

Reduzierung der Gewässerbelastung durch Anwendung einer flächen- deckenden und quasi-kontinuierlichen Reinigung eines Mischsystems

Phase 1: Bestandsaufnahme

-Kurzfassung-



Abschlussbericht

für das



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

Förderkennzeichen: AZ IV – 9 – 042 3F3

Projektpartner:

- Entsorgungsbetriebe Warendorf

Abschlussbericht

zum Forschungsvorhaben:

„Reduzierung der Gewässerbelastung durch Anwendung einer flächendeckenden und quasi-kontinuierlichen Reinigung eines Mischsystems“

Phase I: Bestandsaufnahme

AZ IV - 9- 042 3F3

für das



Aachen, den 16.6.2008


Univ.-Prof. Dr.-Ing. J. Pinnekamp
(Projektleiter)

Inhalt

1	Einleitung und Zielsetzung	9
2	Beschreibung des Untersuchungsgebiets	11
2.1	Entwässerungssystem	11
2.2	Die Kläranlage Warendorf – Hoetmar	12
3	Felduntersuchungen	13
3.1	Beschreibung der Untersuchungen	13
3.1.1	<i>Messungen am Regenüberlaufbecken</i>	<i>13</i>
3.1.2	<i>Untersuchungen innerhalb des Kanalnetzes</i>	<i>14</i>
3.2	Ergebnisse	16
3.2.1	<i>Methodik zur Auswertung eines Schmutzfrachtstoßes</i>	<i>16</i>
3.2.2	<i>Zulauf zum Regenbecken</i>	<i>17</i>
3.2.3	<i>Klär- und Beckenüberlauf</i>	<i>19</i>
3.2.4	<i>Einordnung der Gewässerbelastungen aus der Mischwasserentlastung</i>	<i>20</i>
3.2.5	<i>Zulauf Kläranlage</i>	<i>21</i>
3.2.6	<i>Ablauf Kläranlage</i>	<i>22</i>
3.3	Schlussfolgerungen aus der Analyse der Schutzfrachtdynamik bei Regen	25
4	Numerische Untersuchungen	27
4.1	Schmutzfrachtmodellierung	27
4.1.1	<i>Ergebnisse der Kontinuumssimulation mit Moment</i>	<i>27</i>
4.1.2	<i>Schlussfolgerungen zur Schmutzfrachtberechnung</i>	<i>27</i>
4.2	Dynamische Kläranlagensimulation	28
4.2.1	<i>Ergebnisse der Kalibrierung</i>	<i>28</i>
5	Quasi-kontinuierliche Reinigungsstrategie	30
5.1	Entwicklung der Reinigungsstrategie	30
5.2	Vergleichende Wirtschaftlichkeitsbetrachtung	32
5.2.1	<i>Ansatz und Zielgleichung</i>	<i>32</i>
5.2.2	<i>Kosten der HD-Reinigung</i>	<i>33</i>
5.2.3	<i>Kosten zur Umsetzung des Schwallspülkonzeptes</i>	<i>33</i>
5.2.4	<i>Schlussfolgerungen der vergleichenden Wirtschaftlichkeitsbetrachtungen</i>	<i>34</i>
6	Zusammenfassung	35
7	Literatur	37

Abbildungsverzeichnis

Bild 2.1:	Verteilung der Netzanteile des Mischsystems in Hoetmar in Bezug auf das vorliegende Sohlengefälle.....	12
Bild 3.1:	Schematische Darstellung der Abwasserströme am Regenüberlaufbecken vor der Kläranlage Hoetmar	14
Bild 3.2:	Lokalisierung von Ablagerungen und Positionierung temporärer Durchflussmessungen im Entwässerungssystem (rot: Ablagerungen durch Trockenwetterbedingungen; grün: Ablagerungen bei Regenwetter)	15
Bild 3.3:	Visualisierung des Spülstoßes durch die Gegenüberstellung der kumulierten Fracht eines Abflusses und dessen kumulierten Abflussvolumens (BUTLER UND DAVIES, 2004).....	17
Bild 3.4:	Dimensionslose Darstellung der kumulierten relativen Fracht in Bezug auf das kumulierte relative Abflussvolumen; Regenereignis vom 27.05.2007 am RÜB Hoetmar	18
Bild 3.5:	Zusammenhang zwischen Schmutzfrachtstößen (SFS) und dem Produkt aus Länge der voran gegangenen Trockenwetterperiode (TWP) und der Wurzel der Niederschlagssumme (h_{na}).....	18
Bild 3.6:	Dimensionslose Darstellung der kumulierten relativen Fracht in Bezug auf das kumulierte relative Entlastungsvolumen des Regenereignisses vom 15.05.2007	20
Bild 3.7:	Entlastungsfrachten vom Klärüberlauf von neun Entlastungsereignissen vom Klärüberlauf Hoetmar.....	21
Bild 3.8:	Auswertung der Zulauffrachtganglien bei Regenwetter.....	22
Bild 3.9:	Kumulierte Fracht von AFS, $\text{NO}_3\text{-N}$, $\text{NH}_4\text{-N}$ und CSB (hom.) am Ablauf der Kläranlage Hoetmar im Nachgang eines Niederschlagsereignisses vom 07./08. 05.2007 (Dauer der Trockenwetterperiode 24 d, Niederschlagshöhe 38 mm).....	24
Bild 3.10:	Auswertung der dimensionslosen Schmutzfrachtgraphen für den Kläranlagenablauf.....	25
Bild 4.1	Vergleich von gemessenen und simulierten Werten für die abfiltrierbaren Stoffe (AFS) im Ablauf der Kläranlage Hoetmar vom 12.05. bis zum 17.05.2007	29
Bild 4.2 :	Vergleich von gemessenen und simulierten Werten für den chemischen Sauerstoffbedarf (CSB) im Ablauf der Kläranlage Hoetmar	29
Bild 5.1:	Darstellung der ablagerungskritischen Bereiche im Entwässerungssystem von Hoetmar sowie die Positionierung von Spülschächten in Anfangshaltungen	31

Tabellenverzeichnis

Tabelle 2.1: Kennzahlen zur Beschreibung des Entwässerungssystems	11
Tabelle 5.1: Auflistung der Geräte für zwei Varianten des Schwallspülkonzeptes.....	33
Tabelle 5.2: Gegenüberstellung des Ergebnisses der vergleichenden Wirtschaftlichkeitsbetrachtung der Schwallspülkonzeptvarianten am Beispiel Hoetmar	34

Abkürzungsverzeichnis

A	Absorption
ABK	Abwasserbeseitigungskonzept
A_{EK}	kanalisierte Einzugsgebietsfläche
A_{red}	befestigte Einzugsgebietsfläche
c	Konzentration der Substanz
CSB	Chemischer Sauerstoffbedarf
DWA	Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall e.V.
EBW	Entsorgungsbetriebe Warendorf
EK	Entwässerungskonzept
eq	equivalent
feq	equivalent, filtered
FW	Fremdwasser
GIS	Geographischen Geographisches Informationssystem
i	Zinssatz (absolut)
IK_{SSE}	Investitionskosten Schwallspüleinrichtung
JSM	Jahresschmutzwassermenge
KAS	Kanalvolumen-aktivierende-Spüleinrichtung
$KFAKR(i,n)$	Diskontierungsfaktor für einmalige Zahlungen
L	Pfadlänge
LK_{HDR}	Laufende Kosten der HD-Reinigung
MG	Maßnahmenggebiet
N	Niederschlagshöhe
n	Betrachtungszeitraum
NAE	Niederschlagsabflussereignis
r	Preissteigerung (absolut)
SSE	Schwallspüleinrichtung
SSi	Suspended Solids (inert)
TSS	Total Suspended Solids
TWP	Trockenwetterperiode
ΔJK	Unterschied in den Jahreskosten
ΔQ_z	zeitliche Veränderung im Zulauf zur Kläranlage

1 Einleitung und Zielsetzung

Ablagerungen in Mischwasserkanalisationen sind mit einer Reihe unerwünschter Folgen für den Betrieb von Entwässerungssystemen und die aufnehmenden Gewässer verbunden. Dazu zählen die erhöhten Frachten im Zulauf von Regenbecken und Kläranlagen zu Beginn eines Regens, die zu erhöhten Emissionen in das aufnehmende Gewässer beitragen können. Da mit der für die Kanalreinigung am häufigsten eingesetzten Methode, der HD-Reinigung, in Kanalhaltungen nur temporär ein ablagerungsfreier Zustand erreicht werden kann, erscheint die quasi-kontinuierlich arbeitende Schwallspülung geeignet, den Zeitraum innerhalb einer Trockenwetterperiode zu verringern, in dem sich Sedimente bilden, die zu Schmutzfrachtstößen führen können.

Die Erfassung aller relevanten Abwasserabflüsse sowie die kontinuierliche Messung von Konzentrationswerten am Kläranlagen- und Regenbeckenzulauf für ein Einzugsgebiet ermöglicht eine systematische Darstellung der Prozesse zu Beginn eines Regenereignisses in einer Mischwasserkanalisation. Die anschließende Gegenüberstellung der Zulauffrachten und der Entlastungsraten vor und nach dem Einbau von Schwallspüleinrichtungen ermöglicht eine Quantifizierung des Erfolgs. Weitere Erkenntnisse über die Zusammenhänge der Gewässerbelastungen aus Ablagerungen können mit numerischen Untersuchungen gewonnen werden, die das Kanalnetz und die Kläranlage einschließen.

Die Untersuchungen wurden im Kanalnetz des Ortsteils Hoetmar der Stadt Warendorf durchgeführt. Es handelt sich dabei um ein flaches Mischwasserkanalnetz von ca. 7,1 km Länge. Der Kläranlage ist ein Regenüberlaufbecken im Nebenschluss vorgeschaltet.

Gesamtziel der Untersuchung ist, fundierte Kenntnisse über die stofflichen Veränderungen im Abwasser eines durch flächendeckende quasi-kontinuierliche Kanalreinigung ablagerungsfrei gehaltenen Kanalnetzes zu gewinnen. Mit Hilfe großtechnischer Versuche und mathematischer Simulationen sollen die Auswirkungen dieser Reinigungsstrategie auf den Kläranlagenbetrieb sowie auf Mischwasserentlastungen und damit auf die Gewässergüte erfasst werden. Darauf aufbauend sollen allgemeingültige Aussagen für nordrhein-westfälische Kommunen erarbeitet werden.

Das Gesamtvorhaben wurde in zwei Phasen aufgeteilt. Zunächst wurde nur Phase I bewilligt. Die Ziele dieser ersten, hier vorgestellten Phase gliedern sich in folgende Teilziele:

- Feststellung des Status Quo des Entwässerungssystems von Hoetmar in Bezug auf die Schmutzfrachtbelastung der angeschlossenen Abwasseranlagen zu Beginn und im Verlauf von Niederschlagsabflussereignissen.
- Identifizierung der maßgeblichen ablagerungskritischen Bereiche im Mischsystem.

- Übertragung des Status Quo in ein Schmutzfrachtmodell und ein dynamisches Kläranlagen-simulationsmodell.
- Ableitung einer Reinigungsstrategie aus den gewonnenen Teilergebnissen.
- Bewertung der geplanten Umsetzungsphase einer netzweiten Schwallspülung und Erstellung eines Konzeptes.

Für eine sich ggf. anschließende zweite Phase ergeben sich dann die nachfolgenden Teilziele:

- Implementierung der entwickelten quasi-kontinuierlichen Reinigungsstrategie.
- Monitoring der Veränderung der Emissionssituation im Kläranlageneinzugsgebiet Hoetmar.
- Übertragung der Messergebnisse in das Kläranlagen- und das Schmutzfrachtmodell.
- Ableitung allgemeiner Hinweise für Kommunen in Nordrhein-Westfalen.

