatenlogger vom Typ OdaLog der Firma App-Tek verwendet (s. Bild A 5, Anhang).

### 3.4.1.6 Untersuchungen zum Stofftransport

Des Weiteren sollten Untersuchungen mit einem Sand-Kies-Gemisch zusätzliche Erkenntnisse zum Reinigungsvermögen von Schwallwellen mit geringer Stauhöhe liefern sowie den Einfluss der Trassenführung und der Kanalquerschnitte auf den Stofftransport verdeutlichen. Dazu wurden 14 Mg eines mineralischen Ablagerungsmaterials in den Stauraumkanal eingebracht (s. Bild A 6, Anhang). Die Körnungslinie des verwendeten Gemisches ist in Bild 3.6 dargestellt. Der mittlere Korndurchmesser ( $d_{50}$ ) beträgt 0,62 mm. Die kritische Erosionsschubspannung nach SHIELDS (1936) wurde zu 1,6 N/m<sup>2</sup> berechnet. Die Körnungslinie entspricht näherungsweise den Ablagerungen, die im SKU Markstraße im Bereich von Sonde 3 und Sonde 4 aufgefunden wurden. Das verwendete Sand-Kies-Gemisch weist im Vergleich zu „natürlichen“ Ablagerungen nur wenig kohäsive Eigenschaften auf.



**Bild 3.6:** Körnungslinie des verwendeten Sand-Kies-Gemisches im Vergleich zu Körnungslinien von Originalablagerungen im SKU Markstraße

In Anlehnung an die Erfordernisse der Präventivreinigung und Ausbildung des Schachtbauwerkes 5 wurde die Stauhöhe auf  $h_{\text{stau}} = 1,00$  m mit einem zugehörigen Spülwasser-

volumen von  $V_{\text{Spül}} = 138 \text{ m}^3$  festgelegt. Dabei wurde auf Erkenntnisse der durchgeführten mathematisch-numerischen Untersuchungen zurückgegriffen. In Abhängigkeit vom Trockenwetterabfluss konnten zwischen 8 und 10 Wellen pro Tag kontinuierlich erzeugt werden. Die Erfassung des Stofftransportes erfolgte durch Messung von Ablagerungshöhen, Wasserständen sowie Beprobung der Schwallwelle am Stauraumkanalablauf. Die Beprobung wurde mit Einzelstichproben in 30-Sekunden-Intervallen und hinsichtlich der Konzentrationsbestimmung abfiltrierbarer Stoffe (AFS) vorgenommen.

### 3.4.2 Mathematisch-numerische Untersuchungen

#### 3.4.2.1 Allgemeines

Im Rahmen der mathematisch-numerischen Untersuchungen wurden Modelle der Schwallwellenströmung im SKU Markstraße entwickelt. Dabei wurde der Stauraumkanal sowohl im ablagerungsfreien als auch im ablagerungsbehafteten Zustand betrachtet. Die entwickelten Strömungsmodelle wurden anhand der im Stauraumkanal gewonnenen hydraulischen Messdaten kalibriert und verifiziert. Anschließend erfolgte mit Hilfe der Modelle die Berechnung einer Vielzahl von Schwallströmungen mit unterschiedlichen hydraulischen Randbedingungen. Diese Berechnungen wurden mit dem eindimensionalen, instationären Wasserspiegellagenprogramm FLUVIUS-1Di unternommen (s. Kap. 3.3). Die erzielten Ergebnisse dienten der Bewertung des Reinigungsvermögens erzeugter Schwallwellen sowie der Optimierung des Spülbetriebes.

#### 3.4.2.2 Vorgehensweise bei der Anwendung

Die Anwendung von FLUVIUS erfordert die Bereitstellung verschiedener geometrischer und hydraulischer Informationen. In Bild 3.7 sind die Eingabedaten für die Berechnung einer Schwallwelle im Abwasserkanal schematisch veranschaulicht. Im Einzelnen müssen für die Durchführung eines Berechnungslaufes Profil- und Rauheitsdaten, Zu- und Ablaufrandbedingungen, Anfangsbedingungen sowie Steuerungsdaten vorliegen. Die Steuerungsdaten umfassen neben der Koordinierung der Eingabedaten auch Informationen zum numerischen Verfahren, zur räumlichen und zeitlichen Diskretisierung sowie zur Datenausgabe.

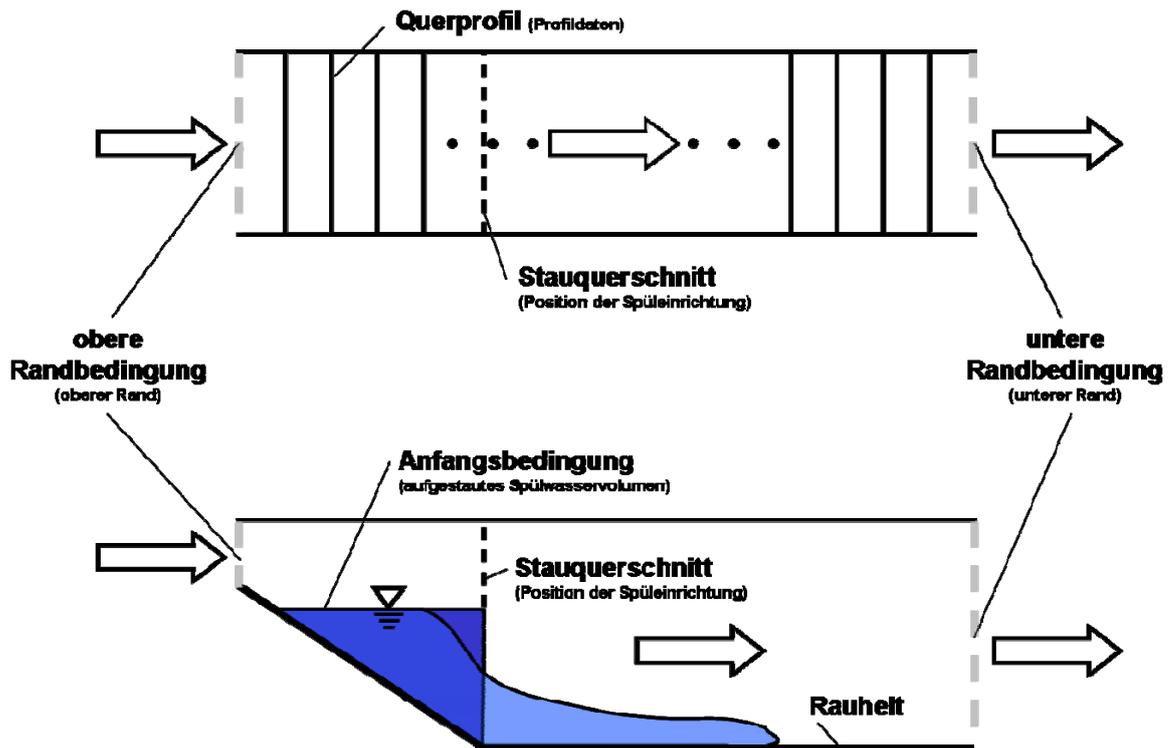


Bild 3.7: Skizze der Eingabedaten für die Berechnung einer Schwallwelle im Abwasserkanal

Bei der Entwicklung von Modellen der Schwallströmung in Abwasserkanälen muss eine räumliche Diskretisierung der Untersuchungsstrecke in Berechnungszellen vorgenommen werden. Dies erfolgte hier durch eine Unterteilung des betrachteten Abwasserkanals mit Hilfe der Vorgabe von Querprofilaten in konstanten Abständen von 1 m. Die so entstandenen numerischen Berechnungsnetze konnten mit Hilfe der in FLUVIUS implementierten adaptiven Netzverfeinerung an die sich ausbildenden Strömungen angepasst werden. Als Verfeinerungskriterien wurden Schwellenwerte in Form von minimalen Gradienten angegeben, die festlegen, wann welche Zellen zu verändern sind. Dadurch wurden weitere Profile bis zu einem minimalen Abstand von 0,1 m eingefügt. Zur Zeitdiskretisierung wurden zur Sicherstellung einer stabilen Berechnung eine Conrad-Friedrich-Levy Zahl (CFL-Zahl) von 0,9 und ein maximaler Zeitschritt von 1 s vorgegeben. Die CFL-Zahl gibt bei expliziten Rechenschemata ein Stabilitätskriterium vor. Mit CFL-Zahlen kleiner eins wird gewährleistet, dass die Strecke, die eine Welle innerhalb eines Zeitschrittes zurücklegte, kürzer ist, als die Länge der Berechnungszelle. Dadurch wird erreicht, dass die Informationen, die die Zustandsgrößen im nächsten Zeitschritt in der Nachbarzelle beeinflussen, für die Berechnung zur Verfügung stehen.

## 4 Ergebnisse

### 4.1 Großtechnische Untersuchungen

#### 4.1.1 Hydraulische und stoffliche Gegebenheiten bei Trockenwetter

Zur Ableitung von Kriterien zur Bestimmung ablagerungsgefährdeter Kanalabschnitte wurde der Trockenwetterabfluss näher untersucht. Aus den Fließgeschwindigkeitsmessungen in der Nähe der Füllstandsmesssonden wurde mit einem statischen Ansatz die Sohlschubspannung unter Annahme einer örtlichen Betriebsrauheit an der Messstelle von  $k_b = 0,1$  mm ermittelt. Die Fließgeschwindigkeitsmessungen wurden nach der Entfernung der Ablagerungen durchgeführt. Die im Tagesgang variierenden Sohlschubspannungen sind in Tabelle 4.1 dargestellt.

Die Stellen, an denen ein Schwellenwert von  $1,6$  N/m<sup>2</sup> deutlich unterschritten wird, liegen im Einflussbereich der Kanalumlenkungen an Schacht 2 und Schacht 4 (s. Bild 3.2). Dieser Schwellenwert ist für einen ablagerungsfreien Betrieb von Mischwasserkanälen nach dem ATV-Arbeitsblatt A 110 gemäß Gleichung 4.1 errechnet worden.

$$\tau_{\min} = 4,1 \cdot Q^{1/3} \quad (\text{Gleichung 4.1})$$

Daraus ist abzuleiten, dass Umlenkungen in der Trassenführung Ausgangspunkte zur Ablagerungsbildung sind. Diese Folgerung wird durch Beobachtungen bei den Stofftransportversuchen bestätigt, vgl. Kapitel 4.1.6. Die hohen Schubspannungen an Schacht 3 sind auf den seitlichen Zulauf über eine Schusssrinne und im Schacht 6 auf die dort angeordnete steile Trockenwetterrinne zurückzuführen. Die Umlenkung und Verjüngung des Gerinnes im Zulauf von Schacht 5 wirkte sich nicht auf die erzeugten Sohlschubspannungen des Trockenwetterabflusses bis an Sonde 6 aus (s. Tabelle 4.1).

**Tabelle 4.1: Gemessene mittlere Sohlschubspannungen bei Trockenwetter**

	S 1	S 2	S 3 <sup>1)</sup>	S 4 <sup>1)</sup>	S 5 <sup>2)</sup>	S 6	7 <sup>3)</sup>
Sohlengefälle	4,2 ‰	4,2 ‰	4,4 ‰	3,6 ‰	4,6 ‰	6,9 ‰	4,3 ‰
min $\tau_0$ [N/m <sup>2</sup> ]	0,73	0,24	2,2	0,74	0,39	2,16	0,69
max $\tau_0$ [N/m <sup>2</sup> ]	1,19	<b>0,35</b>	2,66	1,42	<b>0,41</b>	2,23	0,92
Mittelwert $\tau_0$ [N/m <sup>2</sup> ]	0,95	0,28	2,43	1,27	0,40	2,20	0,79
1) Oberwasser, 2) Unterwasser, 3) Ablaufkanal, S = Sonde							

Die Abwassereigenschaften beim Trockenwetterabfluss zeigen die Charakteristik von kommunalem Abwasser. Die Analyseergebnisse einer Beprobung sind in Tabelle 4.2 dargestellt. Weitere ermittelte Werte zu NO<sub>3</sub>-N und NO<sub>2</sub>-N liegen unterhalb der Bestimmungsgrenze von 0,1 mg/l bzw. 0,02 mg/l.

**Tabelle 4.2: Abwassereigenschaften bei Trockenwetter**

	<b>AFS</b>	<b>GV</b>	<b>CSB (hom.)</b>	<b>CSB (filt.)</b>	<b>pH</b>	<b>NH<sub>4</sub>-N</b>	<b>BSB<sub>5</sub></b>
	mg/l	%	mg/l	mg/l	-	mg/l	mg/l
Probe 1 SKU Markstraße	244	48.5	521	340	7.8	24	199
Probe 2 SKU Markstraße	174	90.3	512	361	7.48	23	239
Probe 3 SKU Markstraße	184	73.9	441	281	7.58	21	185
Probe 4 SKU Markstraße	322	61.2	617	345	7.3	27	280
Mittelwert	231	68	523	332	7.54	23.75	225.75
Kommunales Abwasser <sup>1)</sup>	500		600			60	300
1) mittlere Konzentrationen von Abwasserinhaltsstoffen in kommunalem Abwasser (ATV, 1985)							

## 4.1.2 Spülversuche zur Grundreinigung

### 4.1.2.1 Eigenschaften vorhandener Ablagerungen

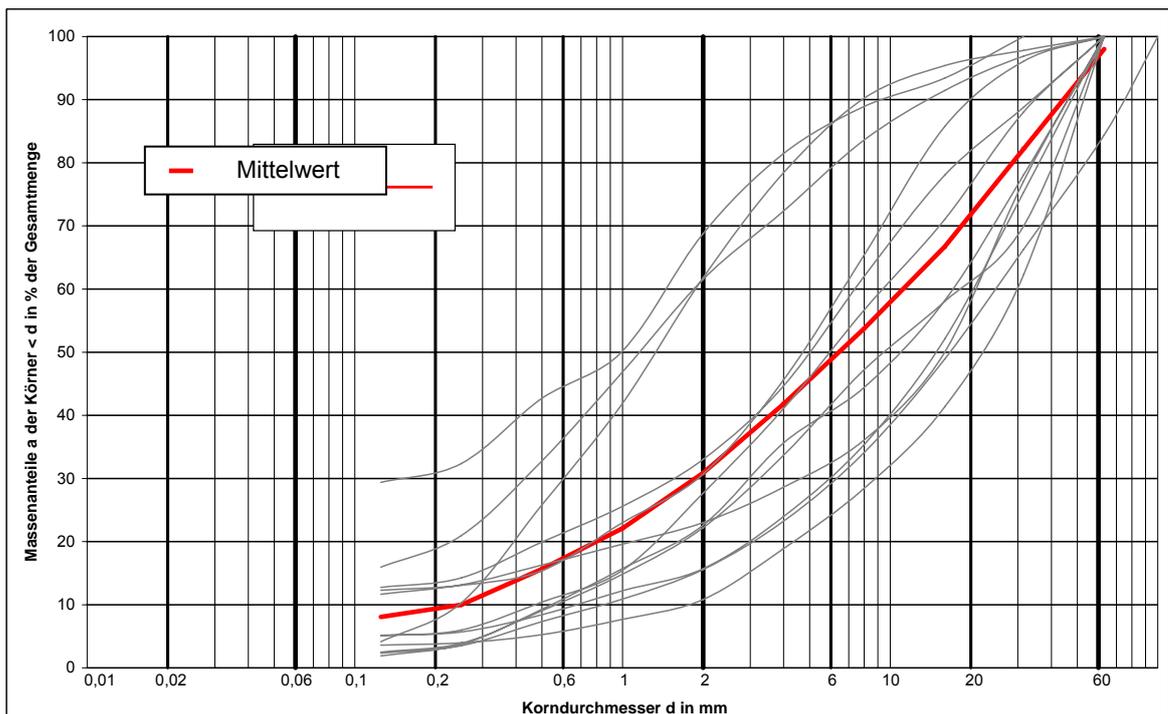
Zu Beginn der Untersuchungen im Stauraumkanal wurden dauerhafte Ablagerungen in zwei Kanalabschnitten vorgefunden. Die Abschnitte mit einer Länge von insgesamt etwa 150 m lagen oberhalb von Schacht 2 (oberer Abschnitt) und unterhalb von Schacht 3, vgl. Kapitel 3.1. In beiden Abschnitten kam es zur Ablagerung von Hygieneartikeln, mineralischem und organischem Material, vgl. Bild 4.1. Die Ablagerungshöhen lagen im oberen Abschnitt bis zu 8,5 cm sowie im unteren Abschnitt bis zu 36,0 cm. Der Punkt der maximalen Ablagerungshöhe lag unterhalb der Trassenumlenkung an Schacht 4.



