

Anpassung der Bewirtschaftungsstrategien von Kanalsedimenten

Produkt 3.2.4b

Version: 1.1
Status: final
Datum: 02.02.2012

TP 3.2.4 - TP Abwasserentsorgung

TP-Leiter: Prof. Peter Krebs
Institut für Siedlungs- und Industrierwasserwirtschaft
TU Dresden

Bearbeiter: Dipl.-Hydrol. Michael Brodien*, Dipl.-Ing. Paolo Dapoz,
Dr. Jens Tränckner*
*Institut für Siedlungs- und Industrierwasserwirtschaft

Kontakt: Dr. Jens Tränckner
Institut für Siedlungs- und Industrierwasserwirtschaft
Bergstraße 66
Tel.: +49 351/463 36 024
Fax: +49 351/463 37 204
E-Mail: Jens.Traenckner@tu-dresden.de

REGKLAM

Entwicklung und Erprobung eines Integrierten Regionalen Klimaanpassungsprogramms für die Modellregion Dresden

Gefördert durch das Bundesministerium für Bildung und Forschung
Förderkennzeichen: 01 LR 0802

Koordination: Leibniz-Institut für ökologische Raumentwicklung e. V. (IÖR)
Weberplatz 1, 01217 Dresden
Projektleiter: Prof. Dr. Dr. h.c. Bernhard Müller

www.regklam.de

Inhaltsverzeichnis

1. Einordnung in REGKLAM.....	8
2. Veranlassung und Zielstellung.....	9
2.1 HERKUNFT UND ZUSAMMENSETZUNG VON ABLAGERUNGEN.....	9
2.2 ZIELSTELLUNG UND GLIEDERUNG DER UNTERSUCHUNGEN	9
3. Untersuchungsgebiet und Ausgangssituation	11
4. Auswertung dokumentierter Ablagerungsmengen.....	12
4.1 VERWENDETE DATEN UND UNTERSUCHUNGSZIEL.....	12
4.2 ERGEBNISSE	12
4.3 SCHLUSSFOLGERUNG.....	16
5. Untersuchungen zur Sedimentdynamik in einem Mischwassersammler.....	17
5.1 ZIELSTELLUNG DER UNTERSUCHUNG	17
5.2 MATERIALIEN UND METHODEN	17
5.3 ERGEBNISSE	20
5.3.1 <i>Höhe und Zusammensetzung der Kanalsedimente.....</i>	20
5.3.2 <i>Sedimentdynamik</i>	22
5.3.3 <i>In-situ Untersuchungen zur Mobilisierbarkeit der Ablagerungen.....</i>	24
6. Theoretische Untersuchungen zur Ablagerungsbildung mit Hilfe eines Sedimenttransportmodells	25
6.1 VERANLASSUNG UND ZIELSTELLUNG	25
6.2 UNTERSUCHUNGSANSATZ.....	25
6.3 ERGEBNISSE	26
6.4 SCHLUSSFOLGERUNGEN.....	28
7. Bewertung der Ablagerungsneigung im Kanalnetz der Stadt Dresden unter Einbeziehung klimatischer Einflussgrößen	29
7.1 BEWERTUNGSKRITERIEN	29
7.2 ERGEBNISSE UND SCHLUSSFOLGERUNGEN	30
8. Optimierung des Sedimentmanagements.....	34
8.1 GRUNDLAGEN	34
8.2 ORGANISATION DER KANALNETZREINIGUNG, SPÜLPLAN	34
8.2.1 <i>Reinigungsstrategien für Kanalisationsnetze.....</i>	34
8.2.2 <i>Reinigungsplanung für das Kanalnetz Dresden.....</i>	36
9. Weiterentwicklung Stauwagen zur Reinigung von Großprofilen.....	38
9.1 VERANLASSUNG UND ZIELSTELLUNG	38
9.2 MATERIALIEN UND METHODEN	39
9.2.1 <i>Grundsätzliche Vorgehensweise.....</i>	39
9.2.2 <i>Grundlagenuntersuchungen mittels CFD-Modellierung</i>	39
9.2.3 <i>Konstruktiver Vorentwurf.....</i>	42
9.3 ERGEBNISSE UND AUSBLICK	42
9.3.1 <i>Erfahrung von Betreibern</i>	42
9.3.2 <i>CFD-Modell</i>	43
9.3.3 <i>Physikalischer Modellversuch</i>	44
9.4 KONSTRUKTIVE LÖSUNG	47