2 Beschreibung des Untersuchungsgebiets

2.1 Entwässerungssystem

Das Abwasser des Ortsteils Hoetmar wird in der ortseigenen Kläranlage behandelt. Das Abwasser der 2.384 Einwohner (Stand Dezember 2005), die einen Kanalanschluss haben, wird überwiegend im Mischsystem abgeleitet. Der Anteil der angeschlossenen Einwohner am Trennsystem ist nicht zu ermitteln. Das im Mischsystem erschlossene Gebiet hat eine Gesamteinzugsgebietsfläche von 45 ha, wovon 17 ha befestigte Fläche sind. Das Trennsystem entwässert 14 ha kanalisierte Einzugsgebietsfläche, von denen wiederum 5 ha befestigt sind. Die Länge der Mischwasserkanäle beträgt 7.096 m, dem stehen 3.522 m Regenwasserkanäle und 1.836 m Schmutzwasserkanäle gegenüber, vgl. Tabelle 2.1. Die Instandhaltung und Inspektion des Netzes erfolgt nach den Vorschriften der SÜwV-Kan (N.N., 1995). Das komplette Einzugsgebiet ist zur Entlastung der Kläranlage an ein Regenüberlaufbecken angeschlossen. Bei Trockenwetter wird das Abwasser an dem im Nebenschluss angeordneten Becken vorbei durch einen Düker unter dem Wiener Bach hindurch zur Kläranlage Hoetmar geleitet und dort mechanisch-biologisch behandelt. Im Regenwetterfall fließt der Teil des Mischwassers aus den zwei Teileinzugsgebieten, der den Drosselabfluss übersteigt, über jeweils ein Trennbauwerk einem Pumpensystem zu. Von hier werden die Abflüsse in ein hoch liegendes Regenüberlaufbecken gefördert. Die Entleerung des Beckens zur Kläranlage erfolgt im Freigefälle. Die abgesetzten Schwebstoffe werden im Anschluss an ein Niederschlagsabflussereignis mit Hilfe von Spülstrahlpumpen bzw. Strömungserzeugern in Bewegung gehalten. Der Klärüberlauf sowie der Beckenüberlauf werden direkt dem angrenzenden Wiener Bach zugeführt.

Tabelle 2.1: Kennzahlen zur Beschreibung des Entwässerungssystems

			Mischsystem	Trennsystem	Gesamtsystem
Gesamteinzugsgebietsfläche (kanalisiert)	$A_{E,K}$	[ha]	45	14	59
Befestigte Fläche	A_{red}	[ha]	17	5	22
Kanallänge		[km]	7,1	3,5/1,8 ¹⁾	12,4
1) Schmutzwasserkanal / Regenwasserkanal					

Die topographische Situation von Hoetmar im nordöstlichen Münsterland spiegelt sich auch in der Ausbildung der Sohlengefälle im Mischwassernetz wider. Dem Arbeitsblatt DWA A 110 folgend (N.N., 2006a) sollten Mischwasserkanäle mit einem Mindestgefälle von 1 : DN verlegt werden. Häufig verlangen die Anschlusssituation an weiterführende Mischwassersammler oder eine durch steil verlegte Sammler resultierende hohe Anzahl erforderlicher Pumpsysteme, dass vielerorts Haltungen flacher verlegt werden. Dies trifft besonders auf Regionen mit flachen Geländeneigungen zu.

Die Gefälleverhältnisse im Mischwasserkanalnetz von Hoetmar stellen sich im Vergleich zu anderen Kanalnetzen nicht als außergewöhnlich flach dar. Die Auswertung der Kanalnetzdatenbank verdeutlicht, dass bezogen auf die Gesamtlänge etwa 38 % des Entwässerungssystems, das im Mischsystem entwässert wird, ein Sohlengefälle von weniger als 2,5 ‰ hat (vgl. Bild 2.1). In einzelnen Bereichen im Kanalnetz von Hoetmar wurden allerdings auch Abwasserrohre mit einem Nenndurchmesser von DN 200 verlegt. In diesen Bereichen sind die Leitungen entsprechend noch steiler zu verlegen. Im Hinblick auf die Gesamtverteilung der verschiedenen Querschnitte ergibt sich, dass ca. 43 % der verlegten Kanallänge unterhalb eines entsprechenden Sohlengefälles von 1 : DN liegen.

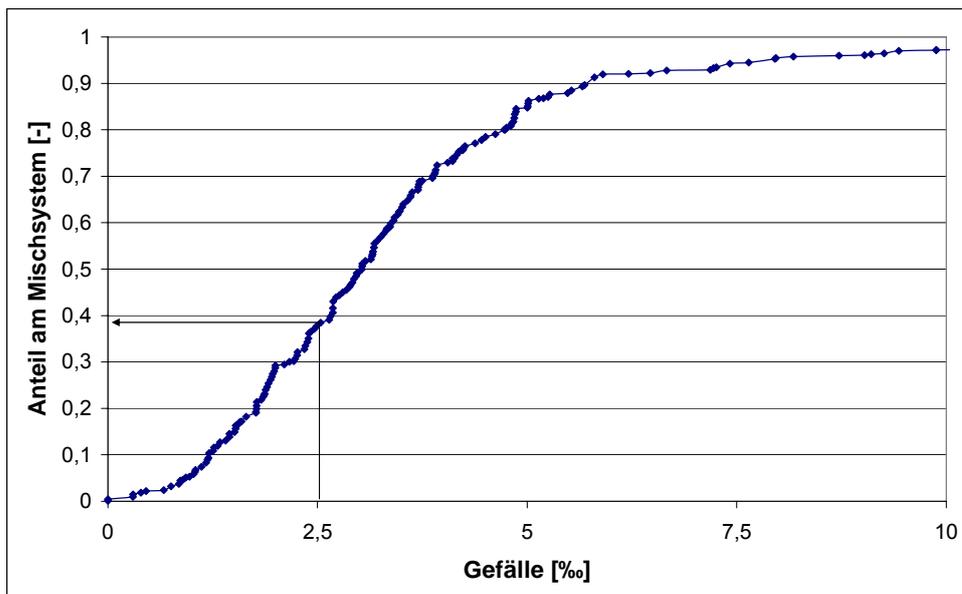


Bild 2.1: Verteilung der Netzanteile des Mischsystems in Hoetmar in Bezug auf das vorliegende Sohlengefälle

2.2 Die Kläranlage Warendorf – Hoetmar

Die Kläranlage Hoetmar ist auf maximal 3.100 Einwohnergleichwerte (EGW) ausgelegt. Als Vorflut für den Ablauf der Kläranlage dient der Wiener Bach.

Die mechanische Reinigung besteht aus einer Siebschnecke, einem belüfteten Sandfang und einem Fettfang. Das sich unmittelbar an die mechanische Reinigung anschließende Belebungsbecken arbeitet nach dem Prinzip der simultanen aeroben Schlammstabilisierung. Das Belebungsbecken mit einem Volumen von 1.240 m³ wird intermittierend mittels Druckbelüftung belüftet. In den Zeiten ohne Druckbelüftung wird die vollständige Durchmischung des Beckens mit zwei Rührwerken sicher gestellt. Der TS-Gehalt im Belebungsbecken soll laut Betriebsanleitung zwischen 3 und 4 g TS/l liegen. Die Anlage hält die gesetzlichen Ablaufwerte bei einem möglichst geringen Energieverbrauch ein.

3 Felduntersuchungen

3.1 Beschreibung der Untersuchungen

3.1.1 Messungen am Regenüberlaufbecken

Zur Erfassung der Abwasserströme und der entsprechenden Frachten wurden am Regenüberlaufbecken (RÜB) Hoetmar eine Reihe von Messeinrichtungen installiert und betrieben, die die Überwachungsinstrumente der Entsorgungsbetriebe Warendorf (EBW) ergänzten. Die Durchflüsse wurden am Zulauf der Speicherkammer, am Klärüberlauf sowie am Drosselablauf aus einem der beiden Teileinzugsgebiete mittels Ultraschall erfasst. Der Ablaufvolumenstrom, der gleichzeitig den Zulauf zur Kläranlage bildet, wurde mittels magnetisch-induktiver Durchflussmessung (MID der EBW) bestimmt. Aus der Differenzbildung zwischen Gesamtabfluss am MID zur Kläranlage und dem Abfluss aus einem der Teilgebiete kann der Abfluss aus dem zweiten Mischgebiet berechnet werden. Zur weiteren Beschreibung der hydraulischen Verhältnisse der Teileinzugsgebiete wurde der Abschlagsvolumenstrom aus einem Teileinzugsgebiet mittels Radarmessung bestimmt.

Zudem wurden Höhenstandmessungen aus der Systemüberwachung der Entsorgungsbetriebe Warendorf übernommen, die für die Plausibilisierung der Volumenströme und der Wasserstände in der Speicherkammer sowie an Becken- und Klärüberlauf herangezogen wurden.

Zur Erfassung der Konzentrationsganglinien wurden kontinuierlich messende Multispektrometersonden im zur Kläranlage geleiteten Volumenstrom und im Zulauf der Speicherkammer angeordnet. Zur regelmäßigen Kalibrierung der Multispektrometersonde wurde ein zeitgesteuerter Probenehmer aufgestellt, der 2-Stunden Mischproben gewann. Zudem wurden drei ereignisgesteuerte Probenehmer installiert, die Zweistundenmischproben aus Mischwasser zogen, wenn der Mischwasserabschlag bzw. der Klärüberlauf ansprang.

Bild 3.1 zeigt schematisch die Abwasserströme am Regenüberlaufbecken.

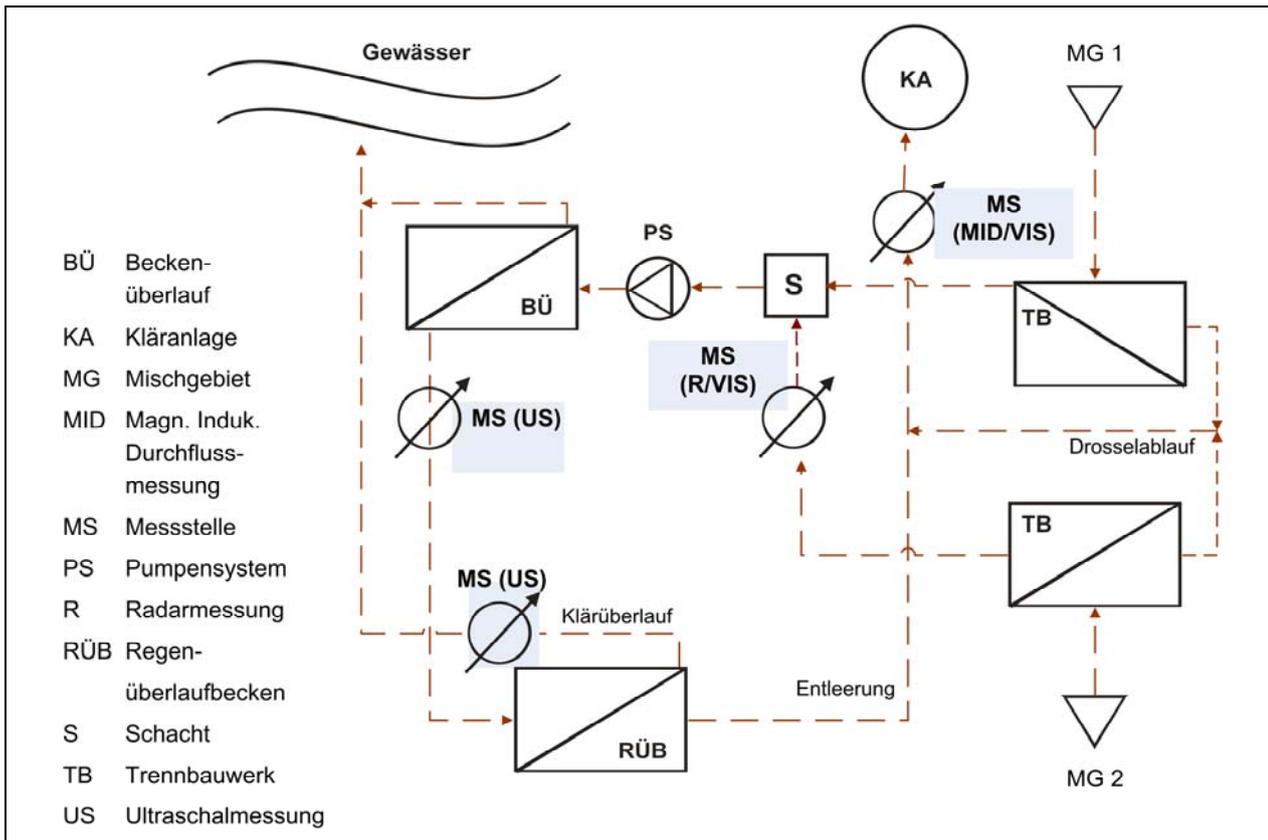


Bild 3.1: Schematische Darstellung der Abwasserströme am Regenüberlaufbecken vor der Kläranlage Hoetmar

3.1.2 Untersuchungen innerhalb des Kanalnetzes

Zur Bestimmung der Ablagerungsart und zur näheren Bestimmung der Ursache der Ablagerungsbildung wurden Ablagerungen beprobt und analysiert. Da die meisten Ablagerungen in Anfangshaltungen aufzufinden waren, war es nicht möglich, Körnungslinien anzufertigen, da die Proben insbesondere in den Anfangshaltungen und den Haltungen mit kleinen Nennweiten aus groben organischen Sedimenten bestanden.