**Bild 4.1: Fotos der im Stauraumkanal vorgefundenen Ablagerungen (linkes und mittleres Foto: unterer Abschnitt; rechtes Foto: oberer Abschnitt)**

Die Siebanalyse von Sedimentproben zeigt eine breite Streuung der Körnungslinien, vgl. Bild 4.2. Die ermittelten Werte liegen in dem aus der Literatur bekannten Rahmen. Ein

Zusammenhang zwischen dem Korndurchmesser der sedimentierten Abwasserinhaltsstoffe und den örtlichen Gegebenheiten wie Sohlengefälle konnte nicht festgestellt werden. Der mittlere Korndurchmesser ( $d_{50}$ ) wurde im Mittel zu 6,4 mm und die mittlere kritische Schubspannung für den Erosionsbeginn nach SHIELDS (1936) zu  $\tau_{e,krit} = 11,9 \text{ N/m}^2$  bestimmt. An Hand der mittleren Schüttdichte von  $1.723 \text{ kg/m}^3$  wurde mit den Ablagerungshöhen die Gesamtmenge der Ablagerungen zu ca. 44 Mg errechnet. Das Volumen des Stauraumkanals wurde durch die Ablagerungen um etwa  $25,8 \text{ m}^3$  verringert. Das entsprach 1 % des Speichervolumens.



**Bild 4.2:** Ermittelte Körnungslinien der Ablagerungen im SKU Markstraße

Ebenfalls wurden wesentliche chemische Parameter des Ablagerungsmaterials an Stichproben bestimmt. Die Analyseergebnisse und ausgewählte Literaturdaten sind in Tabelle 4.3 zusammengefasst.

Bei den organischen Verbindungen liegt der gemittelte CSB mit  $60 \text{ g/kg}$  Trockensubstanz leicht unterhalb der von RISTENPART (1995b) und deutlich über den von CRABTREE et al. (1988) bestimmten Werten. Besonders hervorzuheben sind die Konzentrationen von organisch gebundenem Stickstoff ( $N_{org}$ ), der zu einem mittleren Wert von  $1577 \text{ mg/kg}$  Trockensubstanz bestimmt wurde. Mit dem Trockensubstanzgehalt der Ablagerungen von 75,5 % lässt sich aus den Werten der Nährstoffe ein erhebliches Gefährdungspotential für das aufnehmende Gewässer ableiten, falls diese in Folge einer Remobilisierung ins aufnehmende Gewässer gelangen.

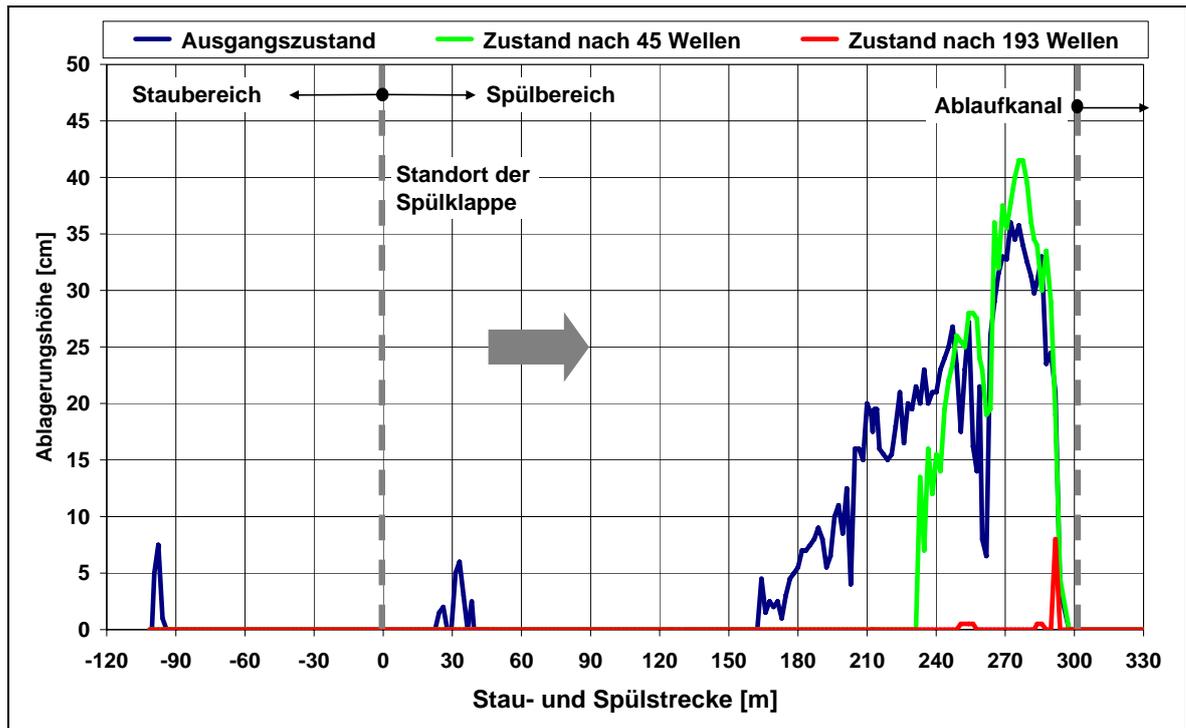
**Tabelle 4.3: Organische Verbindungen und Ammoniumkonzentration des Ablagerungsmaterials**

		min	max	Mittel	Autor / Untersuchung
Trockensubstanz (TS)	[g/kg]	450	650	540	SCHMITT & SEYFRIED (1992)
		355	815	691	RISTENPART (1995 b)
		<b>577</b>	<b>916</b>	<b>755</b>	<b>SKU Markstraße</b>
Glühverlust (GV)	[%]	3,0	30,0	10,0	CRABTREE et al. (1988)
		1,1	18,6	4,4	BROMBACH (1992)
		<b>3,0</b>	<b>14,0</b>	<b>6,0</b>	<b>SKU Markstraße</b>
CSB	[g/kg]	6	80	23	CRABTREE et al. (1988)
				69	RISTENPART (1995 b)
		<b>26</b>	<b>120</b>	<b>60</b>	<b>SKU Markstraße</b>
N org.	[mg/kg]	200	1500	800	CRABTREE et al. (1988)
		<b>603</b>	<b>3610</b>	<b>1577</b>	<b>SKU Markstraße</b>
NH <sub>4</sub> -N	[mg/kg]	10	300	100	CRABTREE et al. (1988)
		<b>63</b>	<b>261</b>	<b>144</b>	<b>SKU Markstraße</b>

#### 4.1.2.2 Reinigungsvermögen von Schwallwellen

In einem ersten Schritt sollte der Stauraumkanal grundgereinigt werden. Dafür waren entsprechend der Bestandsermittlung knapp 44 Mg Ablagerungsmaterial mit einer Höhe von bis zu 36 cm und einer Ausdehnung von insgesamt mehr als 150 m zu entfernen.

Der eingestellte Spülbetrieb setzte sich aus durchschnittlich 6 Wellen pro Tag zusammen, deren Spülwasserkörper Volumina zwischen 138 und 317 m<sup>3</sup> und Stauhöhen zwischen 1,0 m und 1,7 m besaßen. Mit 45 Wellen konnten 8,6 Mg, das entspricht rund 20 % des ursprünglichen Materials, beseitigt werden. Nach 193 Wellen mit einem Spülwasservolumen von insgesamt ca. 60.200 m<sup>3</sup> war der Stauraumkanal nahezu ablagerungsfrei. Bild 4.3 zeigt die Veränderung der Sedimenthöhen im Stauraumkanal. Die Messdaten verdeutlichen, dass das ehemals vorhandene Material sukzessive remobilisiert, umgelagert und aus dem Stauraumkanal entfernt wurde. Dabei konnten eine Verlagerung der Sedimente in Haltungen unterhalb des SKU und Sedimentationsvorgänge im Staubereich nicht registriert werden.



**Bild 4.3:** Gemessene Ablagerungshöhen für den Ausgangszustand, nach 45 und 193 Spülwellen

Während des gesamten Untersuchungszeitraumes wurden die Wasserstände der erzeugten Spülwellen an 6 Punkten (Sonden) entlang der Stau- und Spülstrecke gemessen (s. Bild 3.1). Die Messwerte wurden in einem 2- bis 4-Sekunden-Intervall aufgezeichnet. Es ergibt sich, dass der Kopf einer Spülwelle mit einem Spülwasservolumen von  $V_{\text{Spül}} = 290 \text{ m}^3$  und einer Stauhöhe von  $h_{\text{Stau}} = 1,60 \text{ m}$  eine Fließzeit von  $t_f = 84 \text{ s}$  benötigt, um von der Spülklappe bis zum Ablauf des Stauraumkanals zu gelangen. Dabei erreicht er eine durchschnittliche Geschwindigkeit von  $v_m = 3,6 \text{ m/s}$ . Bild 4.4 zeigt den Wasserstandsverlauf dieser Spülwelle an den 6 Sonden.

Der Sprung bei den Wasserständen an den Sonden 1 bis 3 gegenüber den Sonden 4 bis 6 ist auf den Einfluss der Ablagerungen im Kanalabschnitt von 180 bis 300 m unterhalb der Spülklappe, die wechselnden Sohlengefälle und Nennweiten zurückzuführen. Darüber hinaus verdeutlicht die Grafik, dass der im Staubereich gemessene Wasserstand (Sonde 1) wie erwartet kontinuierlich absinkt und der an Sonde 2 erfasste Verlauf, rund 40 m unterhalb der Klappe, nur einen (einzigsten) Wellenberg beschreibt. Dagegen werden an den Sonden 3 bis 6 mehrere Wellenberge angezeigt, die von Reflektionen der Schwallwelle resultieren und infolge der Querschnittsreduzierung am Stauraumkanalablauf (SK-Ablauf) herbeigeführt werden. Dabei erreicht der zurücklaufende Wellenkopf nach rund 260 bzw. 440 s zweimal die Sonde 3 (163 m) und wechselt jeweils noch unterstromseitig von Sonde 2 (254 m) die Fließrichtung. Beobachtungen ergaben, dass besonders bei großen Schwallwellen bereits remobilisiertes Material wieder in den Kanal zurück verfrachtet wird. Des Weiteren kam es zur Ansammlung von Ablagerungsmaterial

vor dem Drosselbauwerk und auf der Berme im Schacht 5 unmittelbar vor der Entlastungsschwelle. Bei letzterer besteht die Gefahr des Stoffaustrags ins Fließgewässer, der durch einen den Gegebenheiten angepassten Spülbetrieb verhindert werden kann. Zur Festlegung eines solchen Spülbetriebes wurden mathematisch-numerische Untersuchungen durchgeführt.

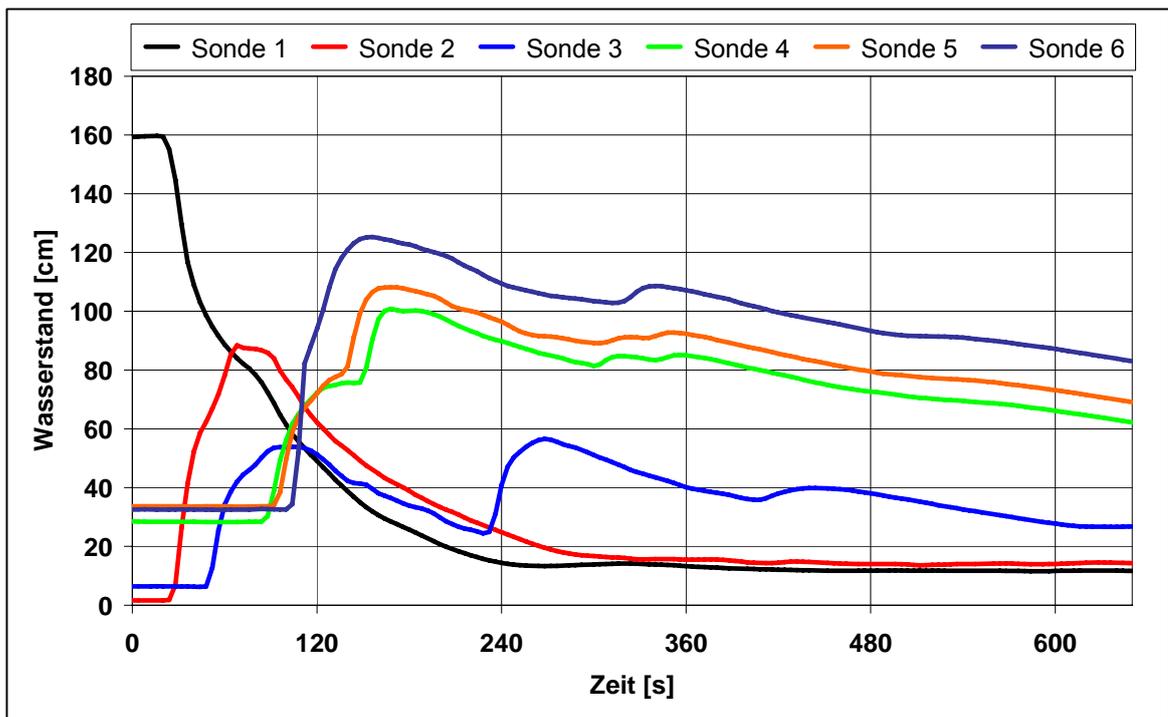


Bild 4.4: Gemessene Wasserstände einer Spülwelle ( $h_{\text{Stau}} = 1,60 \text{ m}$ ) an den 6 Sonden

### 4.1.3 Spülversuche zur Präventivreinigung

Eine Präventivreinigung soll die bei Trockenwetter oder Niederschlagsabflussereignissen (NAE) erwarteten Sedimente zeitnah entfernen bzw. eine Ablagerungsbildung verhindern. Dabei ist davon auszugehen, dass bei nach NAE, die zu Rückstau oder Einstau in Abwasserkanälen führen, größere Mengen an Ablagerungen bilden, als während eines Tages unter Trockenwetterbedingungen.

#### 4.1.3.1 Eigenschaften vorhandener Ablagerungen

Im Rahmen der Spülversuche zur Präventivreinigung wurde Ablagerungsmaterial untersucht, das sich während eines Niederschlagsabflussereignisses gebildet hatte. Das schlammartige Ablagerungsmaterial mit Höhen von bis zu 5 cm wies im Gegensatz zu den konsolidierten Ablagerungen einen erhöhten organischen Anteil (GV) von 63,8 % auf. Der CSB lag im Mittel bei 28,6 g/l, der überwiegend (97 %) durch den partikulären Anteil

gebildet wurde, und in der Größenordnung der Werte für Klärschlamm (WECHS, 1985) liegt. Die Schwermetallkonzentrationen des Schlammes bezogen auf die Trockensubstanz lagen unterhalb üblicher in dauerhaften Kanalablagerungen gemessener Werte und des Referenzwertes, der aus den Grenzwerten für die Aufbringung von Klärschlamm in der Landwirtschaft abgeleitet worden ist (s. Tabelle 4.4).