10. Zusammenfassung und Ausblick.....	50
11. Literatur	52

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: REGKLAM Modellregion mit Kanalnetz im Stadtgebiet Dresden(rot)	8
Abbildung 2: Verteilung der angefallenen Materialmengen 2010	12
Abbildung 3: Box-Whisker-Plot der Materialmengen der Sandfänge Flügelweg und Kläranlage sowie Kanalräumgut aus dem Stadtgebiet für den Zeitraum 2003 bis 2010 als Monatssummen in m ³ ...	14
Abbildung 4. Korrelation zwischen angefallenem Sandfang- und Kanalräumgut und Jahresniederschlag	15
Abbildung 5: Korrelation zwischen angefallenem Sandfang- und Kanalräumgut und Summe der Trockenwettertage	15
Abbildung 6. Übersichtsplan der Messstelle mit Angaben zum angeschlossenen Einzugsgebiet	18
Abbildung 7: Einbausituation des PCM4 und schematische Darstellung der Teilhöhen	19
Abbildung 8: Längsschnitt des Sammlers Flensburger Straße mit Angabe der Probenahmestellen (Pfeile), (Stock, 2011)	19
Abbildung 9: Sieblinien der Ablagerungen an den einzelnen Schächten in Oberschicht	20
Abbildung 10. Kornverteilung über in Oberschicht(1) , Mittelschicht (2) und Sohlschicht (2) in den Schächten G37 und G45.....	21
Abbildung 11: organischer Anteil in den einzelnen Entnahmehorizonten, getrennt nach Kornklassen (Stock, 2011)	22
Abbildung 12: Wasserstandsmessung und berechnete Sedimenthöhe über einen Beobachtungszeitraum von 9 Monaten	23
Abbildung 13: Ausschnitt Online-Messung des Wasserstandes und der Ablagerungshöhe (Schacht 24G37).....	23
Abbildung 14: Gemessene Entwicklung des partikulären CSB bei kontrollierter Steigerung der Sohlschubspannung in den Ablagerungen des Sammlers Flensburger Straße	24
Abbildung 15: a) Einfluss von Ablagerungen auf die Teilfüllungsverhältnisse b) Einfluss von Ablagerungen auf den breitenspezifischer Massenstrom c) Einfluss von Ablagerungen auf die transportierbare Partikelkonzentration.....	27
Abbildung 16: Niederschlagsverteilung nach Otter-Königer für die Dauerstufe 60 min. und die verschiedenen Jährlichkeiten	31
Abbildung 17: Ablagerungsklassen gemäß Tabelle 4 für ein Starkregenereignis mit $n = 1/a$ im Dresdner Netz	31
Abbildung 18: Nomierte Verteilung der Ablagerungsklassen innerhalb verschiedener Profilhöhen-Klassen für verschiedene Niederschlagshäufigkeiten (1/a).....	32
Abbildung 19: Spezifische Reinigungskosten der HD-Reinigung in Abhängigkeit von Verschmutzungsgrad und Nennweite (nach Winkler (2010), verändert).....	38
Abbildung 20: rechts: Dresdner „großer“ Stauwagen; links: „kleiner“ (links) Stauwagen (bei Reinigung der Trockenwetterrinne eines Bezirkssammlers)	38
Abbildung 21	41
Abbildung 22: Sedimentmasseabtrag: links: nach 60 s Strömungssimulation (qualitativ), rechts: Gesamtmasse.....	44
Abbildung 23: Physikalischer Modellversuch 1) Kanalabschnitt mit Beobachtungsöffnungen 2) Sedimentverteilung vor Versuch 3) Paralleler Schlitz 30 mm 4) Sedimentberg nach Versuch (parallel, 30 mm)	45

Abbildung 24: Charakteristische Form der Sedimentberge für die Varianten unterströmt, gerader Schlitz (oben), unterströmt, paralleler Schlitz (unten), überspült (rechts)..... 46

Abbildung 25: Verlauf der Ober- und der Unterwasserhöhe während einiger Klappvorgänge (links); Betrieb der Entlastungsklappe während der Entlastung (rechts) 47

Abbildung 26: Kräfte die auf dem Wagen einwirken (Hangabtriebskraft wird vernachlässigt) 48