Bei den regelmäßigen Befahrungen der Kanalisation durch die EBW werden ebenfalls auffällige Ablagerungen innerhalb des Systems aufgezeichnet. Neben diesen Haltungen wurden systematisch auch Haltungen im Mischsystem in Augenschein genommen, bei denen Gefälleverhältnisse oder Anschlusssituation die Bildung von Ablagerungen begünstigen.

Vor dem Hintergrund des stark schwankenden, in den Nachtstunden in einigen Teilen sogar versiegenden Trockenwetterabflusses sind Kanalablagerungen in vielen Teilbereichen des Kanalnetzes zu erwarten. Dies trifft vor allem auf Anfangshaltungen und Bereiche mit geringem Gefälle zu (N.N., 1992). Den Vorgaben des DWA Arbeitsblattes A 110 (N.N., 2006a) folgend, wurden die an verschiedenen Stellen im Kanalnetz gemessenen Höhestands- und Durchflussganglinien ausgewertet. Die Auswertung hatte zum Ziel, die während Trockenwetterzeiten auftretenden maximalen Fließtiefen in den Anfangshaltungen zu ermitteln. Dabei ergaben bei-

spielsweise die Messungen in der *Ahlener Straße* (S24480199, DN 300, Wohngebiet) und *Am Wiebusch* (S24480148, DN 300, Wohngebiet), dass eine Fließtiefe von 3 cm im Tagesverlauf nicht überschritten wird, so dass die verhältnismäßig großen Sohlgefälle von 3,5 ‰ bzw. 2,9 ‰ nicht ausreichen, um den Stofftransport aufrecht zu halten. Die Inaugenscheinnahme der Sedimente bestätigt das Aufkommen von Ablagerungen bestehend aus Hygieneartikeln, um die sich sandiges Material anlagert.

Bild 3.2 zeigt die Ergebnisse der Untersuchungen. Haltungen bei denen Ablagerungen vorgefunden wurden, wurden entsprechend als „ablagerungskritische Bereiche“ gekennzeichnet.

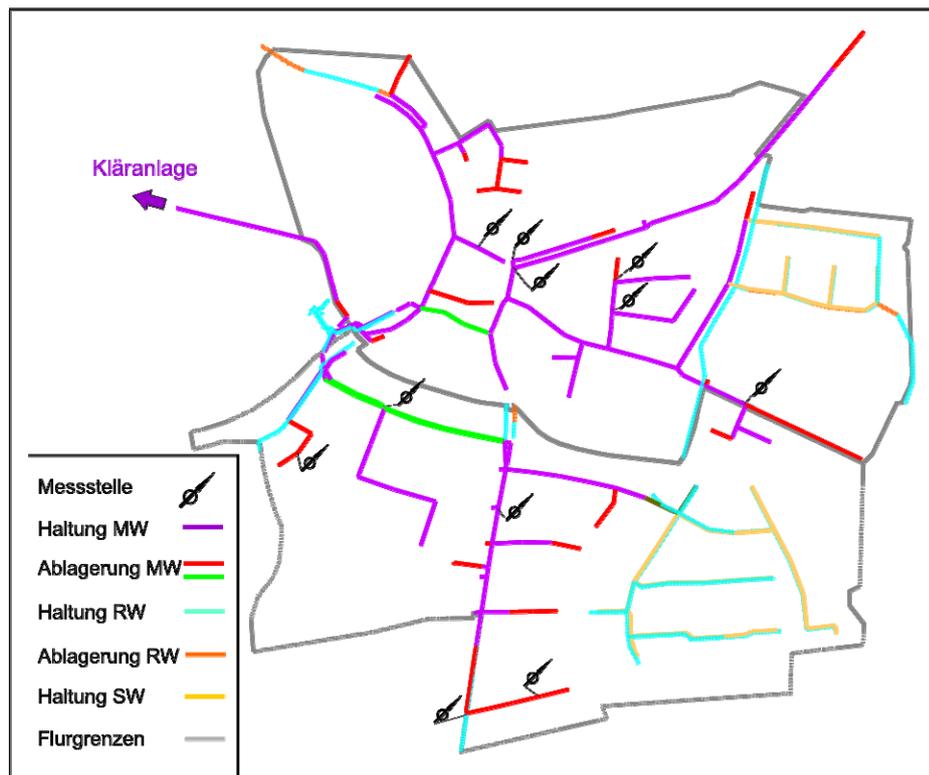


Bild 3.2: Lokalisierung von Ablagerungen und Positionierung temporärer Durchflussmessungen im Entwässerungssystem (rot: Ablagerungen durch Trockenwetterbedingungen; grün: Ablagerungen bei Regenwetter)

Die Ablagerungen im Mischsystem von Hoetmar sind durch zwei wesentliche Prozesse geprägt:

- Temporär bilden sich in den Anfangshaltungen, die durch eine starke Variation des Tagesgangs des Schmutzwasserabflusses beeinflusst werden, Ansammlungen von Hygieneartikeln und untergeordneten Mengen anorganischer Ablagerungen.
- In flachen Haltungen von Sammlern, die mit Sedimentfrachten von landwirtschaftlich genutzten Flächen oder Flächen mit Bautätigkeit befrachtet werden, lagern sich überwiegend mineralische Ablagerungen mit einem mittleren Trockensubstanzgehalt von 71 % ab.

Neben der Erfassung ablagerungsbehafteter Bereiche im Entwässerungssystem wurde mittels mobiler Durchflussmessungen an verschiedenen Schächten der Abfluss ermittelt. Die Daten können zur Kalibrierung des Kanalnetzmodells herangezogen werden und geben ergänzend Aufschluss über die hydraulischen Bedingungen, die zur Ablagerungsbildung führen. Bild 3.2 zeigt die Stellen, an denen diese temporären Durchflussmessungen erfolgten.

3.2 Ergebnisse

3.2.1 Methodik zur Auswertung eines Schmutzfrachtstoßes

Mit Hilfe der Auswertung der Frachtganglinien vor und nach dem Einbau von Schwallspüleinrichtungen soll die Effektivität einer quasi-kontinuierlichen Reinigungsstrategie aufgezeigt werden. Dazu wird zunächst die Frachtspitze, der Spülstoß identifiziert. BUTLER UND DAVIES (2004) folgend kann der Spülstoß qualitativ beurteilt werden, indem die kumulierte Fracht eines Abwasserteilstromes dem kumulierten Volumen gegenübergestellt wird. Je stärker der Spülstoß ausgeprägt ist, umso stärker weicht der Graph der Fracht von der Winkelhalbierenden durch den Ursprung ab. Die Winkelhalbierende stellt den theoretischen Frachtverlauf bei konstanter Konzentration dar, die so genannte mittlere Ereigniskonzentration (engl. event mean concentration).

Um das Ausmaß des Spülstoßes zu quantifizieren, wird nachstehende Vorgehensweise gewählt.

- Die Frachtsummenlinien und Volumensummenlinie werden ins Verhältnis zur Ereignisfracht bzw. zum Gesamtvolumen gesetzt.
- Die Differenz zwischen der so ermittelten relativen Frachtsummenlinien und der Winkelhalbierenden wird über das kumulierte Volumen aufsummiert. Zur einfacheren Berechnung werden die Summenlinien durch Polynome dritter Ordnung approximiert.
- Abschließend werden die so ermittelten Werte der Niederschlagsmenge und der Dauer der vorangegangenen Trockenwetterperiode gegenübergestellt. Der so erhaltene empirische Zusammenhang könnte im Verlauf einer möglichen 2. Phase den Werten mit quasi-kontinuierlicher Reinigung gegenübergestellt werden.

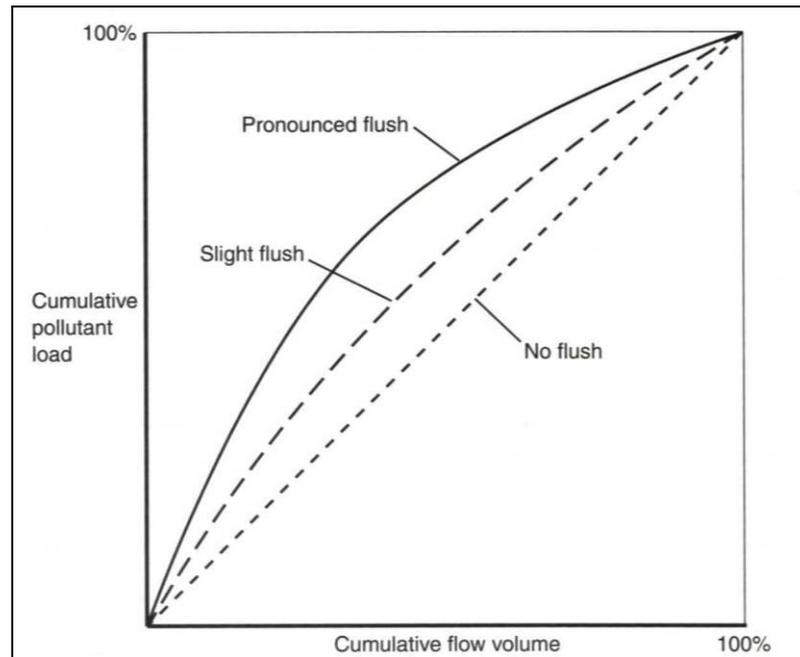


Bild 3.3: Visualisierung des Spülstoßes durch die Gegenüberstellung der kumulierten Fracht eines Abflusses und dessen kumulierten Abflussvolumens (BUTLER UND DAVIES, 2004)

3.2.2 Zulauf zum Regenbecken

Wenn die Frachtganglinien zeitlich höher aufgelöst werden und innerhalb eines Abflussereignisses aufsummiert werden, kann durch den Vergleich der Volumen- und der Frachtsummenlinie ein Hinweis auf mögliche Spülstöße und Gewässerbelastungen gewonnen werden. Die das Speichervolumen überschreitende Wassermenge wird über den Klärüberlauf in das Gewässer geleitet. Nach einem starken Anstieg zu Beginn des Speichervorganges verringern sich die zufließenden Frachten.

Im weiteren Verlauf der Untersuchungen werden mit der in Kapitel 3.2.1 dargestellten Methodik die Frachtganglinien den Volumenganglinien dimensionslos gegenübergestellt. Die dimensionslose Darstellung erlaubt es, Niederschlagsabflussereignisse unabhängig von der Niederschlagsmenge miteinander in Beziehung zu setzen.

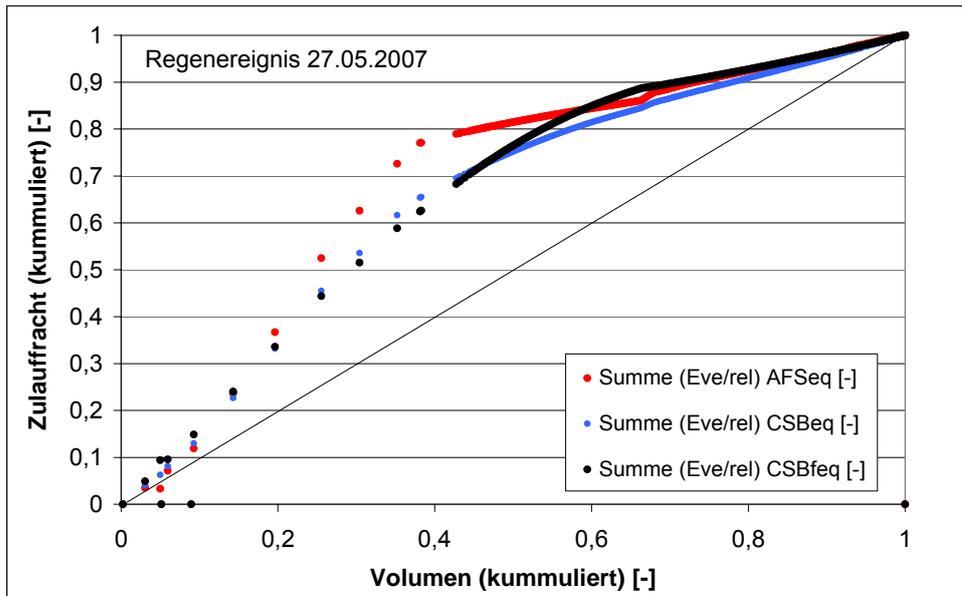


Bild 3.4: Dimensionslose Darstellung der kumulierten relativen Fracht in Bezug auf das kumulierte relative Abflussvolumen; Regenereignis vom 27.05.2007 am RÜB Hoetmar

Zur weiteren Auswertung wurde der Flächeninhalt zwischen den „Schmutzfrachtstoßgraphen“ und der Winkelhalbierenden ermittelt. Wenn die Berechnung einen negativen Wert ergab, der gleichbedeutend mit einem verdünnten Abflussvolumenstrom ist, wurde der Wert für den weiteren Verlauf zu Null gesetzt. Die berechneten Werte von allen Regenereignissen wurden über dem Produkt aus der vorhergehenden Trockenwetterperiode (TWP) in Tagen (d) und der Gesamtniederschlagsmenge des Regenereignisses (mm) aufgetragen, vgl. Bild 3.5.