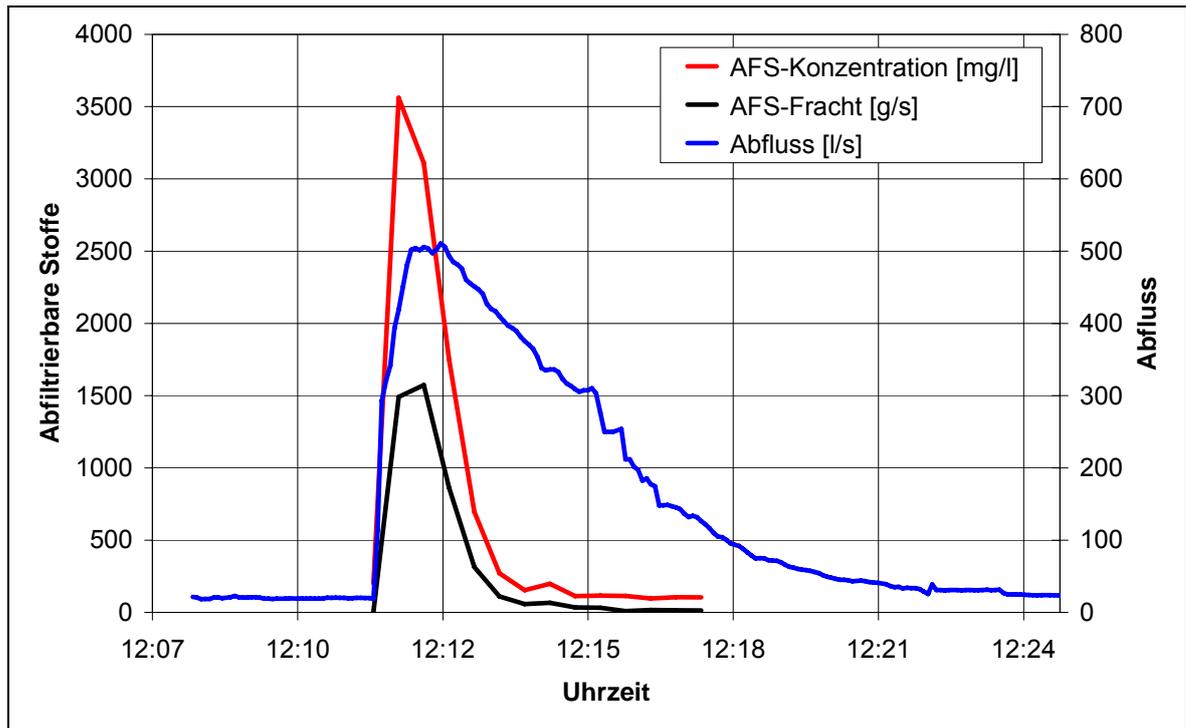
**Tabelle 4.4: Schwermetallkonzentrationen von Ablagerungsmaterial in Mischwasserkanalisationen**

		<b>GV</b>	<b>Kupfer</b>	<b>Blei</b>	<b>Zink</b>	<b>Nickel</b>	<b>Cadmium</b>
		%	[mg/kg]	[mg/kg]	[mg/kg]	[mg/kg]	[mg/kg]
MICHELBACH und WÖHRLE (1992)	S 1	2,2	30,4	16,8	260	15,0	0,28
	S 2	18,6	12,8	7,9	170	12,9	0,31
	S 3	8,7	33,4	18,4	550	14,7	0,33
BROMBACH et al. (1992)			26	14	327	14	0,3
RISTENPART (1995)			168	173	14	26	1,8
SKU Markstraße		63,8	< 0,1	3,5	28,5	3,2	0,1
Klärschlammverordnung		-	800	900	2000	200	5
S = Sedimentprobe							

Die große Differenz zwischen den Schwermetallkonzentrationen im frisch abgelagerten Schlamm und den in dauerhaften Ablagerungen von anderen Autoren gemessenen Werten weist auf eine allmähliche Anreicherung von Schwermetallen hin. Eine diesbezüglich abschließende Aussage kann wegen der geringen Anzahl an untersuchten Ereignissen nicht getroffen werden.

#### 4.1.3.2 Reinigungsvermögen von Schwallwellen

Wie bei der Untersuchung zum Stofftransport wurden die Konzentration von abfiltrierbaren Stoffen (AFS) sowie der Durchfluss hinter der Drossel am Ablaufkanal gemessen. Die maximale AFS-Konzentration wurde zu 35 mg/l bestimmt. Die Frachtganglinie und die Menge an resuspendiertem Material wurde ermittelt (s. Bild 4.5). Die remobilisierte Menge betrug 138 kg. Aus der Gegenüberstellung der Abfluss- und der Frachtganglinie lässt sich ableiten, dass nicht das gesamte Spülwasservolumen zur Entfernung von sedimentierten Partikeln aus dem Stauraumkanal erforderlich ist.



**Bild 4.5:** Gemessene Schmutzwelle an der Drossel bei der Präventivreinigung am Ende eines Niederschlagsabflussereignisses

Die nachfolgenden Spülwellen weisen deutlich reduzierte Konzentrationsspitzen und Frachten auf, die den Werten des Trockenwetterabflusses entsprechen. Daher kann nach einer zweiten Spülwelle von einem gereinigten Stauraumkanal ausgegangen werden.

Anhang B liefert eine Zusammenstellung der bei Ablagerungsfreiheit erfassten Schwallwellen.

#### 4.1.4 Beobachtung des Klappenbetriebs

Mit Hilfe kontinuierlichen Höhenstandsmessung an den Sonden 1 bis 6 konnte der Betrieb des Reinigungssystems mittels Datenübertragung unabhängig von Betriebszustandsdaten der Spüleinrichtung erfasst werden. Innerhalb des Zeitraumes vom 26. Juni 2004 bis zum 25. Juni 2005 wurden 941 Spülwellen mit einem Spülwasservolumen von insgesamt 204.000 m<sup>3</sup> generiert. Dies entspricht im Mittel einem Spülbetrieb mit 2,5 Schwallwellen pro Tag.

Der Klappenbetrieb verlief während des 15-monatigen Beobachtungszeitraumes weitgehend störungsfrei. Vereinzelt Betriebsprobleme wurden durch grobes Geschiebematerial, das zwischen Klappe und Dichtung liegen blieb, verursacht. Der Betriebsdruck im pneumatischen System konnte nur einmal nicht eingehalten werden. Dies war darauf zurückzuführen, dass sich durch starke Temperaturschwankungen Kondenswasser im Überdruckbehälter bildete. Durch das Ablassen des Kondenswassers konnte der Spülbe-

trieb fortgesetzt werden. Den Folgen des erhöhten Niederschlages von Kondenswasser kann durch kürzere Wartungsintervalle während der Sommermonate begegnet werden.

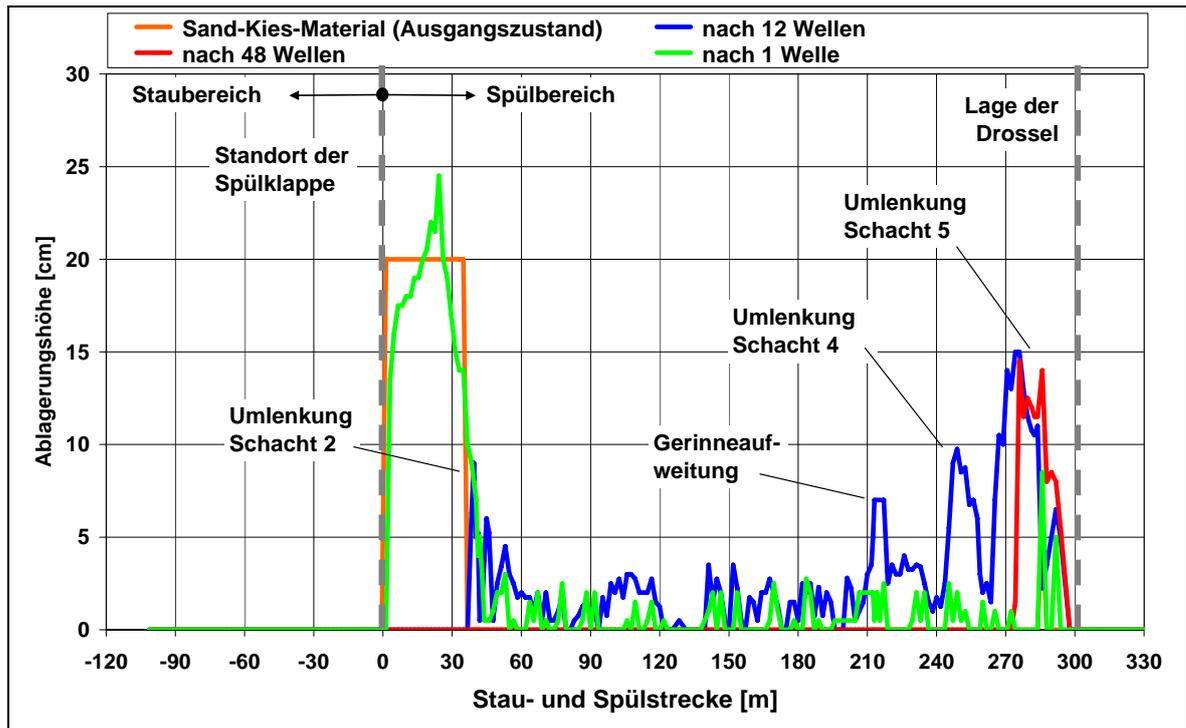
Die zunächst als kritisch angesehenen Bereiche der umlaufenden pneumatischen Dichtung und der Lagerung des Klappenelementes arbeiteten ohne Störungen.

#### 4.1.5 Schwefelwasserstoffmessungen in der Kanalatmosphäre

Die Schwefelwasserstoffmessungen in der Kanalatmosphäre zeigen keine nennenswerten durch die Schwallspülung ausgelösten Emissionen. Die während der Grundreinigung aufgezeichneten Werte liegen alle unterhalb der Bestimmungsgrenze der Messmethode von 0,6 ppm, obwohl für die Ablagerungen eine Sulfidschwefelkonzentration von bis zu 1942 mg/kg ermittelt wurde. Die geringen Schwefelwasserstoffemissionen sind wahrscheinlich auf den pH-Wert von im Mittel 7,7 zurückzuführen.

#### 4.1.6 Untersuchungen zum Stofftransport

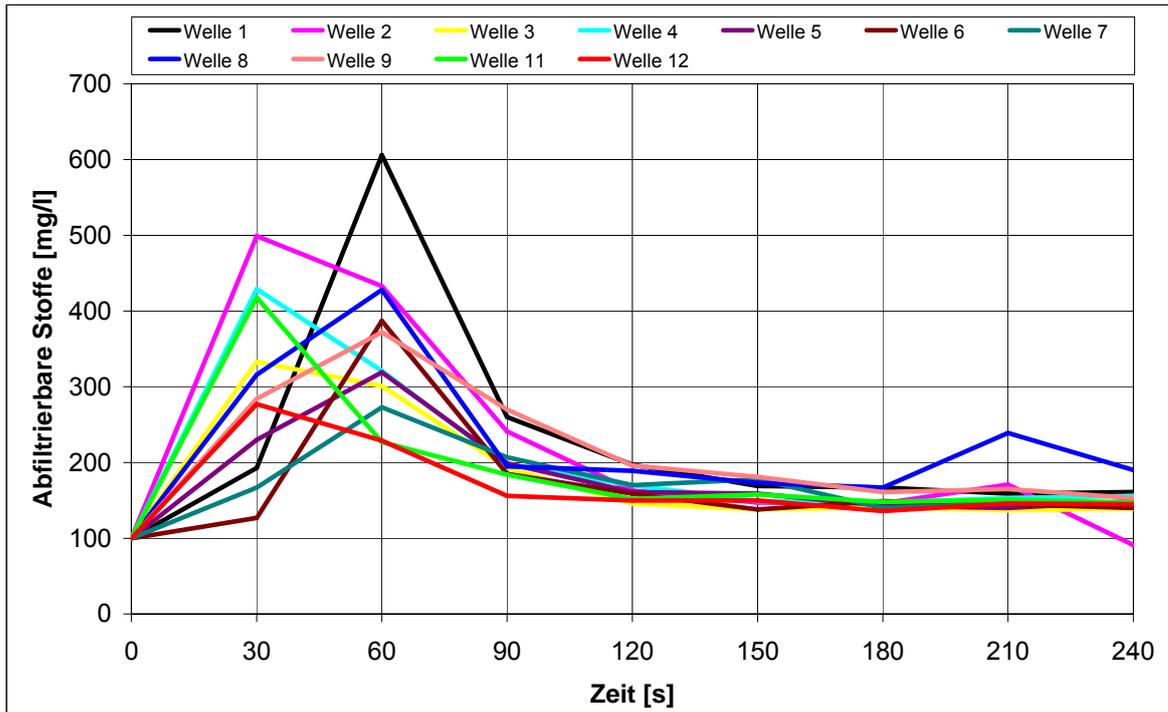
Die Untersuchungen zum Stofftransport mit begleitenden Messungen zur Ermittlung der Ablagerungshöhen bestätigen die Ergebnisse aus dem vorhergehenden Spülversuch zur Grundreinigung. Das sedimentierte Material wird sukzessive remobilisiert, umgelagert und aus dem Stauraumkanal transportiert. An Stellen, die durch erhöhte Energieverluste zur Ablagerungsbildung neigen, resedimentiert zeitweise zusätzliches Ablagerungsmaterial. Bild 4.6 zeigt den Verlauf der gemessenen Ablagerungshöhen. Aus dem Messdatenverlauf nach der ersten Welle wird deutlich, dass die Umlenkung und die Verjüngung im Querschnittsverlauf des Sohlbereiches am Schacht 5 zu einer Ablagerungsbildung führten, die einen Rückstau im oberhalb liegenden Kanalabschnitt erzeugten. Dadurch kommt der Geschiebetransport in diesem Bereich zum Erliegen, so dass die Ablagerungsbildung fortschreitet. Ebenfalls lassen sich die Auswirkungen der Kanalkurven an Schacht 4 und Schacht 5 sowie der Gerinneaufweitung von DN 3200 auf DN 3400 auf den Stofftransport erkennen. Die Materialansammlungen entstehen wahrscheinlich im Nachgang der Welle, dem so genannten Wellenschwanz, bei dem die erzeugten Sohl Schubspannungen langsam abfallen.



**Bild 4.6:** Gemessene Ablagerungshöhen für den Ausgangszustand, nach einer Welle, nach 12 und 48 Schwallwellen mit  $h_{\text{Stau}} = 1,0 \text{ m}$

Bei den Untersuchungen zur Grundreinigung, die mit Schwallwellen mit einer Stauhöhe von bis zu  $h_{\text{Stau}} = 1,7 \text{ m}$  unternommen wurde, konnten Rückstauereffekte infolge der <Überschreitung des Drosselabflusses beobachtet werden. Solche hydraulischen Nachteile trafen infolge der geringeren Stauhöhe einer Schwallwellen mit  $h_{\text{Stau}} = 1,0 \text{ m}$  nur in stark verringelter Form auf.

Zudem wurde die Spülwelle hinter der Drossel beprobt, um den Transport suspendierter Stoffe zu erfassen. Dazu wurden in Intervallen von 30 s Proben gezogen und hinsichtlich abfiltrierbarer Stoffe (AFS) analysiert. Die Analyse der ersten zwölf Wellen ist in Bild 4.7 dargestellt. Wegen der groben zeitlichen Auflösung sind nur grundsätzliche Aussagen möglich.



**Bild 4.7:** Gemessene Konzentrationen abfiltrierbarer Stoffe (AFS) von Schwallwellen bei der Remobilisierung des eingebrachten Sand-Kies-Gemisches am Stauraumkanalablauf

Alle Konzentrationsverläufe zeigen ein ausgeprägtes Maximum im Verlauf der ersten 60 Sekunden. Der maximale Wert und dessen Zeitpunkt kann wegen der Intervallgröße nur vermutet werden. Allerdings lässt sich ein klarer Trend erkennen. Das Konzentrationsmaximum nimmt mit zunehmender Anzahl von Spülwellen ab. Dies ist auf den fortschreitenden Reinigungseffekt zurückzuführen.

#### 4.1.7 Schlussfolgerungen

Die Ergebnisse der großtechnischen Untersuchungen zeigen, dass mit der Schwallspülung auch Stauraumkanäle wirksam gereinigt werden können. Sowohl eine Grundreinigung von umfänglichen mineralischen Ablagerungen als auch eine Präventivreinigung von organischen Schlämmen kann erreicht werden.

Dabei ist der einzustellende Spülbetrieb von den Eigenschaften der Ablagerungen abhängig. Es hat sich gezeigt, dass die Abflussdrosselung und die Ausgestaltung des Überganges von Speicherkammer zur Drosseleinrichtung für einen wirksamen Spülbetrieb berücksichtigt werden müssen.

Die Untersuchungen zum Stofftransport verdeutlichen den Einfluss des Trassenverlaufes auf die Sedimentations- und Erosionsprozesse. Die Umlenkungen und Gerinneaufweitungen haben einen größeren Einfluss auf die Ablagerungsbildung als unterschiedliche Sohlengefälle. Sofern Schwallwellen an die Leistungsfähigkeit des Stauraumkanalablauf-

fes (maximaler Freispiegelabfluss) angepasst werden, lässt sich eine ablagerungsbedingte Reduzierung des Drosselquerschnittes, die zu Rückstauwirkungen und Wellenreflektionen führen, verhindern.

Der 15-monatige Versuchsbetrieb der neuen Schwallspüleinrichtung verlief weitgehend störungsfrei. Lediglich an einem der beiden Lageschalter wurde vermutlich durch eingedrungenes Kondensat Korrosion festgestellt. Der andere Lageschalter funktionierte einwandfrei. Einem eventuellen Kondensateintritt kann durch einfache betriebliche Mittel, z.B. Ausblasen, begegnet werden. Konstruktiv kann eine zweite Kondensatabscheidungsstufe nach dem Druckbehälter erhöhte Betriebssicherheit bringen.

## 4.2 Mathematisch-numerische Untersuchungen

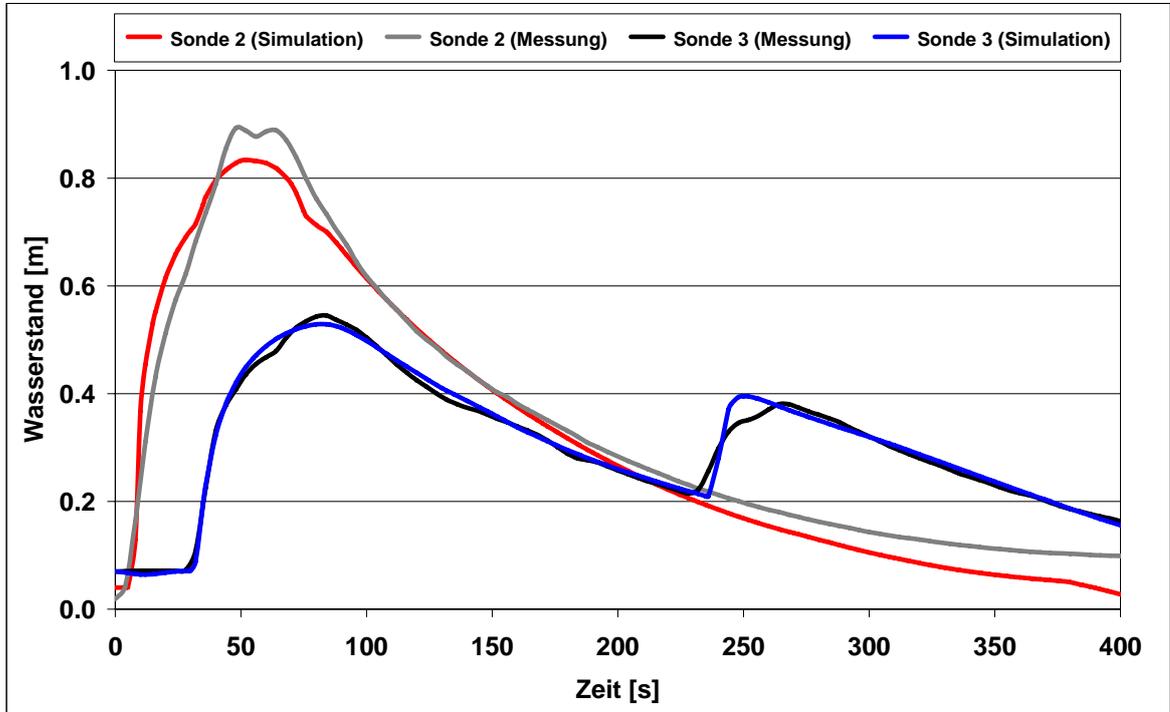
### 4.2.1 Strömungsmodell für den Zustand mit Ablagerungen

Zu Beginn der mathematisch-numerischen Untersuchungen wurde das Strömungsmodell einer messtechnisch erfassten Schwallwelle ( $V_{\text{Spül}} = 290 \text{ m}^3$ ,  $h_{\text{Stau}} = 1,60 \text{ m}$ ) durch Variation der Rauheiten kalibriert. Dabei nehmen die eingestellten Sohlrauheiten in den ablagerungsbehafteten Kanalabschnitten  $k$ -Werte von bis zu 1000 mm an. Diese Werte enthalten neben den Verlusten durch die Wand- und Ablagerungsoberflächen auch Energiedissipationen infolge der Profil- und Richtungsänderungen des Stauraumkanals. In Bild 4.8 ist das Kalibrierungsergebnis exemplarisch anhand einer Gegenüberstellung der gemessenen und berechneten Wasserstände an den Sonden 2 und 3 dargestellt.

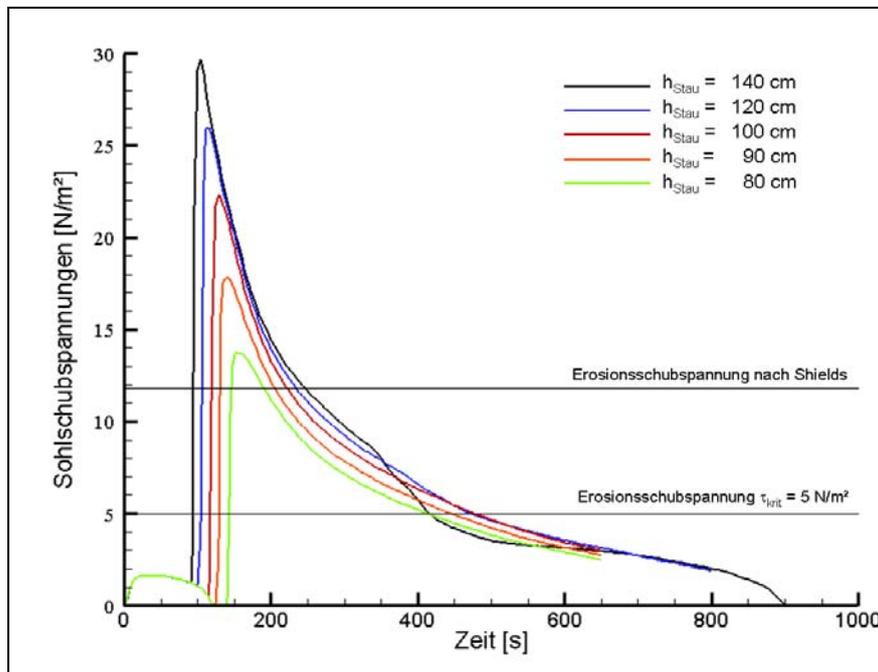
Zur Untersuchung des Reinigungsvermögens verschiedener Schwallwellen wurden mit Hilfe des kalibrierten Modells mittlere Sohlschubspannungen am Beginn des unteren ablagerungskritischen Kanalabschnittes, rund 180 m unterhalb der Spülklappe, bestimmt. Es wurden Schwallwellen mit Spülwasservolumina von  $92 \text{ m}^3$  bis  $239 \text{ m}^3$  und Stauhöhen von 80 cm bis 140 cm betrachtet. In Bild 4.9 sind die berechneten Sohlschubspannungen der verschiedenen Schwallwellen dargestellt. Es ist ersichtlich, dass sogar die Sohlschubspannungen der kleinsten Schwallwelle ( $V_{\text{Spül}} = 92 \text{ m}^3$ ,  $h_{\text{Stau}} = 80 \text{ cm}$ ) die kritische Erosionsschubspannung nach Shields von  $\tau_{e,\text{krit}} = 11,9 \text{ N/m}^2$  für mehr als 50 s überschreiten.

Dies bedeutet, dass vorhandenes Geschiebmaterial auch mit kleinen Wellen gelöst und stromabwärts transportiert werden kann. Wie erwartet, nehmen die Sohlschubspannungen mit größeren Stauhöhen und Spülwasservolumina zu. Der deutliche Abfall des Sohlschubspannungsverlaufes bei der größten Spülwelle ( $V_{\text{Spül}} = 239 \text{ m}^3$ ,  $h_{\text{Stau}} = 140 \text{ cm}$ ) nach einer Fließzeit von rund 350 s ist Folge der schon genannten Wellenreflektion.

Die erhöhten Sohlschubspannungen vor Eintreffen des Wellenkopfes sind auf die mathematisch-numerische Abbildung des seitlichen Zulaufes in der Anfangsbedingung zurückzuführen.



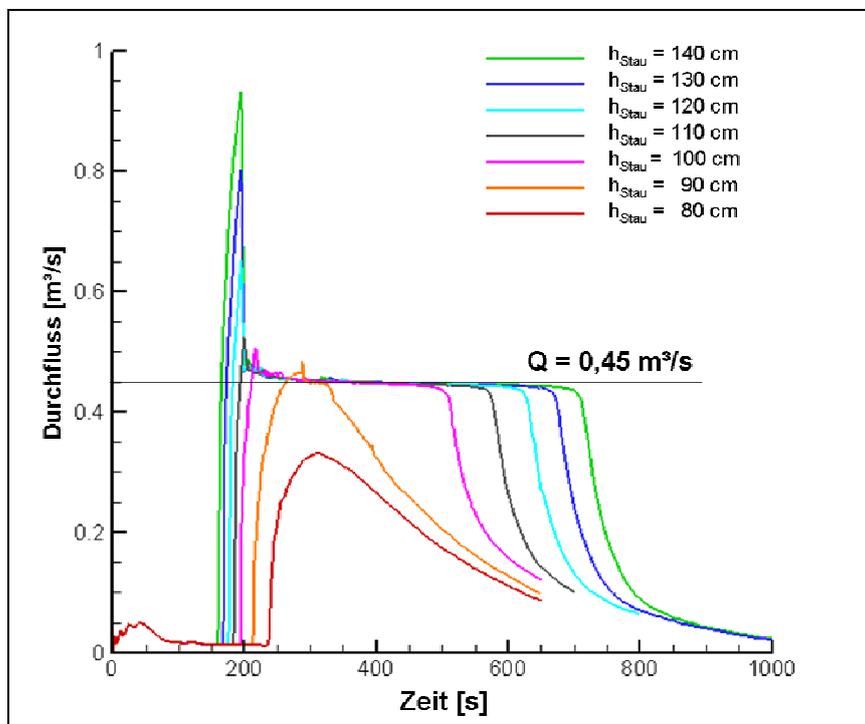
**Bild 4.8:** Berechnete und gemessene Wasserstände an den Sonden 2 und 3 mit einer Stauhöhe von  $h_{\text{Stau}} = 1,6 \text{ m}$



**Bild 4.9:** Berechnete Sohlschubspannungen von Spülwellen verschiedener Stauhöhen 180 m unterhalb der Spülklappe

Daher wurden, wie in Bild 4.10 dargestellt, die Durchflüsse der verschiedenen Schwallwellen für den Stauraumkanalablauf betrachtet. Es ist ersichtlich, dass die Größe des Durchflusses und die der Ausbreitungsgeschwindigkeit von der Stauhöhe einer Schwallwelle abhängig sind. Bei Stauhöhen bis 90 cm liegen weitgehend rückstaufreie Strömungsverhältnisse am Ablauf des Stauraumkanals vor. Die Abflussspitze der Schwallwelle beträgt  $Q_{\max} = 450 \text{ l/s}$ . Bei größeren Stauhöhen (>100 cm) liegt ein deutlich größeres Abflussmaximum vor, das zu Rückstau, Wellenreflektion und demzufolge zur plötzlichen Durchfluss- und Sohlschubspannungsreduktion führt.

Um die mit diesen Vorgängen verbundenen erneuten Sedimentationsprozesse zu verhindern und den Stofftransport bei den Spülvorgängen gezielt zu steuern, erscheint es sinnvoll, den Spülbetrieb entsprechend einzustellen.



**Bild 4.10: Berechnete Durchflüsse am Ablauf des untersuchten Stauraumkanals**

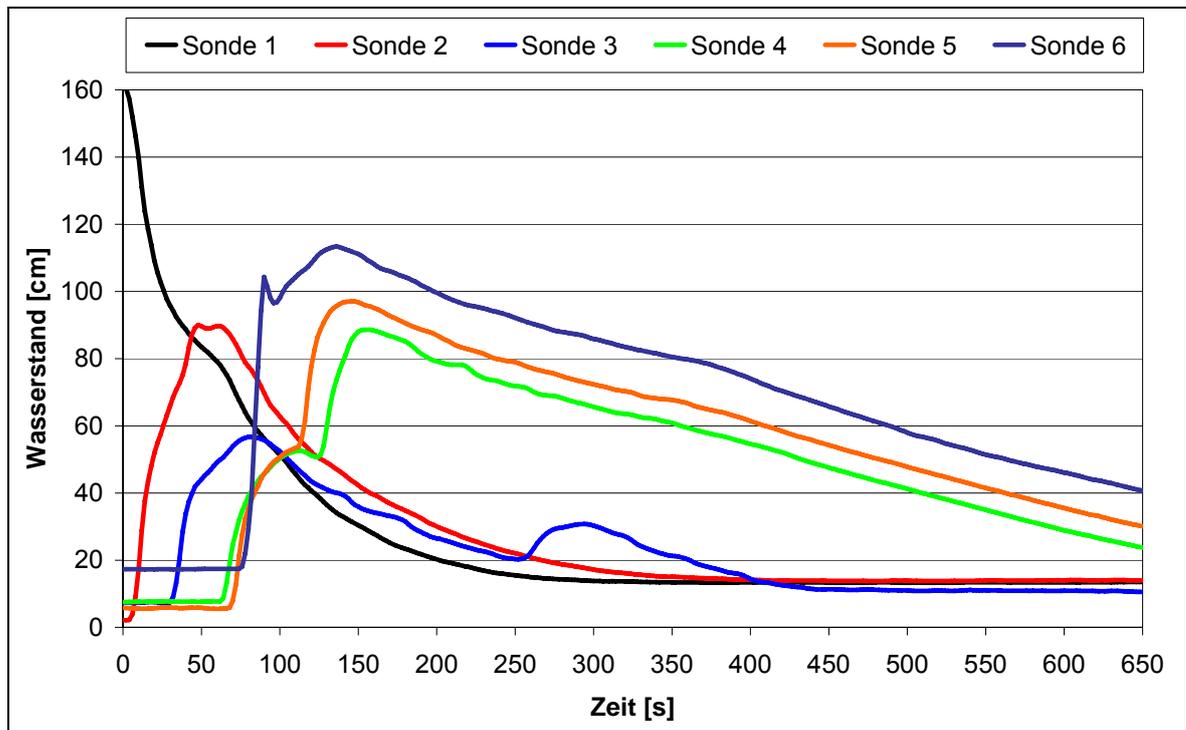
#### 4.2.2 Strömungsmodell für den Zustand ohne Ablagerungen

Zur Untersuchung der Verhältnisse für eine Präventivreinigung des Stauraumkanals wurde ein Strömungsmodell für den Zustand ohne Ablagerungen entwickelt.

Zur Kalibrierung des mathematisch-numerischen Modells wurden nach der Grundreinigung des Stauraumkanals aufgezeichnete Wasserstandsmessungen sowie Messdaten zum Drosselabfluss aufgenommen.