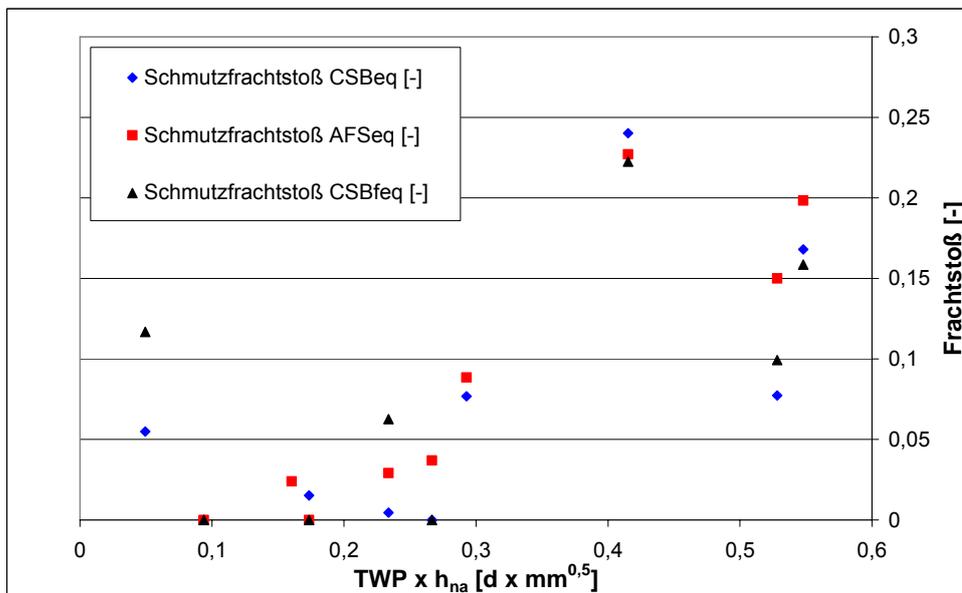


Bild 3.5: Zusammenhang zwischen Schmutzfrachtstößen (SFS) und dem Produkt aus Länge der voran gegangenen Trockenwetterperiode (TWP) und der Wurzel der Niederschlagssumme (h_{na})

Die Auswertung der Ereignisse zeigt grundsätzlich, dass längere Trockenwetterperioden und größere Niederschlagsmengen eine Zunahme des Effektes des Spülstoßes bewirken. Nach einer 24-tägigen Trockenwetterperiode ergibt sich trotz der langen Zeit, in der sich Ablagerungen bilden konnten, kein ausgeprägter Schmutzfrachtstoß (SFS), was wahrscheinlich auf zwei Effekte zurückzuführen ist: Zum einen reicht der Anstieg des Abflusses im Kanalnetz nicht aus, um alle Ablagerungen, die sich über die außergewöhnlich lange Trockenperiode angesammelt haben, zu remobilisieren, so dass kontinuierlich Ablagerungsmaterial vom Mischwasser aufgenommen wurde. Zum anderen führen diese Extremereignisse zu einem Rückstau im Entwässerungssystem und so zu einer Begrenzung des Transportvermögens der Kanalisation, da der Gesamtsystemabfluss auf die Summe aus den Fördermengen des Pumpwerkes und der Kläranlagenkapazität beschränkt wird. Diese Erklärung wird durch die Messung eines besonders starken SFS am Folgetag, insbesondere für AFS, untermauert. Das Folgeereignis am zweiten Tag nach der lang andauernden Trockenwetterperiode war demnach in der Lage, die Ablagerungen in der Kanalisation zu remobilisieren und somit einen starken SFS auszulösen.

Diese Auswertungen stehen im Gegensatz zu Untersuchungen aus Großbritannien (GUPTA UND SAUL, 1996), die keinen Zusammenhang zwischen vorangehender Dauer der Trockenwetterperiode und der Niederschlagsintensität bei der Auswertung von Schmutzfrachtstoßspitzenkonzentrationen ausmachen konnten. Dies ist wahrscheinlich auf die in der vorliegenden Untersuchung vorhandene höhere zeitliche Auflösung der Messwerte und die Tatsache zurückzuführen, dass Gupta und Saul nur Regenereignisse mit Dauerstufen über 1 h für Untersuchungen heranzogen. Aus Untersuchungen von ARTUHR UND ASHLEY (1998) sowie ARTHUR (1996), die eine empirische Gleichung für Transportkonzentrationen in einem Sammler bei Beginn eines Niederschlagabflussereignisses ermittelten, wird deutlich, dass ein Zusammenhang zwischen der Dauer des Regens und der Zeitspanne zwischen den Startzeiten von zwei konsekutiven Regenereignissen in sedimentbehafteten Systemen existiert.

3.2.3 Klär- und Beckenüberlauf

3.2.3.1 *Schmutzfrachtauswertung*

Das in den Wiener Bach entlastete Mischwasservolumen wird von den Volumenströmen des Klärüberlaufs dominiert. Der Beckenüberlauf wird nur bei extremen Ereignissen aktiviert, was zu einer fast vollständigen mechanischen Vorklärung der entlasteten Mischwassermengen führt. Über den Beckenüberlauf wurden 2007 (Stand 31.07.07) 70 m³ Mischwasser entlastet, was im Vergleich zu ca. 12.500 m³, die über den Klärüberlauf flossen, eine unbedeutende Menge darstellte. Die durchschnittliche Überlaufdauer von 4 h pro Ereignis ist in den Jahren 2003 und 2007. Das Jahr 2003 wird als Vergleichsjahr herangezogen, da die Anzahl der Entlastungsereignisse und der Gesamtüberlaufdauer ähnlich sind.

Während der Entlastungen wurden die Durchflüsse erfasst und sofern möglich mit Probenehmern 2h-Mischproben aus dem Abwasserstrom gewonnen. Bild 3.6 zeigt die Abflussganglinie

und Abflusssummenlinie des Entlastungsereignisses vom 15.05.2007. Bei dem Entlastungsereignis werden 850 m³ Mischwasser in das Gewässer entlastet, wovon ein Großteil der Mengen in den ersten 50 min des Ereignisses abfließt. Die der Auswerteroutine folgende grafische Darstellung der relativen Fracht- und Volumensummelinie des Regenereignisses vom 15.07.2007 findet sich exemplarisch in Bild 3.6. Es ist zu erkennen, dass die großen Messabstände zwar einen deutlichen Schmutzfrachtstoß vermuten lassen, der Kurvenverlauf sich zeitlich aber auch anders entwickeln könnte. Der sehr ähnliche Verlauf der Graphen von abfiltrierbaren Stoffen (AFS) und partikulärem chemischen Sauerstoffbedarf (CSB, filtr.) ist erwartungsgemäß.

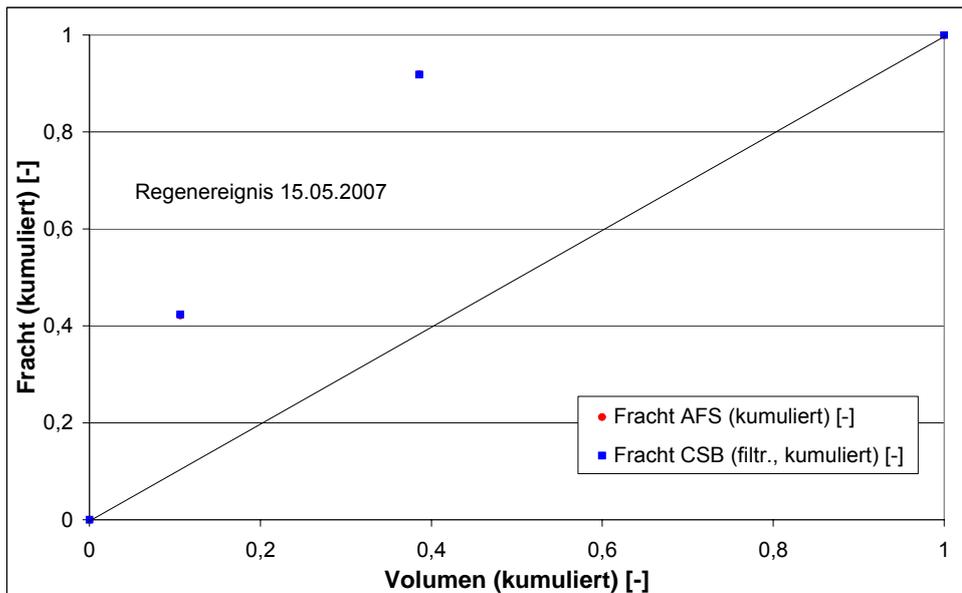


Bild 3.6: Dimensionslose Darstellung der kumulierten relativen Fracht in Bezug auf das kumulierte relative Entlastungsvolumen des Regenereignisses vom 15.05.2007

3.2.4 Einordnung der Gewässerbelastungen aus der Mischwasserentlastung

Mischwasserentlastungen spielen bei der Belastung der Gewässer sowohl aus stofflicher wie auch aus hydraulischer Sicht eine bedeutende Rolle bei der Bewertung der Gesamtemissionen. So sind beispielsweise die kontinuierlichen Emissionen aus Kläranlagen in NRW (MUNLV, 2007) für den Parameter TOC mit ca. 25.000 t/a nur zweieinhalb mal so hoch wie die von Mischwasserentlastungen stoßweise eingetragenen Frachten (ca. 10.600 t/a). Somit entstammen rd. 1/3 der TOC-Gesamtemissionen in die nordrhein-westfälischen Gewässer aus Mischwasserüberläufen.

Aus den erfassten Ereignissen sind in Bild 3.7 die Entlastungsfrachten von neun Ereignissen dargestellt. Die Frachten wurden aus den 2h-Mischproben und den über die entsprechenden Abflusszeiträume gemittelten Abflüssen berechnet. Die Darstellung verdeutlicht die große Bandbreite von Entlastungsfrachten aus Einzelereignissen. Beispielsweise wurde während des

Regenereignisses von 07.05.2007 (Ereignis 1), das eine gesamte Zulaufkraft zur Regenwasserbehandlungsanlage von 465 kg AFS und 175 kg CSB (filtr.) aufwies, aus der Regenentlastungsanlage 30,8 kg AFS (7 %) bzw. 36 kg CSB (filtr.) (20 %) emittiert. Vergleichsweise gering dazu sind die durchschnittlichen täglichen Emissionen aus der Kläranlage. Dort werden bei Trockenwetter im Mittel 1 kg AFS/d und 4,9 kg CSB/d in das Gewässer eingeleitet.

Aus den Auswertungen zum Verhältnis der Frachten von AFS zu CSB in Abhängigkeit zur Länge der vorangegangenen Trockenwetterperiode konnte kein statistisch signifikanter Zusammenhang hergestellt werden.