Die Höhenstandsmessungen an den sechs Sonden zeigen prinzipiell den gleichen Verlauf wie im Zustand mit Ablagerungen. Bild 4.11 zeigt die Wasserstandsganglinien der sechs

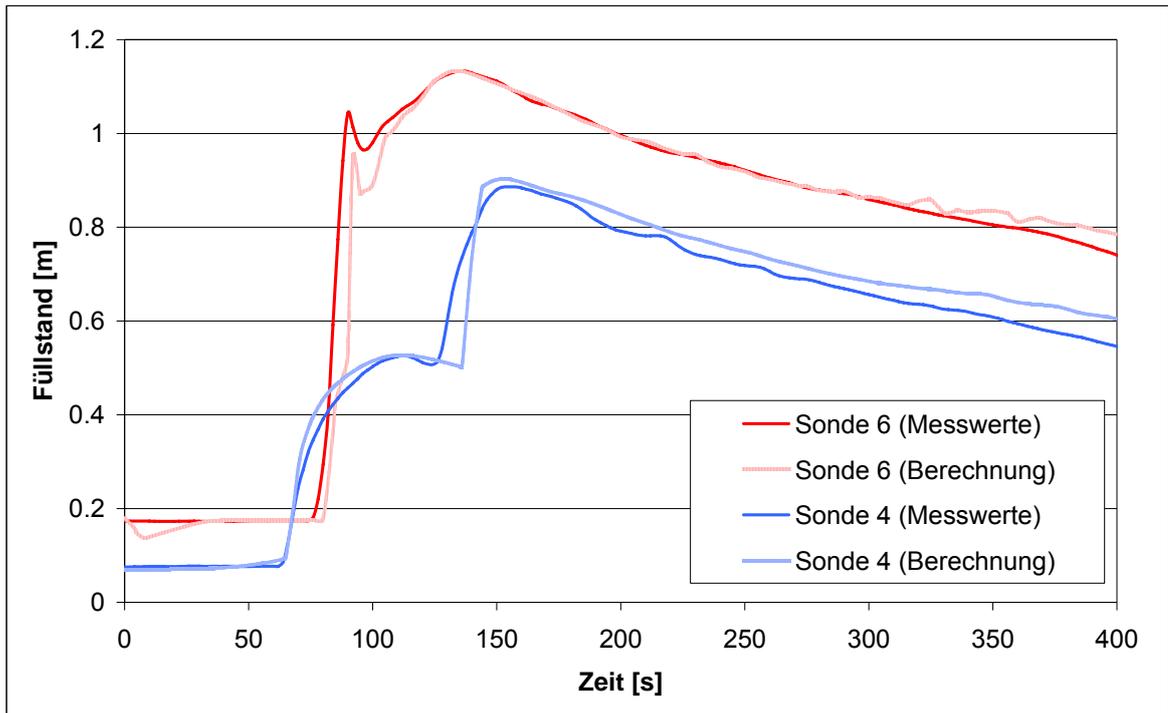
Sonden von einer Spülwelle mit  $h_{\text{Stau}} = 1,6$  m. Es ist zu erkennen, dass sich weiterhin Rückstauprozesse einstellen, die allerdings zu einer kleineren rücklaufenden Welle führen, die wiederum Sonde 3 erreicht. Der obere Reflektionspunkt liegt zwischen Sonde 2 und Sonde 3. Die kleinere zurücklaufende Welle ist auf die Steigerung des Drosselvolumenstromes zurückzuführen, da nach der Beseitigung der Ablagerungen der volle Querschnitt der Drossel zu Verfügung steht.



**Bild 4.11: Gemessene Wasserstände einer Schwallwelle mit einer Stauhöhe des Spülwasservolumens von  $h_{\text{Stau}} = 1,60$  m bei ablagerungsfreiem Zustand**

Aus der Kalibrierung des Modells mittels Variation der betrieblichen Rauheiten resultieren Werte zwischen 0,1 und 10 mm. Die höchsten Werte werden für den Kanalabschnitt ermittelt, in dem die Spülklappe positioniert ist. Erhöhte betriebliche Rauheit sind auf Strömungsumlenkungen zurückzuführen. Dort liegen die  $k_B$ -Werte zwischen 7 und 8 mm. Dies spiegelt deren Relevanz bezüglich der Strömungsverluste im Hinblick auf die Ablagerungsbildung wider. In Abschnitten, in denen der Stauraumkanal einen geraden Trassenverlauf aufweist, stellten sich Rauheiten von 0,1 mm ein.

Ein Vergleich berechneter und gemessener einer Spülwelle mit  $h_{\text{Stau}} = 1,6$  m zeigt eine sehr gute Übereinstimmung. In Bild 4.12 ist die Güte der Modelkalibrierung beispielhaft für die an den Sonden 4 und 6 ermittelten Wasserständen dargestellt. An beiden Ganglinien ist der Rückstau und die zurück laufende Welle zu erkennen.



**Bild 4.12:** Berechnete und gemessene Wasserstände an den Sonden 4 und 6 für den Zustand ohne Ablagerungen

### 4.3 Optimierung des Spülbetriebes

Der Betrieb von Schwallspüleinrichtungen in Stauraumkanälen (SK) ist dann optimal eingestellt, wenn die erzeugten Spülwellen einerseits über ausreichend hohe Sohlschubspannungen für den Remobilisierungs- und Transportprozess abgesetzter Abwasserinhaltsstoffe verfügen und andererseits Wellenreflexionen und Rückstauerscheinungen am SK-Ablauf weitgehend unterbleiben. Daher müssen die Sohlschubspannungen der Schwallwellen die jeweils erforderlichen kritischen Erosionsschubspannungen auf der gesamten Spüllänge überschreiten. Gleichzeitig muss eine ungehinderte Passage der Spülwellen an der Drosseleinrichtung gegeben sein.

Bei der Entwicklung eines Spülprogrammes erscheint eine Unterscheidung in Grund- und Präventivreinigung sinnvoll. Die Grundreinigung kann als eine selten angewendete Sonderreinigung verstanden werden, für die in vielen Fällen hohe Sohlschubspannung und eine große Anzahl von Spülwellen aufgebracht werden muss. Dagegen ist die Präventivreinigung für einen langfristigen Dauerbetrieb zu konzipieren und soll eine unmittelbare Entfernung von Ablagerungen bei Trockenwetter und nach Niederschlagsabflussereignissen gewährleisten. Somit sind entsprechend kleinere Sohlschubspannung und eine geringere Anzahl von Spülwellen als bei der Grundreinigung erforderlich. In Abhängigkeit der

lokalen Verhältnisse sollten die Spülvorgänge kontinuierlich oder quasi-kontinuierlich initiiert werden.

Für den betrachteten Stauraumkanal wurde auf Basis der durchgeführten Untersuchungen der nachfolgend näher erläuterte Spülbetrieb empfohlen.

### 4.3.1 Grundreinigung

Die Grundreinigung des SKU Markstraße orientiert sich an einer kritischen Schubspannung für den Erosionsbeginn nach Shields von  $\tau_{e,krit} = 11,9 \text{ N/m}^2$ , die auf der Auswertung des beprobten Ablagerungsmaterials basiert. Aus zeitlichen Gründen wird ein kontinuierlicher Spülbetrieb mit einer maximalen Anzahl von Schwallwellen pro Tag empfohlen. Der Spülwasserkörper der zu erzeugenden Schwallwelle sollten eine Stauhöhe von  $h_{Stau} = 100 \text{ cm}$  und ein damit verbundenes Spülwasservolumen von  $V_{Spül} = 138 \text{ m}^3$  besitzen, so dass Rückstaueffekte und Wellenreflexionen auf ein akzeptierbares Maß reduziert werden kann. Je nach Art und Umfang des Ablagerungsaufkommens kann für den sukzessiven Reinigungsvorgang eine Vielzahl von Spülwellen nötig werden.

### 4.3.2 Präventivreinigung

Für den präventiven Spülbetrieb wird in Anlehnung an RISTENPART (2002) eine kritische Erosionsschubspannung von  $\tau_{e,krit} = 5,0 \text{ N/m}^2$  festgelegt. RISTENPART hat bei Messungen in einem Mischwasserkanal eine Spannweite für den Erosionsbeginn von 2,2 bis 5,6  $\text{N/m}^2$  ermittelt. Um den betrachteten Stauraumkanal dauerhaft ablagerungsfrei zu halten, erscheinen für die Trockenwetterphase 1 - 2 Spülwellen pro Tag ausreichend. Sie sollten ebenso auf eine Stauhöhe von  $h_{Stau} = 100 \text{ cm}$  ausgelegt sein. Dies entspricht einem jährlichen Spülwasservolumen zur Entfernung von Ablagerungen, die während Trockenwetterzeiten entstehen, von  $100.700 \text{ m}^3$ .

Für die SK-Reinigung nach Niederschlagsabflussereignissen (NAE) wird eine so genannte Spülwellengruppe vorgeschlagen. Sie besteht aus einer Folge von zwei kleinen, zwei großen und einer kleinen Spülwelle. Die kleinen Spülwellen sollten Stauhöhen zwischen 80 und 100 cm und die großen Spülwellen sollten Stauhöhen zwischen 150 und 170 cm besitzen. Hiermit soll erreicht werden, dass zunächst die feinen partikulären Sedimente, an denen das größte Schad- und Schmutzstoffpotenzial angelagert ist, aus dem Stauraumkanal entfernt werden. Anschließend sollen die beiden großen Spülwellen das gegebenenfalls noch vorhandene Geschiebematerial remobilisieren. Die letzte kleine Spülwelle dient der Beseitigung von eventuell zurück verfrachtetem Material der beiden Vorgängerwellen. Mit den Annahmen, dass eine Spülwellengruppe mit den Stauhöhen  $h_{Stau} = 90 \text{ cm}$  und  $h_{Stau} = 1,60 \text{ m}$  durchschnittlich wöchentlich initialisiert wird, ergibt sich ein jährliches Spülwasservolumen für die Erzeugung der Spülwellengruppen von  $46.900 \text{ m}^3$ . Unter mitt-

leren Trockenwetterabflussverhältnissen benötigt eine Spülwellengruppe eine totale Stauzeit von 5,1 Stunden.

Bei Umsetzung eines solchen Spülbetriebes kann auf die Anordnung von Spülsümpfen oder Auffangräumen am Stauraumkanalablauf verzichtet werden. Somit entfällt der Bedarf für weitere Reinigungsmaßnahmen, für zusätzliche Reinigungseinrichtungen oder baulichen Änderungsmaßnahmen.

## 5 Wirtschaftlichkeitsbetrachtung

Im Rahmen einer Wirtschaftlichkeitsbetrachtung wurden Jahreskosten für die Reinigung des SKU Markstraße ermittelt. Dabei wurden neben den monetären Aufwendungen für den Einsatz der untersuchten Schwallspülklappe auch die Kosten für eine Reinigung mit Hilfe des Hochdruckspülverfahrens betrachtet. Außerdem erfolgte eine Bestimmung von Investitionskosten verschiedener derzeit in Stauraumkanälen betriebener Schwallspüleinrichtungen.

### 5.1 Schwallspülung kontra Hochdruckreinigung

Um eine Vergleichbarkeit von Schwallspülung und Hochdruckreinigung (HD-Reinigung) herzustellen, wurden die unterschiedlichen Reinigungsqualitäten der Verfahren mit in die Betrachtung einbezogen. Unter der Reinigungsqualität eines Verfahrens wird hier die Dauer der durch Reinigungsmaßnahmen geschaffenen Ablagerungsfreiheit verstanden (DETTMAR, 2005).

Bei der Schwallspülung kann von einem nahezu dauerhaft ablagerungsfreien Stauraumkanal ausgegangen werden. Zur Ermittlung der Ablagerungsfreiheit für die HD-Reinigung wurden die Zeiträume zwischen bedeutenden Niederschlagsabflussereignissen (NAE) und die Dauer von langen Trockenwetterphasen ( $\geq 2$  Woche) betrachtet. Es wurde angenommen, dass nur am Ende bedeutender NAE und nach langen Trockenwetterzeiten von über zwei Wochen eine HD-Reinigung erforderlich ist. Bedeutende NAE lagen bei einem mehr als 12-stündigen Einstau bzw. Teileinstau des Stauraumkanals vor. Durch eine Auswertung der kontinuierlichen Wasserstandsaufzeichnungen von Mai 2004 bis April 2005 wurde unter Einhaltung der genannten Randbedingungen die erforderlichen HD-Reinigungseinsätze für den Betrachtungszeitraum bestimmt. Die Anzahl bedeutender Niederschlagsabflussereignisse lag bei 14 und die langer Trockenwetterphasen bei 2. Somit wären für eine der Schwallspülung vergleichbare Reinigungsqualität mindestens 16 HD-Reinigungseinsätze im Bezugsjahr erforderlich gewesen.

Bei der Ermittlung der Jahreskosten für die Schwallspülung wurden die real aufgewendeten Investitionskosten, die zu erwartenden Betriebskosten sowie eine 15-jährige Nutzungsdauer der Schwallspülklappe zu Grunde gelegt. Die Betriebskosten umfassen den Energiebedarf für den Antrieb der Klappe, den Betrieb des Schaltschranks sowie Maßnahmen der Instandhaltung. Diese Kosten wurden auf Basis der im Untersuchungszeitraum gewonnenen Erkenntnisse abgeschätzt. Die anzusetzenden Kosten für die Beschaffung von Ersatzteilen unterliegen der Lebensdauern der Einzelkomponenten, die während der 15-monatigen Beobachtungsphasen nicht im Einzelnen festgestellt werden konnten. Die angenommene Nutzungsdauer entspricht dem unteren Wert, der für vergleichbare maschinelle Anlagen auf Kläranlagen angesetzt wird. Im Einzelfall kann diese beispiels-

weise in Abhängigkeit der Abwassereigenschaften auch unterschritten werden. In Tabelle 5.1 ist die Ermittlung der Jahreskosten für die eingesetzte Schwallspülklappe näher erläutert.

**Tabelle 5.1: Ermittlung der Jahreskosten für den Einsatz der untersuchten Schwallspülklappe im SKU Markstraße**

<b>Spüleinrichtung</b>	<b>Investitionskosten</b>	<b>KFAKR <sup>1)</sup></b>	<b>Jahreskosten</b>
Spülklappe (inkl. MSR-Technik)	110.000 €	0,08994	9.893 €/a
<b>Jährliche Investitionskosten</b>			<b>9.893 €/a</b>
<b>Betrieb und Instandhaltung</b>			<b>Jahreskosten</b>
Betriebsstrom			100 €/a
Inspektion, Wartung, Instandsetzung (inkl. Ersatzteile)			1.500 €/a
<b>Jährliche Betriebskosten</b>			<b>1.600 €/a</b>
<b>Jährliche Gesamtkosten</b>			<b>11.493 €/a</b>
<sup>1)</sup> KFAKR = Kapitalwiedergewinnungsfaktor nach LAWA (2005), Nutzungsdauer der Anlagentechnik = 15 Jahre; Zinssatz = 4 %			

In Anlehnung an das DWA-Arbeitsblatt M 174 (2005) wurden für die HD-Reinigung des SKU Markstraße (DN 2600 - DN 3400) Kosten für einen zu reinigenden Kanalmeter in Höhe von 2,50 Euro angenommen. Dies entspricht aufgrund der großen Querschnitte einer sehr günstigen Annahme. Bei einer Länge von 400 m ergeben sich für einen Reinigungseinsatz Aufwendungen in Höhe von 1.000 Euro. Die Jahreskosten ermitteln sich bei 16 Einsätzen zu 16.000 Euro. Die Kosten für erforderliche Inspektionen zur Erfassung des Betriebszustandes bleiben unberücksichtigt. Ein Vergleich der Jahreskosten macht deutlich, dass die Schwallspülung im hier betrachteten Fall um rund 4.500 Euro pro Jahr günstiger ist als die HD-Reinigung. Dies entspricht einer Kostenminderung für die Reinigung von knapp 30 %.

## 5.2 Investitionskosten von Schwallspüleinrichtungen in Stauraumkanälen

Eine Betrachtung der Investitionskosten von Schwallspüleinrichtungen (SSE) in Stauraumkanälen soll verdeutlichen, wie die monetären Aufwendungen für diese Einrichtungen zu den Gesamtinvestitionskosten der Mischwasserspeicher liegen und wie groß die spezifischen Kosten sind. In Tabelle 5.2 sind die Investitionskosten für vier verschiedene in Stauraumkanälen betriebene Schwallspüleinrichtungen in Nordrhein-Westfalen zusammengestellt.