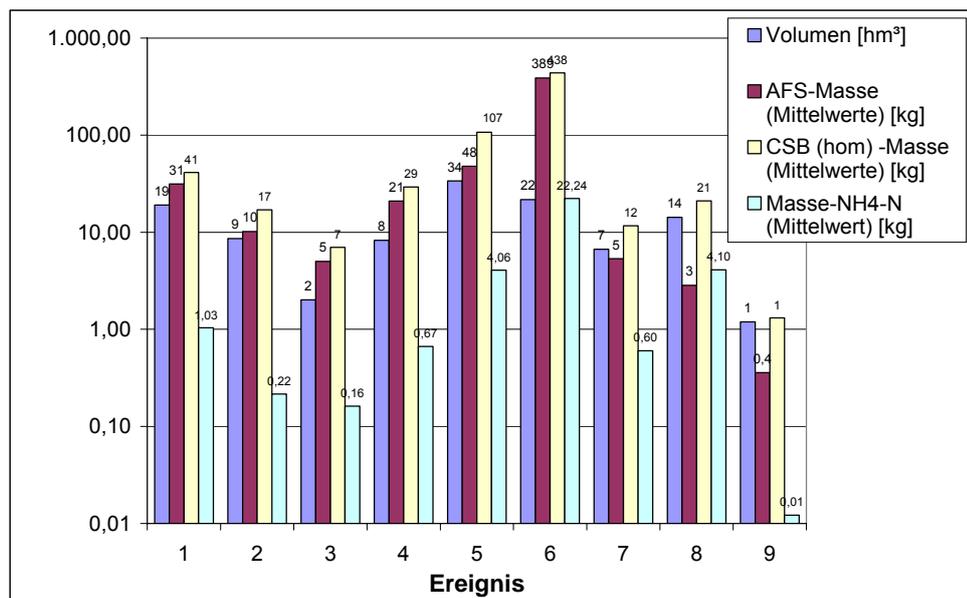


Bild 3.7: Entlastungsfrachten vom Klärüberlauf von neun Entlastungsereignissen vom Klärüberlauf Hoetmar

3.2.5 Zulauf Kläranlage

3.2.5.1 Randbedingungen

Die Abflussdynamik bei Regenwetter im Zulauf der Kläranlage wird durch die Drosselung und die Speicherwirkung des Regenbeckens bestimmt. Der Drosselabfluss ist nominell auf einen Durchfluss von 27 l/s begrenzt, der allerdings abhängig von den Druckverhältnissen kurzzeitig auch höher ausfällt.

3.2.5.2 Auswertung der Schmutzfrachtstöße

In Bild 3.8 sind die Ergebnisse der Schmutzfrachtstoßauswertung für verschiedene Trockenwetterperioden in Abhängigkeit der Niederschlagsmenge dargestellt. Werte für den Schmutzfrachtstoß die kleiner als null sind, ergeben sich aus einem Verdünnungsschwall, der bei Systemen mit keinen oder geringen Ablagerungsmengen auftritt. Es wird deutlich, dass mit zunehmender

Niederschlagsmenge der Spülstoß zunimmt. Dies steht im Zusammenhang mit erhöhten Abflüssen innerhalb der Kanalisation. Zudem wird deutlich, dass mit zunehmender Trockenwetterperiode die Mindest-Niederschlagsmenge abnimmt, damit ein Spülstoß auftritt. Aus der Gegenüberstellung der Spülstöße mit Trockenwetterperioden von weniger als zwei Tagen und mehr als zwei Tagen lässt sich erkennen, dass ab zwei Tagen und einer Niederschlagsmenge von mehr als 5 mm eine deutlicher Anstieg des Spülstoßverhaltens vorzufinden ist.

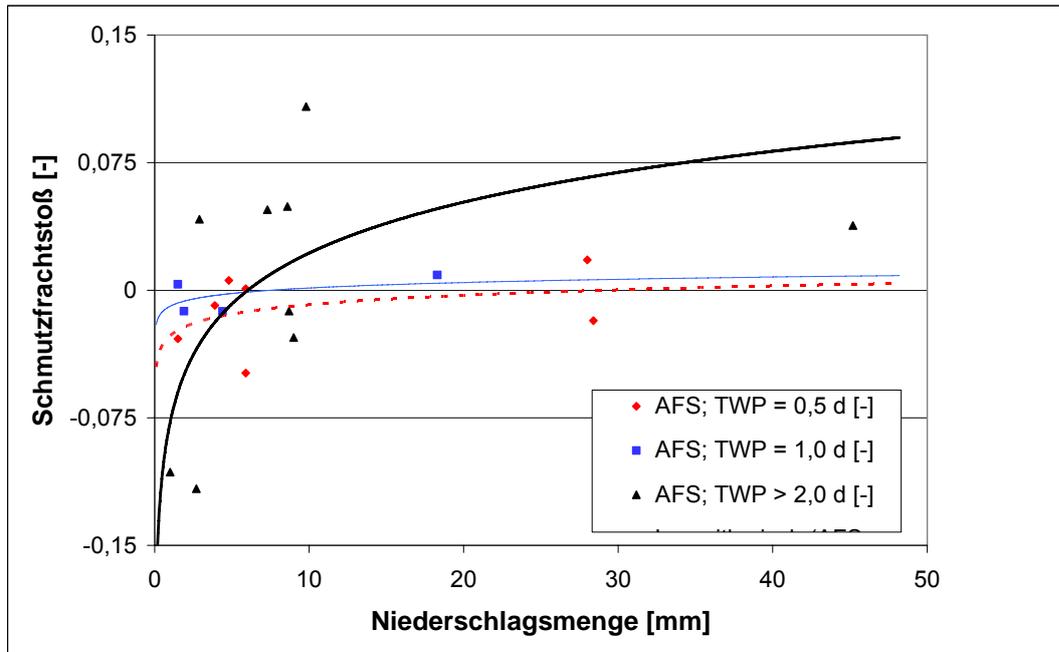


Bild 3.8: Auswertung der Zulauffrachtganglien bei Regenwetter

Die Grenztrockenwetterzeit, die zwischen einem und zwei Tagen einzuordnen ist, hängt mit der Wahrscheinlichkeit zusammen, dass sich innerhalb des Zeitraums ein Nachtminimum befindet, während dessen sich Ablagerungen verstärkt bilden. So ist auch die große Streuung der Ergebnisse in diesem Bereich zu erklären. Insgesamt fällt der Wert für den Schmutzfrachtstoß an der Kläranlage geringer aus, da sich die Speicherwirkung des Regenbeckens auf die zeitliche Verteilung der Schmutzfrachten auswirkt.

3.2.6 Ablauf Kläranlage

3.2.6.1 Untersuchungen unter Einfluss von Regen

Das System der Kläranlage wurde während zwei Intensivmessphasen untersucht. Die erste Intensivmessphase, die über 14 Tage im Mai 2007 durchgeführt wurde, schloss an eine Trockenwetterperiode von 24 Tagen an und enthielt mehrere starke Niederschlagsereignisse, zwischen denen verschieden lange Trockenwetterperioden lagen. Die Auswertung der Frachtganglinien an der Einleitungsstelle folgt der gleichen Systematik wie an den anderen Messpunkten

(vgl. Kapitel 3.2.1). Die zweite Intensivmessphase über einen Zeitraum von 12 Tagen wurde im Oktober 2007 durchgeführt.

Die Untersuchung der Dynamik des Kläranlagenablaufs im Hinblick auf die emittierten Frachten muss an die Verhältnisse auf der Kläranlage angepasst werden. Im Gegensatz zu den Entlastungsanlagen und dem Zulauf zur Kläranlage wird durch das Belebtschlammverfahren der Kläranlage eine Entkopplung der Transportprozesse für gelöste und partikuläre Stoffe erreicht. Daher wird neben der bereits bekannten Darstellung der dimensionslosen Schmutzfrachtstöße auch eine Clusteranalyse durchgeführt, die die Emissionen im Hinblick auf die zeitliche Veränderung des Durchflusses, also auf die Dynamik, am Kläranlagenablauf bezieht. Die Clusteranalyse ist ausführlich in der Langfassung beschrieben.

3.2.6.2 *Analyse der Schmutzfrachtstöße*

Der bereits vorgestellten Systematik folgend wurden die gewonnenen Zeitreihen aus den Intensivmessphasen ausgewertet. Im Hinblick auf die unterschiedlichen Parameter ergibt sich zunächst kein einheitliches Bild. Da die Auswertungen auf 2h-Mischproben basieren, können nur die lang andauernden Belastungsschwankungen erkannt werden. Wie exemplarisch aus Bild 3.9 ersichtlich ist, können folgende Beobachtungen zusammengefasst werden:

- Für AFS, $\text{NH}_4\text{-N}$ und $\text{NO}_3\text{-N}$ stellen sich sowohl Verdünnungskurven als auch Schmutzfrachtstöße ein.
- Beim homogenisierten CSB wird in allen Fällen ein Schmutzfrachtstoß beobachtet, der aber in der Größe stark variiert.
- Die größte Schwankungsbreite zwischen Verdünnung und Frachterhöhung tritt bei dem Parameter AFS gefolgt von $\text{NH}_4\text{-N}$ auf.

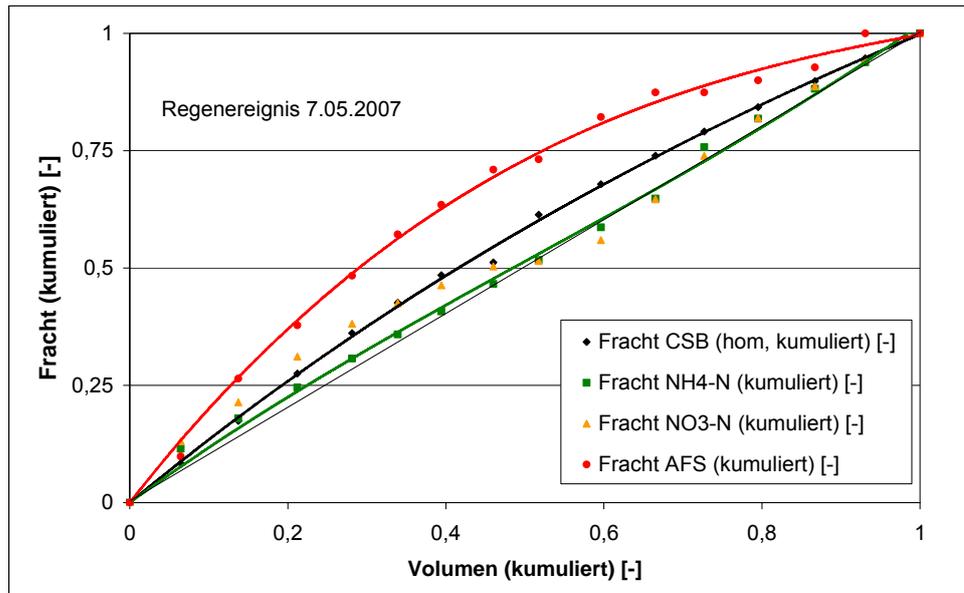


Bild 3.9: Kumulierte Fracht von AFS, $\text{NO}_3\text{-N}$, $\text{NH}_4\text{-N}$ und CSB (hom.) am Ablauf der Kläranlage Hoetmar im Nachgang eines Niederschlagsereignisses vom 07./08.05.2007 (Dauer der Trockenwetterperiode 24 d, Niederschlagshöhe 38 mm)

Die in Bild 3.9 dargestellten Messwerte resultieren aus einem Starkniederschlagsereignis (NAE 07.05.2007) im Anschluss an die bereits mehrfach genannte außergewöhnlich lange TWP im April 2007 mit einer Dauer von 24 d. Aufgrund der langen TWP und des starken Regens mit einer Regenhöhe von 38 mm ist davon auszugehen, dass durch Rückstauprozesse nicht alle Ablagerungen, die sich über den langen Zeitraum gebildet haben, remobilisiert wurden bzw. sich im rückstaubehafteten Teil des Entwässerungssystems wieder abgesetzt haben. Zu einer erneuten Remobilisierung der Ablagerungen ist es dann im nachfolgenden NAE gekommen, das sich nach einer Trockenwetterphase von 0,2 d anschloss.

Die Zusammenstellung der Schmutzfrachtauswertungen der Einzelereignisse ergibt die in Bild 3.10 dargestellten Wertetripel der Parameter CSB, AFS und $\text{NH}_4\text{-N}$. Abweichend von den Darstellungen der Messstellen am Regenüberlaufbecken sind hier die Wertetripel in Abhängigkeit der TWP aufgetragen, da durch die Begrenzung des Drosselablaufs zur Kläranlage ein direkter Zusammenhang mit der Niederschlagshöhe ausgeschlossen werden kann.

Mit Ausnahme des schon erwähnten Folgeereignisses an das Niederschlagsereignisses vom 07./08.05.2007 tritt wie schon an den anderen Messstellen ein ausgeprägter AFS-Schmutzfrachtstoß erst nach einer Mindestdauer der TWP von 1 d auf. Genauer ist die Grenze nicht zu bestimmen, da keine Werte für die Trockenwetterperioden zwischen 1 d und 10 d vorliegen.