**Tabelle 5.2: Investitionskosten von Schwallspüleinrichtungen in Stauraumkanälen**

	SSE	SK- Länge	SK- Volumen	SK- Kosten <sup>1)</sup>	SSE- Kosten	K2/K1	K2/V	K2/L
		L [m]	V [m <sup>3</sup> ]	K1 [€]	K2 [€]	[%]	[€/m <sup>3</sup> ]	[€/m]
SKU Markstraße	SSK	400	2.500	3.112.083	110.000	3,4	44,0	275
SKM Luisental	SW	200	3.440	2.723.000	338.200	12,4	98,3	1.691
SKU Freibad	KKA	108	1.050	3.729.285	56.200	4,0	72,9	520
SKO Dahle	KKA	49	420	1.303.390	149.800	4,3	68,4	3.057

SSE = Schwallspüleinrichtung; SK = Stauraumkanal; SSK = Schwallspülklappe; SW = Spülwehr; KKA = Kammer-Klappen-Anlage; SKU = SK mit unter liegender Entlastung; SKM = SK mit mittiger Entlastung; SKO = SK mit oben liegender Entlastung  
1) ohne Kosten für Grunderwerb und Planungshonorare

Bei den in Tabelle 5.2 aufgeführten Schwallspüleinrichtungen schwanken die Investitionskosten zwischen 56.200 € und 338.200 €. Es ist erkennbar, dass die in dem SKU Markstraße eingesetzte Klappe mit 3,4 % an den Gesamtbaukosten die günstigste Reinigungseinrichtung ist. Gleiches gilt für eine Betrachtung der spezifischen Kosten bezogen auf das Speichervolumen und die Spüllänge. Bei einer Betrachtung der relativen Kosten schneiden die beiden Kammer-Klappenanlagen am schlechtesten ab. Im Stauraumkanal mit mittig liegender Entlastung (SKM) Luisental dient das Spülwehr (Kaskadenwehr) vornehmlich der Aktivierung von 600 m<sup>3</sup> zusätzlichem Speichervolumen für die Mischwasserbehandlung. Die Reinigung des Stauraumkanals durch die regelmäßige Erzeugung von Schwallwellen ist lediglich ein positiver Sekundäreffekt. Bei einem spezifischen Kostenansatz von 1.000 €/m<sup>3</sup> ergibt sich durch den Betrieb des Wehres eine Kostenersparnis von 600.000 Euro im Vergleich zu den Kosten für den Bau vergleichbarer Speicherbauwerke zur konventionellen Mischwasserbehandlung in Form eines zu erstellenden Regenbeckens. Ohne Berücksichtigung der Aufwendungen für die Instandhaltung ergibt sich ein Gesamtkostenvorteil von rund 260.000 Euro. Weitergehende Informationen zum SKM Luisental sind den Ausführungen von PINNEKAMP et al. (2004) zu entnehmen.

## 6 Einsatz von Schwallspüleinrichtungen in bestehenden Stauraum- und Regenrückhaltekanälen

Beim Einsatz von Schwallspüleinrichtungen (SSE) in bestehenden Stauraum- und Regenrückhaltekanälen sind die Anordnung dieser Bauwerke im Haupt- oder Nebenschluss sowie die Lage ihrer Entlastungsstellen zu beachten.

Stauraumkanäle (SK) im Nebenschluss sind wie kompakte Regenbecken zu betrachten, da sich der Selbstreinigungseffekt auf den Entleerungsvorgang beschränkt. Dementsprechend ist nach dem ATV-Arbeitsblatt A 128 (ATV, 1992) eine Spülmöglichkeit vorzusehen. Durch den Einsatz einer automatischen SSE ist eine wirksame Spülmöglichkeit gegeben. Dabei sollte der Spülbetrieb auf die Ausgestaltung und Leistungsfähigkeit der Drossel angepasst werden. So können unerwartete Rückstaueffekte und Wellenreflektionen vermieden werden sowie eine möglichst zügige Reinigung erreicht werden. Rückstau und Wellenreflektionen können zu einer Verstopfung der Ablaufleitung sowie zu einer Rückverfrachtung bereits remobilisierten Materials führen.

Bei der Planung von Reinigungsmaßnahmen ist zu beachten, dass bei SK im Nebenschluss üblicherweise nur am Ende von Niederschlagsabflussereignissen (NAE) Mischwasser für die Spülung zur Verfügung steht. Für die Aktivierung von Schwallwellen in Trockenwetterzeiten muss eine unabhängige Befüllungsmöglichkeit, wie beispielsweise durch eine Pumpenverbindung zum Trockenwetterabfluss im Hauptkanal, geschaffen werden.

Stauraumkanäle im Hauptschluss mit oben liegender Entlastung (SKO) wirken im Entwässerungssystem wie Fangbecken. Diese sind bei Bedarf mit einer Spüleinrichtung auszustatten. Der Bedarf lässt sich aus dem Befund von dauerhaften Ablagerungen ableiten. Es ist zu ermitteln, welcher Volumenverlust durch die Ablagerungen im SKO auftritt. Da SKO nicht mit einem Zusatzvolumen bei der Bemessung beaufschlagt werden, können sich Volumenverluste direkt auf die Entlastungstätigkeit und damit auf die ausgetragene Schmutzfracht auswirken. Dies trifft insbesondere für SKO mit vergleichsweise kleinen Querschnitten zu. Außerdem sind die Auswirkungen von Schmutzfrachtstößen auf Kläranlagen, die auf eine Remobilisierung abgesetzter Abwasserinhaltsstoffen im SKO zu Beginn eines NAE, zu berücksichtigen. Dies gilt insbesondere für kleine Einzugsgebiete.

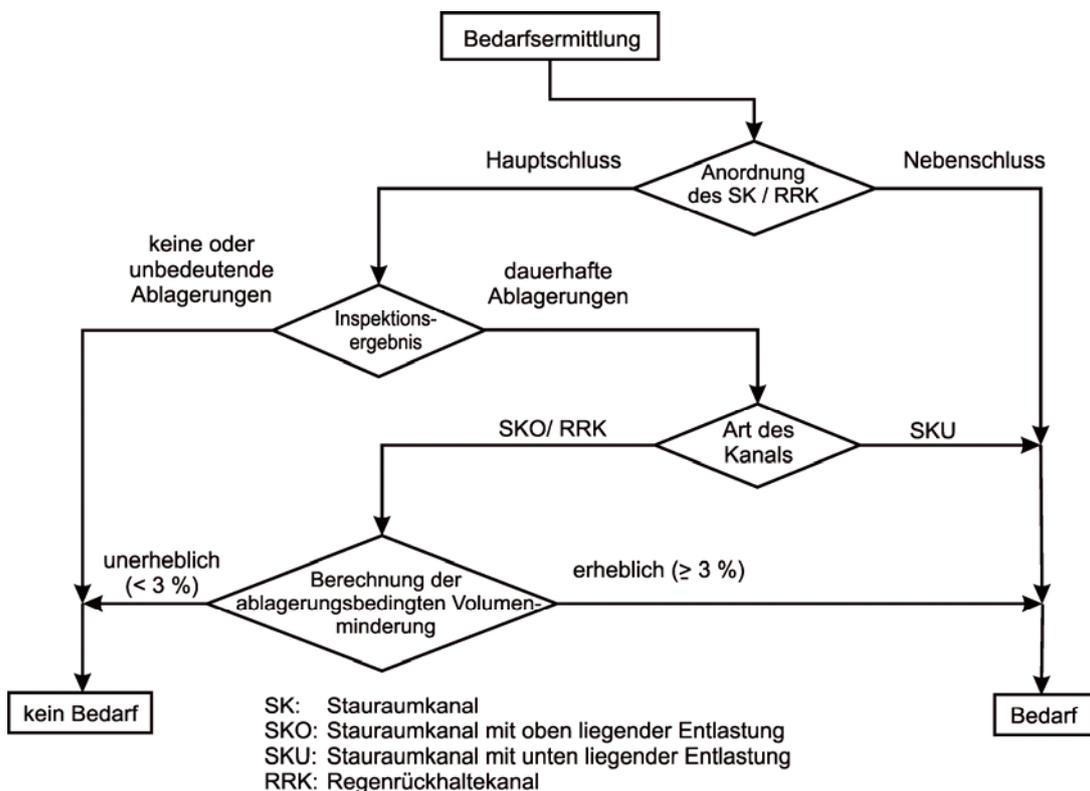
Die Gefahr des Austrags sedimentierter Abwasserinhaltsstoffe ist bei Stauraumkanälen mit unten liegender Entlastung (SKU) am größten, woraus sich neben der vermeintlich schlechteren Sedimentationswirkung der Volumenzuschlag bei der Bemessung dieser Anlagen begründet. Eine allgemeine Notwendigkeit für Spüleinrichtungen lässt sich daraus hingegen nicht ableiten, sofern bei der Planung von Anlagen der hydraulische Nachweis geführt werden kann, dass während der Trockenwetterzeiten durch ausreichende Sohlschubspannungen ein Ablagerungsfreier Betrieb gewährleistet ist. Es wird ein bedarfsgerechter Einsatz von Schwallspüleinrichtungen empfohlen.

Der Bedarf von Schwallspüleinrichtungen in bestehenden SKU kann in Anlehnung an die SÜwV Kan (MURL, 1995) durch eine Überprüfung der Wirksamkeit des Selbstreinigungseffektes ermittelt werden. Dazu ist der SKU nach einer Trockenwetterperiode von mindestens drei Tagen zu untersuchen. Sofern die Inspektionsergebnisse Ablagerungen aufweisen, sollte unter Berücksichtigung der Ergebnisse früherer Untersuchungen die Installation einer Schwallspüleinrichtung vorgenommen werden. Liegen keine Zustandsdaten vor, ist nach einem Jahr die Ablagerungssituation erneut zu erfassen.

Beim Einstau von Regenrückhaltekanälen (RRK) bei NAE kann es ebenfalls zur Bildung von Ablagerungen mit hohen mineralischen Anteilen kommen. Zudem tritt bei RRK in Trennsystemen aufgrund von Rückstau aus Fließgewässern eine Reduzierung des Selbstreinigungseffektes auf.

Hinsichtlich des Einsatzes von Schwallspüleinrichtungen in RRK gelten die gleichen Kriterien wie bei SKO. Mit Schwallspüleinrichtungen in RRK besteht die Möglichkeit, die Auswirkungen der Speichervolumenverminderung durch Ablagerungen sowie erhöhte Schmutzfrachtstöße auf Fließgewässer zu reduzieren.

Eine Vorgehensweise zur Ermittlung des Bedarfs von automatischen Schwallspüleinrichtungen in Stauraum- und Regenrückhaltekanälen ist in Bild 6.1 dargestellt.



**Bild 6.1:** Vorgehensweise zur Ermittlung des Bedarfs von Schwallspüleinrichtungen in bestehenden Stauraum- und Regenrückhaltekanälen

## 7 Zusammenfassung und Ausblick

Der Betriebsoptimierung von Stauraumkanälen kommt auf Grund gestiegener Anforderungen an den Gewässerschutz und wegen höherer Selbstüberwachungspflichten der Betreiber zunehmend mehr Bedeutung zu. Die bei Trockenwetter und/oder Niederschlagsabflussereignissen (NAE) in Stauraumkanälen entstehenden Ablagerungen sind vorzugsweise zeitnah zu entfernen, da sie mit unerwünschten Folgeerscheinungen verbunden sein können. Dies sind beispielsweise erhöhte Schmutzfrachtstöße bei der Mischwasserentlastung und Abwasserbehandlung. Eine Reduzierung solcher Frachtstöße kann durch eine Grundreinigung und/oder Präventivreinigung erreicht werden. Dafür bedarf es allerdings wirksamer und automatischer Schwallspüleinrichtungen, die Ablagerungen zeitnah entfernen bzw. die Entstehung verhindern. Zudem können durch Automatisierung von Reinigungsmaßnahmen auch finanziellen Aufwendungen für die Durchführung der von Eigenkontrollverordnungen mehrerer Länder (z. B. MURL, 1995) geforderter Inspektionen zur Feststellung von Ablagerungen verringert werden.

An die Reinigung von Stauraumkanälen mit Hilfe von Schwallspüleinrichtungen werden im Vergleich zu Abwassersammlern besondere betriebliche Anforderungen gestellt. Ursache dafür ist die Drosseleinrichtung am Ablauf solcher Mischwasserspeicher, da sie die Ausbreitung von Schwallwellen und den damit verbundenen Reinigungsprozess behindern kann. Eine effektive Reinigung erfordert daher eine optimale Auslegung der zu erzeugenden Schwallwellen.

Im Rahmen des Vorhabens wurde der Spülbetrieb einer pneumatisch betriebenen, steuerbaren Schwallspülklappe in einem großformatigen Stauraumkanal optimiert. Die Untersuchungen umfassten großtechnische Experimente sowie mathematisch-numerische Simulationen.

Die großtechnischen Untersuchungen beinhalteten

- hydraulische und stoffliche Untersuchungen bei Trockenwetter,
- Spülversuche zur Grund- und Präventivreinigung,
- Beobachtung des Klappenbetriebes,
- Schwefelwasserstoffmessungen in der Kanalatmosphäre sowie
- Stofftransportuntersuchungen.

Mit den bei den Feldversuchen erhobenen Daten erfolgten eine Kalibrierung und Verifizierung der mathematisch-numerischen Modelle, so dass eine optimale Strukturierung und Bemessung erforderlicher Schwallwellen vorgenommen werden konnte. Die Ergebnisse sind auf andere Stauraumkanäle übertragbar, so dass die Auslegung des Spülbetriebes

für die Grund- und Präventivreinigung unter Berücksichtigung der örtlichen Gegebenheiten der hier angewandten Methodik folgen kann.

Die wichtigsten Ergebnisse der Untersuchungen sind nachfolgend zusammengefasst.

- Die Grundreinigung des Stauraumkanals Markstraße entfernte ca. 44 Mg Ablagerungsmaterial, das eine mittlere, kritische Erosionsschubspannung von  $11,9 \text{ N/m}^2$  aufwies, mit etwa 200 Spülwellen. Das Spülwasservolumen der einzelnen Schwallwellen der Spülwellenfolge lag zwischen 138 und  $317 \text{ m}^3$ . Emissionen von Schwefelwasserstoff wurden während des Spülbetriebes nicht registriert.
- Für eine optimierte, dauerhafte Präventivreinigung von Stauraumkanälen wird ein Betrieb empfohlen, der zwischen Trockenwetter- und Mischwasserabfluss differenziert. In Trockenwetterzeiten wird periodisch mit angepassten Wellen gespült. Am Ende von Niederschlagsabflussereignissen kommen Spülwellengruppen zum Einsatz.
- Spülwellengruppen setzen sich aus Spülwellen mit unterschiedlichen Stauhöhen zusammen. Spülwellen mit maximaler Stauhöhe (Geschiebewellen) und angepasste Spülwellen (Suspensionswelle) unterscheiden sich durch das Spülwasservolumen, durch die erzeugten maximalen Sohlschubspannungen und die maximalen Durchflüsse. Die Suspensionswelle ist im Einzelfall unter folgenden Randbedingungen auszulegen:
  - Der Abfluss der Spülwelle muss ohne Rückstau und Wellenreflektion erfolgen können, und
  - die Überschreitung der kritischen Erosionsschubspannung der Ablagerungen muss über die gesamte Spüllänge gewährleistet sein.
- Bei der Festlegung einer Spülwellengruppe wird empfohlen, nacheinander je zwei Suspensionswellen, zwei Geschiebewellen und abschließend eine weitere Suspensionswelle vorzusehen.
- Für den derzeitigen Entwicklungsstand der Steuerungssoftware wird für den Spülbetrieb der Präventivreinigung im Stauraumkanal Markstraße ersatzweise eine Spülwellenfolge mit 3 Wellen pro Tag und einer Stauhöhe von 1,0 m empfohlen. Unter Berücksichtigung der örtlichen und stofflichen Gegebenheiten bieten Spülwellen mit einer Stauhöhe von 1,00 m ein ausreichendes Reinigungsvermögen. Eine solche Schwallwelle erzeugt über den gesamten Spülbereich Sohlschubspannungen über  $5 \text{ N/m}^2$  und reduziert im Vergleich zu Wellen mit größeren Spülwasservolumina die auf Überschreitung des Drosselabflusses zurückzuführenden Rückstauereffekte.
- Der 15-monatige Untersuchungsbetrieb der Schwallspülklappe verlief weitestgehend störungsfrei.

- Die Untersuchungen zum Stofftransport zeigen einen maßgeblichen Einfluss des Trassenverlaufs auf die Sedimentationsvorgänge innerhalb des Abflusses einer Schwallwelle.
- Aufbauend auf den Untersuchungsergebnissen wurde eine Vorgehensweise entwickelt, die eine Bedarfsermittlung von Schwallspüleinrichtungen in bestehenden Stauraum- und Regenrückhaltekanälen zulässt. Dabei werden neben den die Gewässergüte betreffenden Aspekte auch wirtschaftliche Gesichtspunkte berücksichtigt.
- Die gewonnenen Erkenntnisse zur Grund- und Präventivreinigung sind auf selbsttätige (passive) Schwallspüleinrichtungen (SSE) übertragbar. Es ist allerdings zu beachten, dass bei selbsttätigen SSE keine Spülwellengruppen zum Einsatz kommen können.

Da weiterhin Kenntnisse über das Reinigungsvermögen von Schwallwellen in sehr langen (> 1000 m), großformatigen Abwasserkanälen fehlen und auch der Einfluss unterschiedlicher Profilformen auf die Schwallspülung weitgehend unbekannt ist, sollten sich zukünftige Untersuchungen diesen Aspekten widmen. So ist bei lang fließenden Schwallwellen anzunehmen, dass die von BROMBACH (1982) beobachteten Mechanismen, die eine Umverteilung suspendierter Stoffe innerhalb der Welle bewirken, die Reinigungsleistung beeinflussen. Für eine weitere Optimierung des Spülbetriebes von Schwallspüleinrichtungen sowie für eine sinnvolle Erschließung weiterer Einsatzbereiche für die Schwallspülung sind weitere Erkenntnisse über diese Mechanismen wertvoll. Auch wurden bisher die Effekte angefaulten Abwassers bei der Schwallspülung nicht betrachtet und sollten Gegenstand weiterer Forschung werden.

## Literatur

- ABFKLÄRV (1992): Verordnung zur Aufbringung von Klärschlamm, BGBL I 1992, 912, in der Fassung vom 26.11.2000
- ATV (1982): Lehr- und Handbuch der Abwassertechnik, 3. Auflage, Band II: Entwurf und Bau von Kanalisationen und Abwasserpumpwerken, Herausgeber: Abwassertechnische Vereinigung e. V., Verlag von Wilhelm Ernst & Sohn, Berlin, München
- ATV (1985): Lehr- und Handbuch der Abwassertechnik Band III: Grundlagen für Planung und Bau von Abwasserkläranlagen und mechanische Klärverfahren, Ernst & Sohn, Berlin, München
- ATV (1992): Richtlinien für die Bemessung und Gestaltung von Regenentlastungsanlagen in Mischwasserkanälen Arbeitsblatt ATV-A 128, Vertrieb: Gesellschaft zur Förderung der Abwassertechnik e.V. (GFA), St. Augustin
- ATV (1997): Kanalreinigung mit dem Hochdruckspülverfahren, Arbeitsbericht der ATV-Arbeitsgruppe 1.7.3 „Regeln für den Kanalbetrieb“ (TC 165/WG 22) im ATV-Fachausschuss 1.7 „Betrieb und Unterhalt“, Korrespondenz Abwasser 4/97, S. 727-730
- ATV (1999): Bauwerke der zentralen Regenwasserbehandlung und -rückhaltung, Arbeitsblatt ATV-A 166, Vertrieb: Gesellschaft zur Förderung der Abwassertechnik e.V. (GFA), St. Augustin
- ATV (2003): Infrastrukturabfälle: Abfälle aus der Reinigung von Kanälen, Sinkkästen und Regenbecken - Abfälle aus Abwasserbehandlungsanlagen (Rechen- und Sandfanggut), Merkblatt ATV-DVWK-M 369, 5/2003
- BETANT (1910): Résultats d'expériences sur l'entraînement du limon dans les canalisations hydrauliques, Revue : La Technique Sanitaire, Paris
- BERTRAND-KRAJEWSKI, J.-L. (2002): Sewer Sediment Management: Some Historical Aspects of Egg-Shape Sewers and Flushing Tanks, 3<sup>rd</sup> International Conference on Sewer Processes and Networks, Paris, 15. –17. April 2002
- BÜRGISSER, M. F. (1999): Numerische Simulation der freien Wasseroberfläche bei Ingenieurbauten, Mitteilung der Versuchsanstalt für Wasserbau, Hydrologie und Glaziologie der ETH Zürich, Band 162, Eigenverlag
- BROMBACH (1982): Zwei Experimente zum Stofftransport im Mischwasserkanal, Korrespondenz Abwasser 5/82, S. 284-291

- BROMBACH, H.; MICHELBAACH, S.; WÖHRLE, C. (1992): Sedimentations- und Remobilisierungsvorgänge im Abwasserkanal, Teilprojekt 3, Umwelt- und Fluidtechnik GmbH, Bad Mergentheim
- CADAM (2000): Dambreak modelling guidelines and best practice, Concerted action on dambreak modelling, ed. By M. W. Morris and J. C. Galland
- CAMPINSANO, A.; MODICA, C. (2003). Flow velocities and shear stresses during flushing operations in sewer collectors, *Water Science and Technology*, Vol. 47, Nr. 4, S. 123 –128
- CAMPISANO, A.; CREACO, E.; MODICA, C. (2005): A dimensionless approach for determining the scouring performance of flushing waves in sewer channels, 10<sup>th</sup> Int. Conf. on Urban Drainage, August 21-26, 2005, Copenhagen, Denmark
- CHEBBO, G.; AIGUIER, E.; BERTRAND-KRAJEWSKI, J.-L.; HEDGES, P.; TYACK, N. (1996): Methods for determining the settling velocity profiles of solids in storm sewage, *Water Science and Technology*, Vol.33, No. 9, S. 117-125
- CRABTREE R. W. (1988). Sediment in sewers, *Journal IWEM*, Vol. 3, Nr. 6, S. 569 - 578
- DETTMAR, J. (2005): Beitrag zur Verbesserung der Reinigung von Abwasserkanälen, Dissertation, Institut für Siedlungswasserwirtschaft, RWTH Aachen, Aachen
- DETTMAR, J.; LORENZEN, A.; SCHÜßLER, O. (2001): Anwendung selbsttätiger Schwallspülklappen in der Mischwasserkanalisation, *Korrespondenz Abwasser*, 11/2001, S. 444-999
- DE SAINT VENANT, B. (1871): Théorie de mouvement non permanent des eaux, avec application aux crues de rivières et à l'indroduction des marées dans leur lit, *Séances de l'Académie des Sciences*, l'Academie des Sciences Band 73, Paris
- DOHMANN, M ; DETTMAR, J. (2002): Untersuchungen zur optimierten Kanalreinigung im Hinblick auf eine Minimierung biogener Schwefelsäurekorrosion bei der Abwasserbehandlung und Mischwasserentlastung, Schlussbericht zum Forschungsvorhaben im Auftrag des MUNLV des Landes Nordrhein-Westfalen, Institut für Siedlungswasserwirtschaft der RWTH Aachen, Aachen
- DWA (2005): Betriebsaufwand für die Kanalisation - Hinweise zum Personal-, Fahrzeug- und Gerätebedarf, DWA-Merkblatt A 147, Vertrieb: Gesellschaft zur Förderung der Abwassertechnik e.V. (GFA), St. Augustin
- FAN, C.-Y. (2004). Sewer sediment and control – A management practices reference Guide, EPA 600/R-04/059, Edison, NJ

- FORCHHEIMER (1930): Hydraulik, Teubner, Leipzig und Berlin
- FÜHRBÖTER (1980) : Demonstrationsprojekt Hamburger Sammlerbau, Entwicklung von  
Siel- bzw. Sammlerreinigungsverfahren, Schlussbericht Phase I, Leichtweiß-  
Institut für Wasserbau der Technischen Universität Braunschweig, Bericht Nr.  
467
- GATKE, D.; BORCHERDING, H. (1996): CSO tunnel cleaning by a long-distance flushing  
wave – Simulation and experiments, 6<sup>th</sup> International Conference on Urban  
Drainage, Hanover
- KIRCHHEIM, N.; SCHAFFNER, J., OBERLACK, M. (2005): Parameter study of a flush  
wave using numerical modelling, 10<sup>th</sup> Int. Conf. on Urban Drainage, August  
21-26, 2005, Copenhagen, Denmark
- KRAUTH, KH.; VETTER, O.; STOTZ, G. (2001): Ablagerungsarme Mischwasserkanalisa-  
tion, Schlussbericht zum Forschungsvorhaben im Auftrag des Ministeriums für  
Umwelt und Verkehr des Landes Baden Württemberg, Institut für Siedlungs-  
wasserbau, Wassergüte- und Abfallwirtschaft der Universität Stuttgart
- KUIPERS, J.; VREUGDENHIL C. B. (1973): Calculation of two-dimensional horizontal  
flow, Report S163, Part I, Delft Hydraulic Laboratory,
- LAINÉ, S.; PHAN, L.; MALABAT, D.; DUFFROS, B. (1998): Flush cleaning of sewer using  
the hydrass-valve, Proceedings of UDM'98, London, UK, 21–24. September  
1998, S. 391-398
- LAPLACE, D.; OMS, C.; AHYERRE, M.; CHEBBO, G.; LEMASSON, J.; FELOUZIS, L.  
(2002): Revoval of the organic surface layer in combined sewer sediment us-  
ing a flushing gate, 3<sup>rd</sup> Int. Conf. on Sewer Processes and Networks,  
15-17 April 2002, Paris
- LIEBAU (2004): Betriebsanweisung, Liebau Wasser- und Abwassertechnik, Bad König
- LORENZEN A. (2000): „Ermittlung der Leistungsfähigkeit der Schwallspülklappe zur Rei-  
nigung von Abwasserkanälen, Schlussbericht zum Forschungsvorhaben, Ber-  
lin (unveröffentlicht)
- LORENZEN, A.; LAPLACE, D. (1998): Reinigung von Abwasserkanälen durch Schwall-  
spülung (Teil 2), Korrespondenz Abwasser 2/1998, S. 39-46
- LORENZEN, A.; RISTENPART, E.; PFUHL, W. (1996): „Flush cleaning of sewers“, Water  
Science & Technology, Vol. 33, No. 9, pp. 221-228
- LÜTZNER, K.; BARTH, M. (1996): Drehbogen Pilotprojekt Dresden-Leuben, Abschlussbe-  
richt, Technische Universität Dresden

- MICHELBAACH, S.; WÖHRLE, C. (1992): Settleable solids in combined sewer system - measurement, quantity, characteristics, *Water Science and Technology*, Vol. 25, Nr. 8, S. 181 - 188
- MOLINARO, P.; NATALE, L. (1994): Modelling of flood propagation over initially dry areas, *Proceedings of the Speciality Conference held in Milan, Italy at ENEL-DSR-CRIS, 29 June - 1 July 1994*, ASCE, New York
- MUNLV (2005): Entwicklung und Stand der Abwasserbeseitigung in Nordrhein-Westfalen, Ministerium für Umwelt und Naturschutz, Landwirtschaft und Verbraucherschutz des Landes Nordrhein-Westfalen, Düsseldorf
- MURL (1995a): Selbstüberwachungsverordnung Kanal, Verordnung zur Selbstüberwachung von Kanalisationen und Einleitungen von Abwasser aus Kanalisationen im Mischsystem und im Trennsystem (SüwV Kan), Nordrhein Westfalen
- MURL (1995b): Anforderungen an den Betrieb und die Unterhaltung von Kanalisationsnetzen, Runderlass des Ministeriums für Umwelt, Raumordnung und Landwirtschaft des Landes Nordrhein Westfalen vom 3. Januar 1995
- ODGEN, H. N. (1898): Flushing pipe in sewers, *American Society of Civil Engineers*, Vol. 40.
- PISANO, W.C.; ARONSON, G.L.; QUEIROZ, C.S.; BLANC, F.C.; O`SHAUGHNESSY, J.C. (1979): „Dry-weather deposition and flushing for combined sewer overflow pollution control“, *Municipal Environmental Research Laboratory, Office of Research and Development, U.S. Environmental Protection Agency, Cincinnati, Ohio 45268*, Report No. R804578
- RISTENPART, E. (1995). Sediment properties and their changes in sewer, *Water Science and Technology*, Vol. 31, Nr. 7, S. 77 – 83
- RISTENPART, E. (1995b): Feststoffe in der Mischwasserkanalisation – Vorkommen, Bewegung und Verschmutzungspotential, *Schriftenreihe für Stadtentwässerung und Gewässerschutz*, Nr. 11, Hannover
- SAKAKIBARA, T. (1996): Sediments flushing experiment in a trunk sewer, *Water Science and Technology*, Vol. 33, No. 9, S. 229-235
- SCHAFFNER, J.; OBERLACK, M.; KIRCHHEIM, N. (2004): The application of numerical modeling (3-D) for the calculation of flush waves in sewer channels, 6<sup>th</sup> Int. Conference on Urban Drainage Modelling, September 15-17, 2004, Dresden
- SCHLICHTING (1965): *Grenzschichttheorie*, Verlag G. Braun, Karlsruhe

- SHIELDS, A. (1936): Anwendung der Ähnlichkeitsmechanik und der Turbulenzforschung auf die Geschiebebewegung, Mitteilungen der Preußischen Versuchsanstalt für Wasserbau und Schiffbau, H. 26
- SCHMITT, F. (1992): Einfluss von Ablagerungen auf den Betrieb von Abwasserkanälen, Schriftenreihe des Instituts für Siedlungswasserwirtschaft und Abfalltechnik (ISAH), Heft 82, Universität Hannover, Hannover
- SCHMITT, F.; SEYFRIED, C. F. (1992). Sulphate Reduction in Sewer Sediments, Water Science and Technology, Vol. 25, Nr. 8, S. 187 – 193
- SCHRAMM (2002): Eindimensionale Berechnung instationärer und diskontinuierlicher Abflussprozesse in abflussschwachen naturnahen Gerinnen. Dissertation, am Lehrstuhl und Institut für Wasserbau und Wasserwirtschaft der RWTH Aachen, Aachen
- SCHWEEN, W. (1936): Beitrag zum Ablauf von Schwallwellen in nichtbegehbaren Leitungen auf Grund von Messungen in Straßenkanälen der Stadt Dresden, Buchdruckerei & Verlagsanstalt GmbH, Freudingen i. Westfalen
- STEIN, D.; FALK, C.; SCHLÜTER, M.; MEYER, P.; SCHLEMMINGER, F. (2000): „Empfehlungen zur Kanalreinigung“, Endbericht zum Forschungsvorhaben im Auftrag des MURL NRW, Institut für Kanalisationstechnik Gelsenkirchen, Mai 2000
- WECHS, F. (1985): Ein Beitrag zur zweistufigen anaeroben Klärschlammstabilisierung, Berichte aus Wassergütewirtschaft und Gesundheitsingenieurwesen, Band 53, TU München, München

Die im Folgenden aufgeführten Veröffentlichungen und Diplomarbeiten sind im Rahmen des Projektes entstanden.