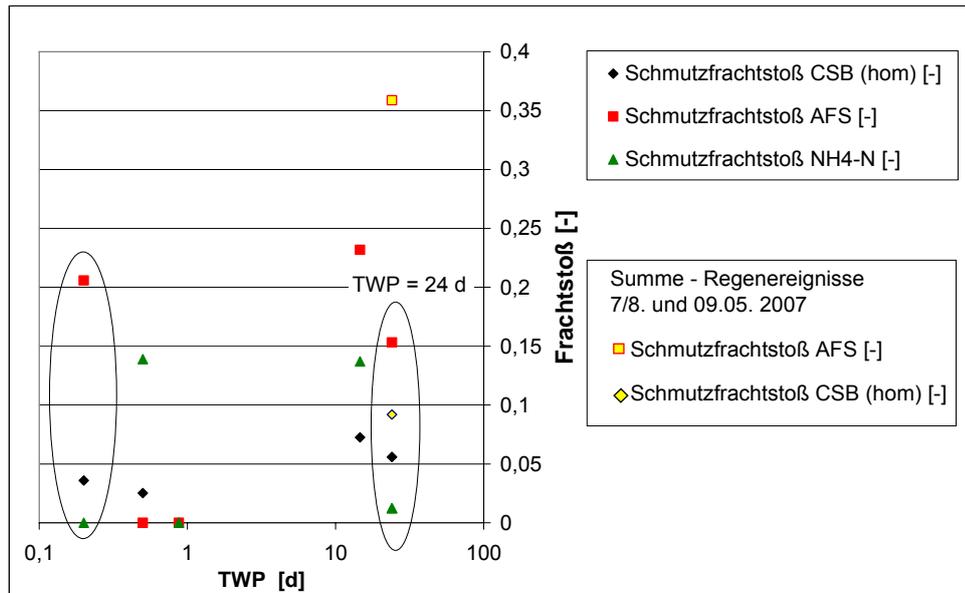


Bild 3.10: Auswertung der dimensionslosen Schmutzfrachtgraphen für den Kläranlagenablauf

Werden die Werte für den dimensionslosen Schmutzfrachtstoß von den beiden Niederschlagsereignissen vom 07/08.05.2007 und des Folgeereignisses (umrandete Ereignisse in Bild 3.10) addiert, ergibt sich das gelb markierte Wertepaar von AFS und CSB. Die Kombination der Werte passt sich so widerspruchsfrei in das Gesamtbild ein, dass der AFS-Schmutzfrachtstoß am Kläranlagenablauf mit zunehmender TWP zunimmt.

Für die Parameter CSB (hom) und $\text{NH}_4\text{-N}$ ergeben sich, auch wegen der geringen Anzahl von Werten, weniger klare Aussagen. Für Ammoniumstickstoff ist allerdings anzunehmen, dass kein Zusammenhang zwischen der Höhe des Schmutzfrachtstoßes und der Dauer der Trockenwetterperiode vorliegt. Der schwache Trend für den Parameter CSB (hom) ist zumindest teilweise darin begründet, dass es sich hier um eine Mischung aus gelösten und partikulären Stoffen handelt.

3.3 Schlussfolgerungen aus der Analyse der Schutzfrachtdynamik bei Regen

An Hand der Untersuchungen der Schmutzfrachtstöße sowie der Dynamik der Regenereignisse lassen sich folgende Schlüsse ziehen.

- Mit dem dimensionslosen Parameter Schmutzfrachtstoß, der die Verteilung der Schmutzfracht während eines Niederschlagsabflussereignisses beschreibt, kann die Intensität des Spülstoßes mit einem einzigen Parameter quantifiziert werden. Dadurch ist dieser Parameter auch geeignet, den Erfolg von Spülkonzepten zu überprüfen.
- Die Auswertung der Messstellen Zulauf Regenbecken, Ablauf Klärüberlauf, Zulauf und Ablauf der Kläranlagen ergibt an allen Stellen Schmutzfrachtstöße. Allerdings unterscheidet

sich die Höhe des Spülstoßparameters an den einzelnen Messstellen. Im Zulauf zum Regenbecken ist er am größten, während er im Ablauf der Kläranlage am geringsten ist.

- Nach einer Grenztrockenwetterzeit, die zwischen einem und zwei Tagen liegt, steigt der Spülstoß stark an.
- Die Clusteranalyse der Werte aus den 2h-Mischproben des Kläranlagenablaufs zeigt, dass für den Parameter AFS bei hohen Durchflussschwankungen auch hohe Frachten emittiert werden. Für die Parameter, die auch gelöste Stoffe beinhalten, ist nur bei starker Abnahme eine erhöhte Fracht zu beobachten. Dies wird auf den Ablauf des Regenbeckens im Nachgang an ein Regenereignis zurückgeführt.

4 Numerische Untersuchungen

4.1 Schmutzfrachtmodellierung

4.1.1 Ergebnisse der Kontinuumssimulation mit Moment

Zunächst wurden die Verlustbeiwerte des Berechnungsmodells mit Hilfe der Messdaten vom Regenereignis des 27.05.2007 kalibriert. Einem berechneten Entlastungsvolumen von 158 m³ steht ein gemessener Wert von 163 m³ gegenüber. Anschließend wurde die gesamte Regenreihe genutzt, die während des Messzeitraumes von Mai bis Oktober 2007 gewonnen wurde, um die Entlastungsfrachten zu bestimmen.

Die Berechnungsergebnisse lassen sich mit den globalen Kenngrößen wie folgt zusammenfassen. Die Schmutzfracht, die zur Entlastung kommt wird zu 2.067 kgCSB bzw. 2.529 kgAFS bestimmt. Durchschnittlich wird eine spezifische Entlastungsfracht von 144 kgCSB/(ha undurchlässiger Fläche) emittiert. Insgesamt werden den Berechnungen folgend 17.472 m³ Mischwasser mit einer mittleren Entlastungskonzentration von 118 mgCSB/l entlastet. Die maximale Entlastungskonzentration ist 142 mgCSB/l.

Bei der Analyse der Berechnungsergebnisse wurde deutlich, dass systematisch durch das verwendete Schmutzfrachtmodell Moment ein Berechnungsfehler verursacht wird, wenn Regenereignisse von langer Dauer sind oder zwei Regenereignisse aufeinander folgen, ohne dass das Speichervolumen des Beckens vollständig entleert wird. Der Berechnungsfehler entsteht durch den Ansatz, dass der maximale Abfluss zur Kläranlage auf 30 l/s begrenzt ist. Die Grenze, die im numerischen Modell strikt eingehalten wird, wird in Wirklichkeit über eine Drosselstrecke realisiert, dessen Kapazität von den Druckverhältnissen abhängt. So werden in Realität größere Abflüsse in Richtung Kläranlage geleitet, die zu einem geringeren Entlastungsvolumen führen, da sich das Speichervolumen schneller wieder herstellt. Dieses Problem könnte durch die Einführung einer Steuerung gelöst werden, die aber in der vorliegenden Momentversion nicht verfügbar ist.

Da für einen Vergleich des Erfolges von Reinigungsstrategien mit Schwallspüleinrichtungen besonders die Ereignisse von Interesse sind, die eine vorangegangene Trockenwetterperiode von mehr als einem Tag aufweisen, ist davon auszugehen, dass das Speichervolumen des Beckens vollständig zur Verfügung steht.

4.1.2 Schlussfolgerungen zur Schmutzfrachtberechnung

Aus den Untersuchungen mit dem numerischen Schmutzfrachtmodell können folgende Schlussfolgerungen gezogen werden.

- Die Schmutzfrachtberechnung mit Moment ist geeignet, die Auswirkungen eines Spülstoßes auf die Regenwasserbehandlungsanlagen darzustellen. Dazu können die Regenwasserkonzentrationen verschiedener Ereignisse analysiert werden.
- Als Referenzereignisse für die Gegenüberstellung des Ist-Zustandes und nach Umsetzung einer netzweiten Schwallspülung sollten keine extremen Intensitäten oder sehr langen Regendauern verwendet werden, ohne eine Steuerung in das System aufzunehmen. Die Berechnungsergebnisse aus der hydrologischen Schmutzfrachtberechnung sind bei Extremen mit größeren Fehlern behaftet. Beispiel hierfür könnte der Ansatz aus dem anglikanischen Sprachraum oder Belgien sein, bei dem Bemessungsregen verwendet werden.

4.2 Dynamische Kläranlagensimulation

4.2.1 Ergebnisse der Kalibrierung

Die Anlage wurde mit den Messwerten der ersten Intensivmessphase im Mai 2007 kalibriert. Bei der Kalibrierung wurden die kinetischen und stöchiometrischen Parameter des ASM3 zur Kalibrierung der biologischen Reinigungsprozesse verwendet. Zusätzlich wurden die Sedimentationseigenschaften der Nachklärung zur Kalibrierung herangezogen. Auf eine Kalibrierung der biologischen Vorgänge im Tropfkörper wurde verzichtet, da der entscheidende Anteil der Reinigungsleistung im Belebungsbecken stattfindet. Lediglich die Reduzierung des Ammoniums durch den Tropfkörper wurde nachgebildet, da sie nicht zu vernachlässigen war.

In einem ersten Schritt wurden die abfiltrierbaren Stoffe im Ablauf über die Sedimentationseigenschaften der Nachklärung eingestellt. Ein Vergleich von Messwerten und Simulationsergebnissen der abfiltrierbaren Stoffe ist in Bild 4.1 zu erkennen.

Die fehlenden Messwerte im Graphen resultierten aus dem Ausfall des Messschanks M4. Die Anpassung der beiden Kurven wurde über eine Absenkung des anorganischen Anteils der abfiltrierbaren Stoffe im Zulauf von 40 % auf 20% und über die Erhöhung der maximalen Sinkgeschwindigkeit erreicht.

Die Ablaufwerte für CSB wurden mittels des Anteils der gelösten, biologischen inerten Stoffe (SI) am gesamten CSB kalibriert. Der Anteil wurde auf 2 % des gesamten CSB abgesenkt. Das Ergebnis der Kalibrierung ist in Bild 4.2 zu sehen.

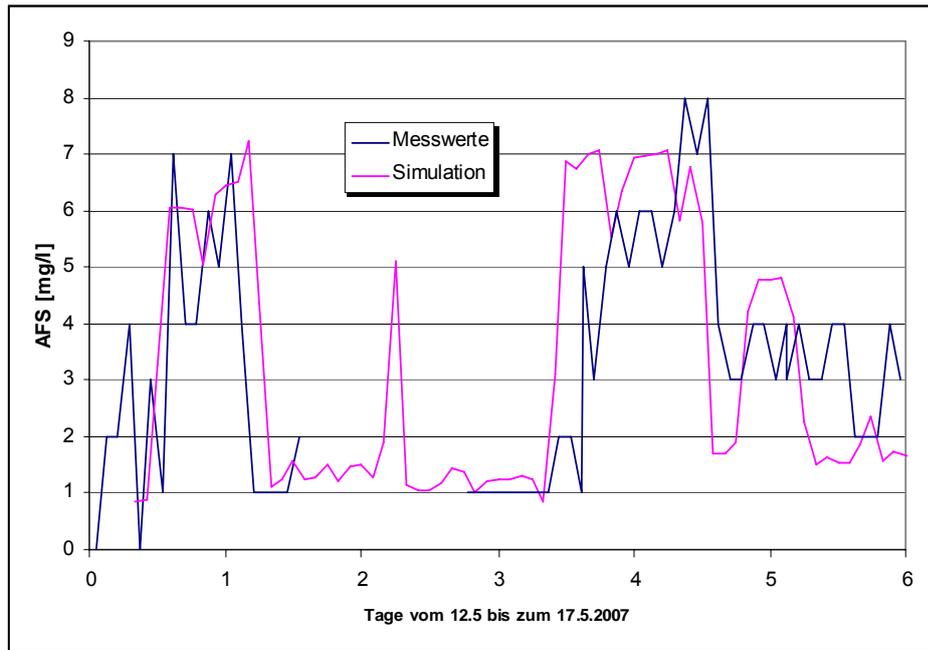


Bild 4.1 Vergleich von gemessenen und simulierten Werten für die abfiltrierbaren Stoffe (AFS) im Ablauf der Kläranlage Hoetmar vom 12.05. bis zum 17.05.2007