- DETTMAR, J.; STAUFER, P. (2004): Modelling of flushing waves for optimising cleaning operations, 6<sup>th</sup> International Conference on Urban Drainage Modelling, September 15-17, Dresden
- STAUFER, P. (2004): Optimierung des Spülbetriebs in Stauraumkanälen, Diplomarbeit am Institut für Siedlungswasserwirtschaft der RWTH Aachen, Aachen
- KNOTTE, H.; DETTMAR, J.; LIEBAU, L. (2004): Neues innovatives Kanalreinigungssystem, Abwasserreport 9/2004
- DETTMAR, J.; PINNEKAMP, J. (2005): Entwicklungen bei der Reinigung von Regenbecken, Vortrag, 4. Regenwassertage, 1./2. Juni 2005, Leverkusen

- DETTMAR, J.; STAUFER, P. (2005): Reduzierung von Schmutzfrachtstößen durch eine optimierte Schwallspülung von Stauraumkanälen, Korrespondenz Abwasser, Heft 8, S. 889-894
- DETTMAR, J.; STAUFER, P. (2005): Behaviour of the activated storage-volume of flushing waves on cleaning performance, 10<sup>th</sup> International Conference on Urban Drainage, August 21-26, Copenhagen, Denmark
- DAGHAY, M. (2005): Mathematisch-numerische Untersuchungen zum Reinigungsvermögen einer Schwallwelle und zu den Auswirkungen verschiedener Modellansätze, Diplomarbeit am Institut für Siedlungswasserwirtschaft der RWTH Aachen, Aachen

## Anhang A



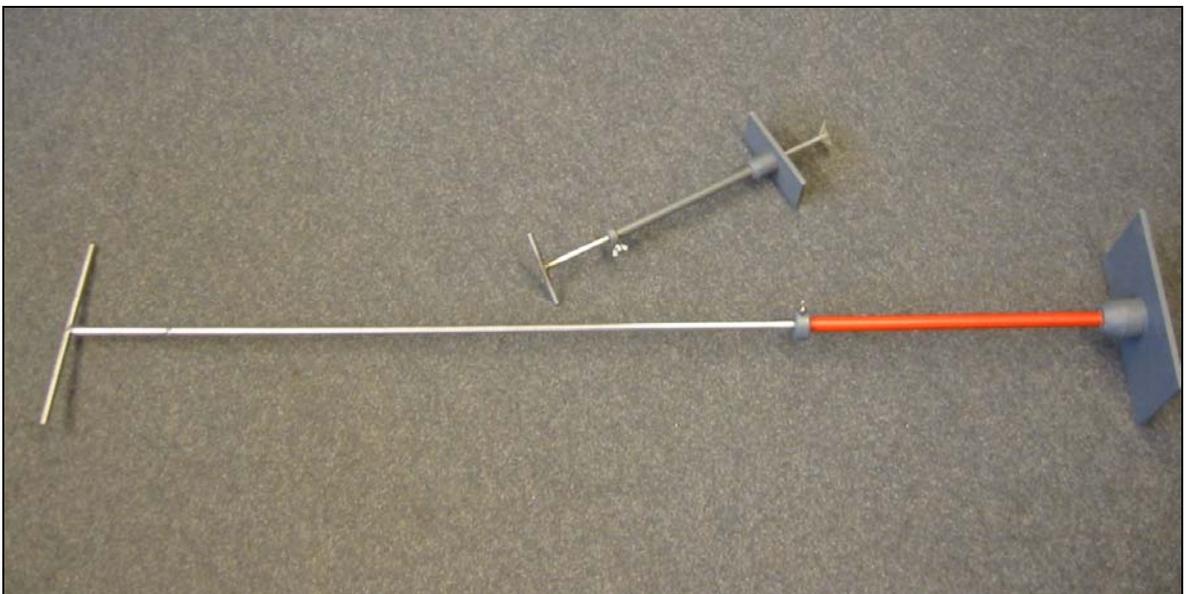
**Bild A 1:** Schaltschrank des neu entwickelten Reinigungssystems mit Kompressor sowie weiteren Einrichtungen für die Steuerung und Datenübertragung



**Bild A 2:** Montierte Füllstandssonde der Endress+Hauser Messtechnik GmbH+Co. (links) und Führung der Strom- und Datenleitungen über eine exgeschützte Quetschdichtung in Schacht 1 (rechts)



**Bild A 3:** Eingesetztes Durchflussmessgerät PCM-Pro der Nivus GmbH



**Bild A 4:** Eingesetzte Handmessgeräte zur punktuellen Bestimmung von Sedimenthöhen

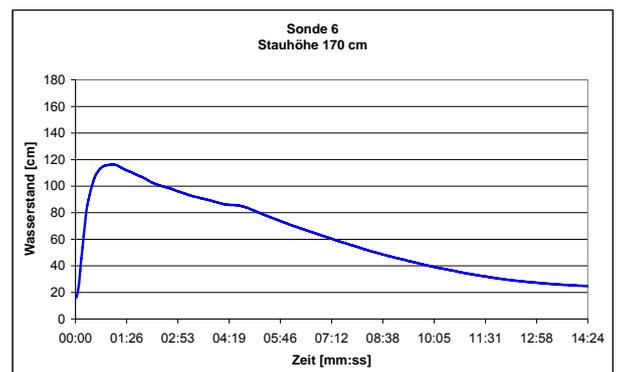
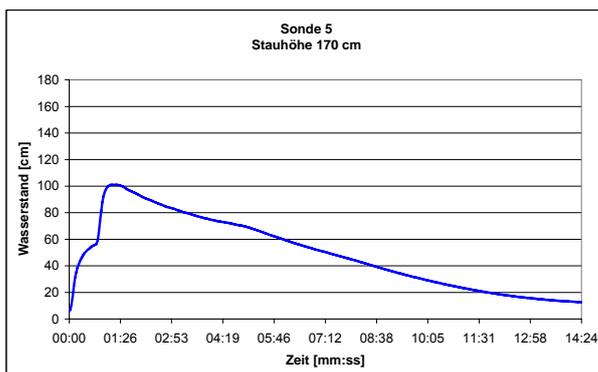
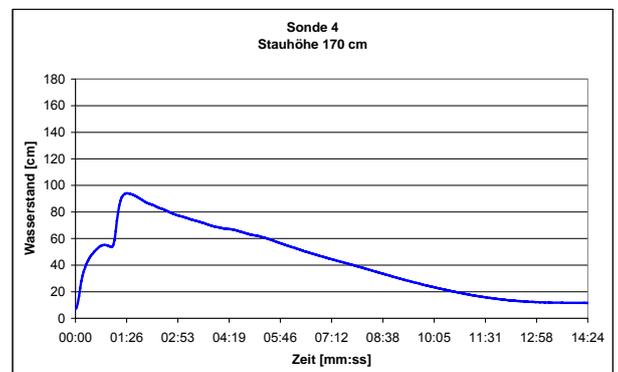
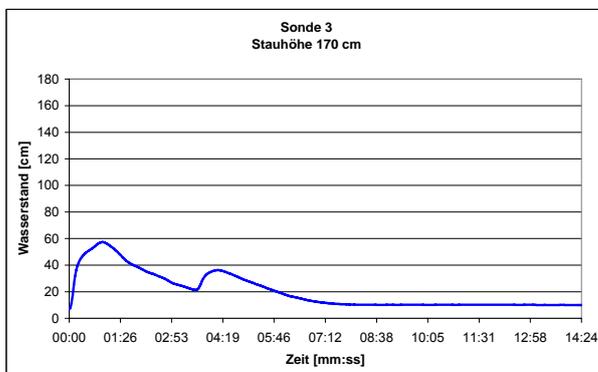
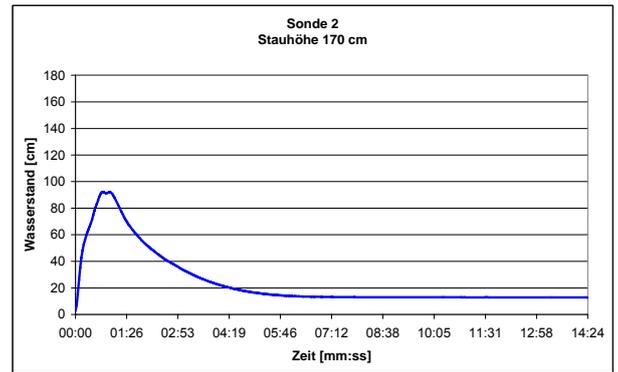
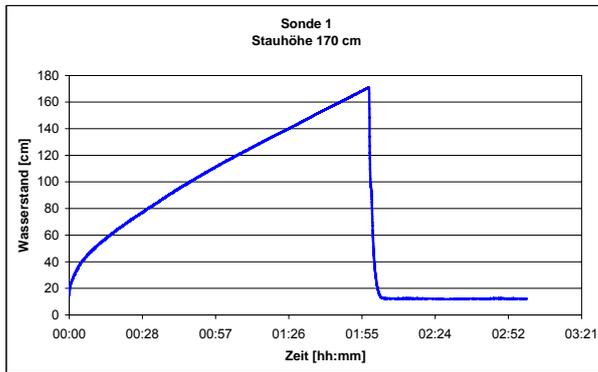


**Bild A 5:** Eingesetztes Messgerät (OdaLog) zur kontinuierlichen Erfassung von Schwefelwasserstoff in Kanalatmosphäre

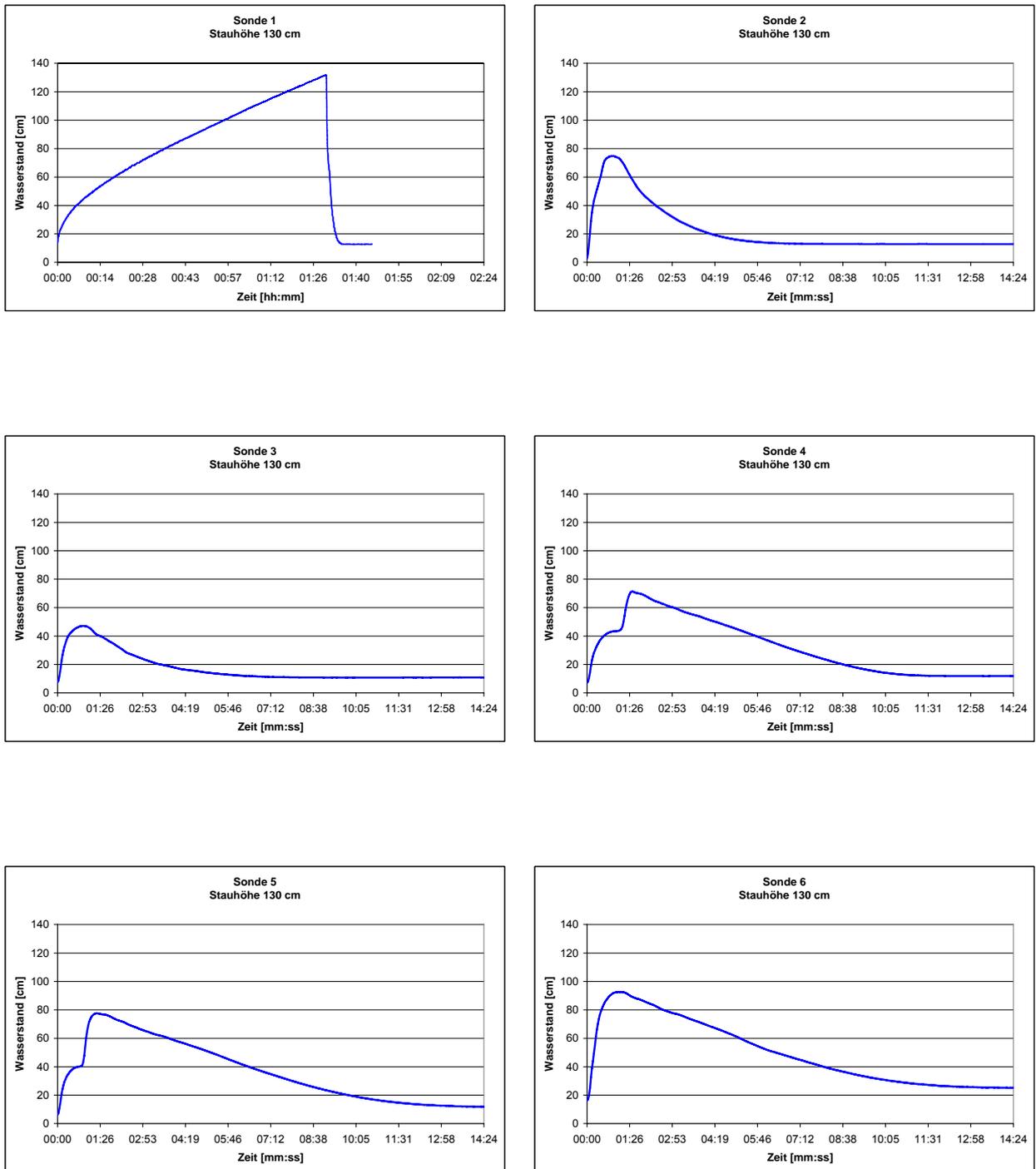


**Bild A 6:** Verwendete Sand-Kies-Mischung für die Stofftransportuntersuchungen im den SKU Markstraße

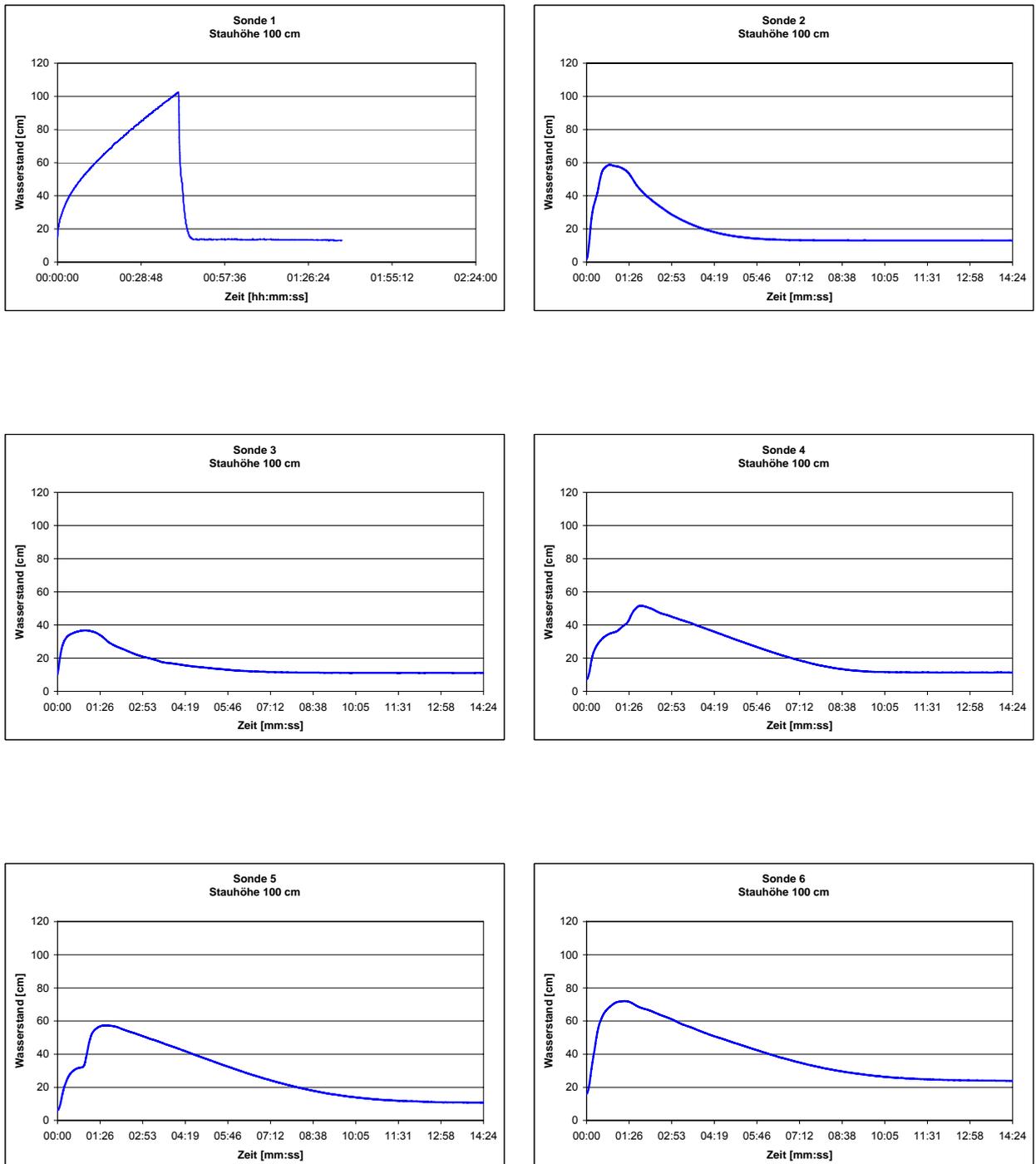
## Anhang B



**Bild B 1:** Wasserstandsganglinie einer Schwallwelle im SKU Markstraße mit  $h_{\text{Stau}} = 1,7 \text{ m}$  an den Sonden S1 bis S6



**Bild B 2: Wasserstandsganglinie einer Schwallwelle im SKU Markstraße mit  $h_{\text{Stau}} = 1,3 \text{ m}$  an den Sonden S1 bis S6**



**Bild B 3: Wasserstandsganglinie einer Schwallwelle im SKU Markstraße mit  $h_{\text{Stau}} = 1,0 \text{ m}$  an den Sonden S1 bis S6**