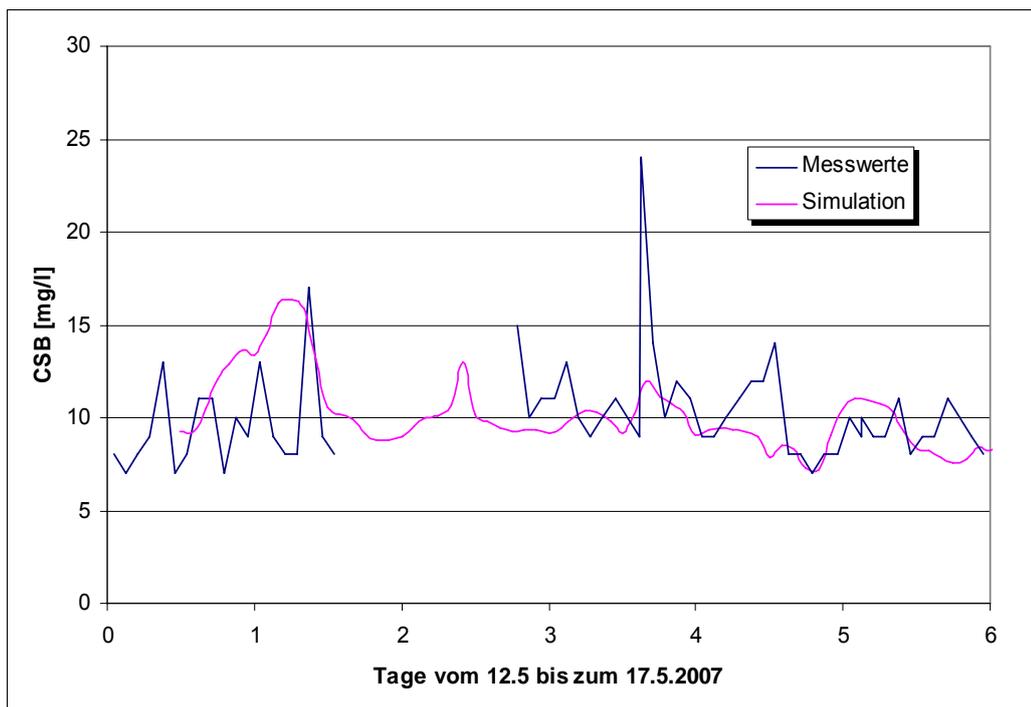


Bild 4.2 : Vergleich von gemessenen und simulierten Werten für den chemischen Sauerstoffbedarf (CSB) im Ablauf der Kläranlage Hoetmar

5 Quasi-kontinuierliche Reinigungsstrategie

5.1 Entwicklung der Reinigungsstrategie

Auf Basis der Felduntersuchungen wurde ein flächendeckendes Spülkonzept entwickelt, das eine zeitnahe Remobilisierung von Ablagerungen ermöglicht. Dabei wird das Ziel verfolgt, die Menge von Ablagerungen im Mischwassernetz zu verringern, die sich während Trockenwetterzeiten oder während des abklingenden Asts von Niederschlagsabflussereignissen bilden. Durch eine gezielte temporäre Abflusserhöhung in ablagerungskritischen Bereichen sollen Sedimente stromabwärts in Netzbereiche transportiert werden, die eine ausreichende Stofftransportkapazität aufweisen. Dadurch wird die durch ein NAE remobilisierbare Stoffmenge vermindert, die ansonsten aus der Gesamtmenge der während der Trockenwetterperiode gebildeten Stoffe bestünde.

In den ablagerungskritischen Bereichen, die häufig in den Anfangshaltungen zu finden sind, sind Schwallspüleinrichtungen, die den Trockenwetterabfluss zwischenspeichern, nicht geeignet, da der Trockenwetterabfluss nicht ausreicht, um die notwendige Spülwassermenge zu erzeugen, bevor Faulungsprozesse im Schmutzwasser einsetzen. Daher soll Regenwasser in Schachtspülanlagen zwischengespeichert werden. Mit dem Einsatz und der Zwischenspeicherung von Regenwasser sind nachfolgende Vorteile verbunden:

- Regenwasser weist eine geringere Verschmutzung mit organischen Stoffverbindungen auf, so dass Faulungsprozesse von untergeordneter Bedeutung sind.
- Durch die Speicherung und die verzögerte Abgabe des Regenwassers wird zusätzliches, dezentrales Speichervolumen zur Mischwasserbehandlung zur Verfügung gestellt.

Haltungen, Sammler und Transportsammler mit größeren Querschnitten werden zwar kontinuierlich mit einem höheren Trockenwetterabfluss beaufschlagt, dessen Geschiebetransport wird allerdings bei NAE durch Rückstau beeinträchtigt. Daher ist in diesen Systemabschnitten mit größerem mineralischem Material nach NAE zu rechnen, das dort während der folgenden Trockenwetterzeiten zu umfangreicheren Ablagerungen in diesen Bereichen führt. Solche Sammler sollten daher mit Schwallwellen gereinigt werden, die auch gröberes Material aus den ablagerungskritischen Bereichen transportieren können. Dies kann entweder mit wenigen großen Wellen, sogenannten Geschiebewellen erreicht werden, oder mit einer Vielzahl kleinerer Wellen, die während der Trockenwetterzeiten erzeugt werden. Sofern die Rückstauebene der oberhalb gelegenen Haltungen es zulässt, könnten Kanalvolumen-aktivierende-Schwallspüleinrichtungen (KAS) zum Einsatz kommen. Alternativ ist auch der Einsatz von Kammerklappenanlagen mit externen Speichervolumen möglich.

Zusammenfassend lassen sich die Prämissen des dargestellten Spülkonzeptes wie folgt formulieren:

- Anfangshaltungen, die eine Mindestlänge von 25 m überschreiten, und Ablagerungen, die auf den intermittierenden Trockenwetterabfluss zurückzuführen sind, werden mit Schachtspüleinrichtungen ausgestattet (In Bild 5.1 sind diese Haltungen rot markiert).
- In Bereichen mit größeren Querschnitten, in denen Ablagerungen aufgrund von Rückstau und Verfrachtungen bei Niederschlagsabflussereignissen oder im Zuge langer Trockenwetterperioden entstehen, sind bei Trockenwetter arbeitende Spülsysteme oder gleichwertige Anlagen vorzuziehen. In Bild 5.1 sind diese Haltungen grün markiert.

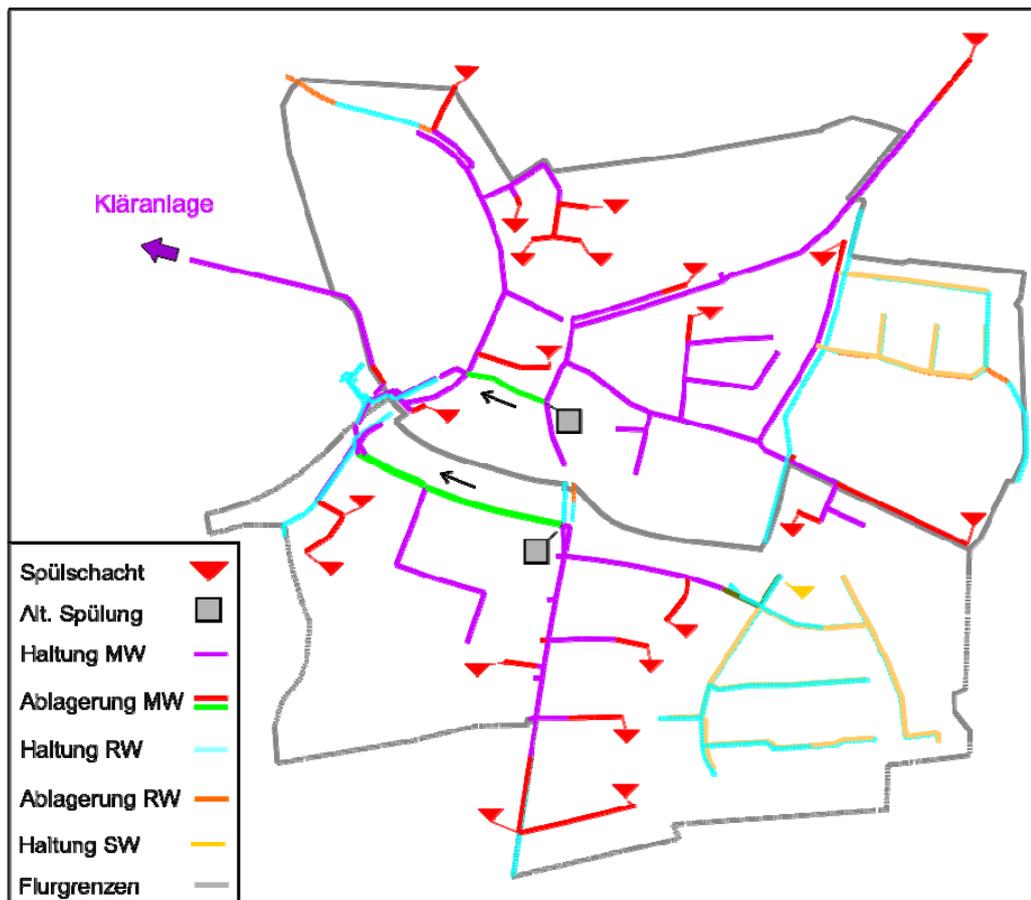


Bild 5.1: Darstellung der ablagerungskritischen Bereiche im Entwässerungssystem von Hoetmar sowie die Positionierung von Spülschächten in Anfangshaltungen

5.2 Vergleichende Wirtschaftlichkeitsbetrachtung

5.2.1 Ansatz und Zielgleichung

Bei der nachfolgenden Wirtschaftlichkeitsbetrachtung werden die Kosten für eine netzweite Schwallspülung den Kosten der HD-Reinigung gegenübergestellt. Dabei ist zu beachten, dass mit der flächendeckenden quasi-kontinuierlichen Reinigung eine Verbesserung der Emissionssituation einhergeht. Im Rahmen dieser vorläufigen Wirtschaftlichkeitsbetrachtung wird das Maß ermittelt, um das die Emissionen verringert werden müssen, damit die Investitionen in Reinigungseinrichtungen genauso wirtschaftlich sind wie die HD-Reinigung, ohne die HD-Reinigung auf das gleiche Reinigungsmaß anzuhaben. Dabei wird der Berechnungsansatz der Abwasserabgabe mit Schadeinheiten und die Kostenvergleichsrechnung über einen Betrachtungszeitraum von 20 a nach LAWA (2005) verwendet. Der Zinssatz i wird zu 3 % angenommen. Genauso wird von einer durchschnittlichen Preissteigerung von 3 % ausgegangen. Aus LAWA (2005) folgt dann:

$$\Delta JK = [IK_{SSE} \cdot KFAKR(i, n) - LK_{HDR}] \quad (6.1)$$

mit:

ΔJK	EUR	Unterschied in den Jahreskosten
IK_{SSE}	EUR	Investitionskosten Schwallspüleinrichtung
LK_{HDR}	EUR	Laufende Kosten der HD-Reinigung
$KFAKR(i, n)$	[-]	Diskontierungsfaktor für einmalige Zahlungen
$DFAKRP(r; i; n)$	[-]	Diskontierungsfaktor für eine Zahlungsreihe, mit progressiver Steigerungsrate
i	[-]	Zinssatz (absolut)
r	[-]	Preissteigerung (absolut)
n	[a]	Betrachtungszeitraum

Des Weiteren werden folgende Annahmen zu Grunde gelegt:

- Die HD-Reinigung wird jährlich durchgeführt.
- Die Funktionskontrollen der Schwallspüleinrichtungen können im Rahmen der Inspektionen zur Erfüllung der SÜwV Kan erbracht werden.

Die Differenz in den Jahreskosten kann dann mit der möglichen Verbesserung der Emissionssituation verglichen werden. Dazu werden die Vorgaben aus dem Gesetz über *Abgaben für das Einleiten von Abwasser in Gewässer* (ABWAG, 1994) herangezogen.

5.2.2 Kosten der HD-Reinigung

Zur Erfüllung der Selbstüberwachungsverordnung Kanal (SüwV Kan) wurde das Kanalnetz vollständig inspiziert. Die Jahreskosten ergeben sich für die Größenverteilung der Rohrdurchmesser des Hoetmarer Kanalnetzes zu ca. 3.000 €. Daraus ergibt sich dann ein durchschnittlicher Preis von 0,31 € pro lfm.

5.2.3 Kosten zur Umsetzung des Schwallspülkonzeptes

Die Kostenstruktur von Schwallspüleinrichtungen spiegelt die hohen Investitionen in Gerätetechnik wider. Somit bestehen die Jahreskosten vorwiegend aus den Kapitalwiedergewinnungskosten. Die Berechnung der Jahreskosten des vorgestellten Schwallspülkonzeptes basiert auf den spez. Kostenansätzen aus DOHMANN UND DETTMAR (2002). Aus den Kostenansätzen und dem Gerätebedarf des Schwallspülkonzeptes ergeben sich die in Tabelle 5.1 dargestellten Investitionskosten.

Tabelle 5.1: Auflistung der Geräte für zwei Varianten des Schwallspülkonzeptes

	Anzahl [Stück]	Einheitspreis [€]	Kosten [€]
Spülschächte (ohne Fremdenergie)	35	3.000,00	105.000,00
Installation (Spülschächte)	35	2.000,00	70.000,00
Kammerklappenanlage	2	35.000	70.000
Summe			245.000
<i>Variante 1</i>			<i>245.000</i>
<i>Variante 2</i>			<i>175.000</i>

Aus dem vorgestellten Gerätebedarf lassen sich zwei Varianten ableiten. Die erste Variante schließt den Bau von Kammerklappenanlagen ein, während die zweite Variante auf diesen Anteil verzichtet, da es sich in den Bereichen um überwiegend mineralische Ablagerungen handelt, von denen ein geringeres Emissionspotential ausgeht. Mit den in Kapitel 5.2.1 aufgeführten Annahmen und den finanzmathematischen Berechnungen nach LAWA (2005) ergeben sich die Jahreskosten für Variante 1 zu ca. 16.500 € und zu 11.800 € für Variante 2.

Unter Berücksichtigung der Kosten für die Hochdruckreinigung ergibt sich eine Differenz der Jahreskosten von 13.500 € für Variante 1, bzw. 8.500 € für Variante 2.

5.2.4 Schlussfolgerungen der vergleichenden Wirtschaftlichkeitsbetrachtungen

Die ermittelten Jahreskosten für die Implementierung einer quasi-kontinuierlichen Schwallspülung werden nun einer möglichen Reduzierung der Abwasserabgabe gegenübergestellt, die sich durch die Reduzierung der Belastung an der Kläranlage ergibt. Dabei wird die Möglichkeit, Ausgaben zur Verbesserung der Gewässergüte durch den Einsatz neuer Technologien mit der Abwasserabgabe vergangener Jahre zu verrechnen, wenn Emissionen um mehr als 20 % reduziert werden, nicht berücksichtigt.

Wird die zu leistende Abgabe pro Schadeinheit auf 35,79 EUR (AbWAG, 1994) angesetzt, wird bei einer Differenz in den Jahreskosten von 13.500 EUR bzw. 8.800 EUR eine Reduzierung der Emissionen von 380 SE bzw. 250 SE notwendig. Bezogen auf den chemischen Sauerstoffbedarf wäre eine Reduktion der Emissionen von 19.000 kgCSB/a bzw. 12.500 kgCSB/a erforderlich, vgl. auch Tabelle 5.2. Da die Emissionen aus Regenentlastungsanlagen pauschal berücksichtigt werden, können Erfolge, durch die Kanalreinigung auf die Emissionssituation aus Regenentlastungsanlagen noch nicht berücksichtigt werden. So wurden in 2006 ca. 201.000 m³ Abwasser in der Kläranlage behandelt, von denen 125.800 m³ Schmutz- und Fremdwasser waren. Die Differenz, das Regenwasser, ist demnach 75.200 m³ mit einer überschläglichen Fracht von 1.350 kg CSB/a. Aus der Gegenüberstellung der realisierbaren Emissionsfrachtreduktion bei Regenwetter und der notwendigen Frachtreduzierung an der Kläranlage, um die Kosten über Einsparungen bei der Abwasserabgabe zu refinanzieren, wird deutlich, dass das Reduktionspotential der Kläranlagenemissionen aus Regenwasser nicht ausreicht, die Investitionen gegen zu finanzieren.

Tabelle 5.2: Gegenüberstellung des Ergebnisses der vergleichenden Wirtschaftlichkeitsbetrachtung der Schwallspülkonzeptvarianten am Beispiel Hoetmar

		Variante 1	Variante 2
Jahreskosten	[€]	13.500	8.800
Schadeinheiten	[SE]	380	250
Zu reduzierende Schmutzfracht	[kgCSB/a]	19.000	12.500
Emissionen an der Kläranlage aus Regenwasser	[kgCSB/a]	1.350	

Eine dynamische Frachtbetrachtung zur integralen Bestimmung der Reduktion der Gewässerbelastung, die für die zweite Phase vorgesehen war, könnte das Reduktionspotential weiter erhöhen. Eine Verzehnfachung ist aber unwahrscheinlich.

6 Zusammenfassung

Im Rahmen dieses Vorhabens sollte der mögliche Erfolg einer quasi-kontinuierlichen Reinigungsstrategie in einem Mischwasserkanalnetz im Hinblick auf die Verbesserung der Emissionssituation eines kleinen Entwässerungssystems mit Hilfe großtechnischer und numerischer Untersuchungen gezeigt werden. Untersuchungsgegenstand war das Entwässerungssystem des Ortsteils Hoetmar der Stadt Warendorf, das sich als Untersuchungsgebiet anbietet, da es im flachen Münsterland liegt und nur eine Regenentlastungsanlage aufweist. Das Untersuchungsprogramm wurde in zwei Phasen unterteilt. Die erste, hier vorgestellte Phase beinhaltete die Bestandsaufnahme und die Aufnahme der Emissionssituation des derzeitigen Zustands im Betrachtungsgebiet. Zum Einsatz kamen neben Durchflussmessgeräten und automatischen Probenehmern auch Online-Sonden, die eine zeitlich hoch aufgelöste Erfassung von Schmutzkonzentrationen im Abwasser ermöglichten. Des Weiteren wurde innerhalb der ersten Phase eine quasi kontinuierliche Reinigungsstrategie entwickelt, die in der Folge auf ihre Wirtschaftlichkeit hin untersucht wurde. Parallel dazu wurden ein numerisches Schmutzfrachtmodell und ein dynamisches Kläranlagenmodell aufgestellt. Die Umsetzung der erarbeiteten quasi kontinuierlichen Reinigungsstrategie war einer zweiten, später durchzuführenden Phase vorbehalten. Danach sollten mit Hilfe der entwickelten Modelle die Messergebnisse der ersten Phase weiter verdichtet werden.

Zusammenfassend lassen sich die Ergebnisse der ersten Phase wie folgt darstellen.

- Die Ablagerungssituation des Hoetmarer Mischwassernetzes ist durch stark schwankende Trockenwetterabflüsse geprägt. Dadurch ergeben sich ablagerungskritische Bereiche vorwiegend in den Anfangssträngen des Mischwassernetzes. Die Ablagerungen bestehen weitestgehend aus Hygieneartikeln und groben organischen Sedimenten.
- Durch die dimensionslose Darstellung der Schmutzfrachtganglinien eines Regenereignisses, die in Abhängigkeit der Länge der vorausgegangenen Trockenwetterperiode und der Niederschlagsmenge dargestellt werden können, ergibt sich eine übertragbare Vorgehensweise, den Erfolg einer Reinigungsstrategie zu quantifizieren.
- Aus der Auswertung der Schmutzfrachtdynamik wurde deutlich, dass sich Spülstöße nach einem bis zwei Tagen Trockenwetterabfluss auszuprägen beginnen. Bei sehr langen Trockenwetterperioden ist das Auftreten von Schmutzfrachtverlagerungen beobachtet worden.
- Durch den Einsatz von Online-Sonden ist ein Monitoring der Schmutzfrachtverläufe möglich. Sofern die Messeinrichtungen ordnungsgemäß gewartet und die Messinstrumente regelmäßig kalibriert werden, ist auch eine quantitative Nutzung der Messergebnisse möglich. Der selektive Ausschnitt des Messfensters verursacht zwar eine große Unsicherheit in der Messung, die allerdings auch bei herkömmlichen Messsystemen in derselben Größenordnung

auftritt. Die Zuverlässigkeit und die Möglichkeit, durch die Gewinnung von Zeitreihen auch nachträglich die Güte der Messung zu beurteilen, sind Vorteile dieses Messprinzips

- Aus der Wirtschaftlichkeitsbetrachtung lässt sich ableiten, dass eine netzweite quasi-kontinuierlichen Reinigungsstrategie nur dann wirtschaftlich umsetzbar ist, wenn das durch Schwallspüleinrichtungen in der Kanalisation aktivierte Speichervolumen als Mischwasserbehandlungsvolumen an anderer Stelle eingespart werden kann oder eine Immissionsbetrachtung zusätzliche frachtreduzierende Maßnahmen erfordert.
- Unter derzeitig geltenden rechtlichen Rahmenbedingungen hängt die wirtschaftliche Umsetzung einer netzweiten Schwallspülstrategie in Mischwassernetzen von der Nutzung des aktivierbaren Speichervolumens zur Mischwasserbehandlung ab.

7 Literatur

- ABWAG (1994). Gesetz über Abgaben für das Einleiten von Abwasser in Gewässer (Abwasserabgabengesetz - AbwAG), In der Fassung der Bekanntmachung vom 3.11.1994, BGBl. III/FNA 753-9, In: Umweltrecht, 15. Auflage, Beck-Texte, Deutscher Taschenbuchverlag, München
- ARTHUR, S. (1996). Near bed solids transport in combined sewers, PhD-Thesis, University of Abertay Dundee, GB
- ARTHUR, S., ASHLEY, R. M. (1998). The influence of near bed solids transport on first foul flush in combined sewers, *Wat. Sci. Tech.*, 37(1), S.131-138
- BÜCKER (2007), Betriebsanweisung der Kläranlage Hoetmar im Auftrag der Entsorgungsbetriebe der Stadt Warendorf, unveröffentlicht
- BUTLER, D., DAVIS, J. W. (2004). *Urban Drainage*, Spoon Press, 2. Auflage, London
- DOHMANN, M., DETTMAR, J. (2002). Untersuchungen zur Optimierten Kanalreinigung im Hinblick auf eine Minimierung biogener Schwefelsäurekorrosion und eine Verhinderung von Schmutzfrachtstößen bei der Abwasserbehandlung und Mischwasserentlastung, Abschlussbericht des Forschungs- und Entwicklungsvorhabens im Auftrag des Ministeriums für Umwelt und Naturschutz, Landwirtschaft und Verbraucherschutz des Landes Nordrhein-Westfalen, Institut für Siedlungswasserwirtschaft, RWTH Aachen, Aachen
- GUPTA, K., SAUL, A. (1996), Specific relationships for the first flush load in combined sewer flows, *Wat. Res.* 30(5), S. 1244-1252
- LAWA (2005). Leitlinien zur Durchführung dynamischer Kostenvergleichsrechnungen (KVR-Leitlinien), Länder Arbeitsgemeinschaft Wasser (Hrsg.), Kulturbuchverlag Berlin GmbH, Berlin
- MUNLV (2007). Entwicklung und Stand der Abwasserreinigung in Nordrhein-Westfalen, Ministerium für Umwelt und Naturschutz, Landwirtschaft und Verbraucherschutz des Landes Nordrhein-Westfalen (Hrsg), Kurzfassung, 13. Auflage, Düsseldorf
- N.N. (1992). Richtlinien für die Bemessung und Gestaltung von Regenentlastungsanlagen in Mischwasserkanälen, DWA Arbeitsblatt A 128, Vertrieb: Gesellschaft zur Förderung der Abwassertechnik e.V. (GFA), St. Augustin
- N.N. (1994). Gesetz über Abgaben für das Einleiten von Abwasser in Gewässer (Abwasserabgabengesetz - AbwAG), Fassung vom 3. November 1994, BGBl. I S. 3370, BGBl. I, S. 2331
- N.N. (1995). Selbstüberwachungsverordnung Kanal, Verordnung zur Selbstüberwachung von Kanalisationen und Einleitungen von Abwasser aus Kanalisationen im Mischsystem und im Trennsystem (SüwV Kan), Nordrhein Westfalen
- N.N. (2000). Arbeitsblatt ATV-DVWK-A 131, Bemessung von einstufigen Belebungsanlagen, Vertrieb: Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall e.V. (Hrsg.), Hennef
- N.N. (2006a). Arbeitsblatt DWA-A110 - Hydraulische Dimensionierung und Leistungsnachweis von Abwasserleitungen und -kanälen, Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall e.V. (Hrsg.), Hennef