Abbildung 27: Abstandshalter zur Verhinderung des Auffahrens auf den Sedimentberg: Werbung (links); geplanter Abstandshalter (rechts)..... 49

Abbildung 28: Konstruktionsskizze des Stauwagens 49

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Klassifikation von Ablagerungstypen (Crabtree, 1988)	9
Tabelle 2: Angaben zu Kanalnetz und Kläranlage Dresden	11
Tabelle 3 oben: Charakteristik von Kanalnetz-Sedimenten nach CIRIA (1996) unten: abgeleitete Sinkgeschwindigkeiten und erforderliche Faktoren n (gemäß Gleichung 4).....	29
Tabelle 4: Bewertungskriterien zur Identifizierung der Ablagerungsneigung im Dresdner Kanalnetz	30
Tabelle 5: Verteilung der Ablagerungsklassen in km Kanallänge auf die Profilhöhen bei verschiedenen Niederschlagshäufigkeiten ($1/a$)	32
Tabelle 6: Änderung der Ablagerungsklassen hinsichtlich Anzahl und Länge für alle Jährlichkeiten	33
Tabelle 7: Vor- und Nachteile Präventivstrategie	35
Tabelle 8: Vor- und Nachteile Inspektionsstrategie	35
Tabelle 9: Vor und Nachteile Feuerwehrstrategie	36
Tabelle 10: Charakteristik des gewählten Kanalabschnitts für die CFD-Modellierung	40

Akürzungsverzeichnis

Zeichen	Bedeutung	Einheit
CFD	Computational fluid dynamics	
CSB	Chemischer Sauerstoffbedarf (engl.: COD, chemical oxygen demand)	mg/l bzw. g/m^3
HDSG	Hochdruckspül- und Saugfahrzeug	
KOSTRA	Koordinierte Starkniederschlagsregionalisierung	
SE DD	Stadtentwässerung Dresden GmbH	
d	Korndurchmesser	mm
$d_{ch,k}$	charakteristischen Korndurchmesser	mm
DN	Nennweite, Nenndurchmesser	mm
g	Gravitationskonstante ($=9,81 \text{ m/s}^2$)	m/s^2
g'	modifizierte Gravitationskonstante ($= g \cdot (\rho_s - \rho_w) / \rho_w = g \cdot (S - 1)$)	m/s^2
h	Wasserstand	m
h_{sed}	Sedimenthöhe (Ablagerungshöhe)	m
J_s	Sohlgefälle	1
k	absolute (äquivalente) Rauheit	mm
k_{st}	Manning-Strickler-Beiwert	$m^{1/3}/s$
$m_{F,k}$	Feststofftrieb je Breiten- und Zeiteinheit für die Kornklasse k	$kg \cdot m^{-1} \cdot s^{-1}$
Q	Durchfluss	m^3/s
T	Temperatur	$^{\circ}C$
ϕ	Transportintensität, dimensionsloser Feststofftrieb	1
ρ	Dichte	kg/m^3
ρ_s	Partikeldichte ($=2500 \text{ kg/m}^3$)	kg/m^3
ρ_w	Dichte von Wasser ($=1000 \text{ kg/m}^3$)	kg/m^3
τ_0	Wandschubspannung	N/m^2
τ_{krit}	(Grenz-) Schleppspannung, kritische Schubspannung	N/m^2
θ	Strömungsintensität ($= Fr^*$)	

1. Einordnung in REGKLAM

Im Rahmen des Teilprojektes 3.2.4 „Abwassersysteme“ des Projektes „Entwicklung und Erprobung eines integrierten Regionalen Klimaanpassungsprogramms für die Modellregion Dresden - REGKLAM“ sind folgende Produkte definiert:

- a) Strategien zur Verminderung der Überstauhäufigkeit
- b) Bewirtschaftungskonzept Kanalsedimente
- c) Strategien zur Verringerung der Frachtspitzen
- d) Strategien zur Anpassung der Kläranlagenprozesse

Für die Bearbeitung von Punkt b) ist das Institut für Siedlungs- und Industriewasserwirtschaft der Technischen Universität Dresden verantwortlich. In diesem Bericht werden die vorgenommenen Analysen und Forschungsergebnisse dargestellt und diskutiert.

Abbildung 1 zeigt die Lage des Dresdner Kanalnetzes in der Modellregion

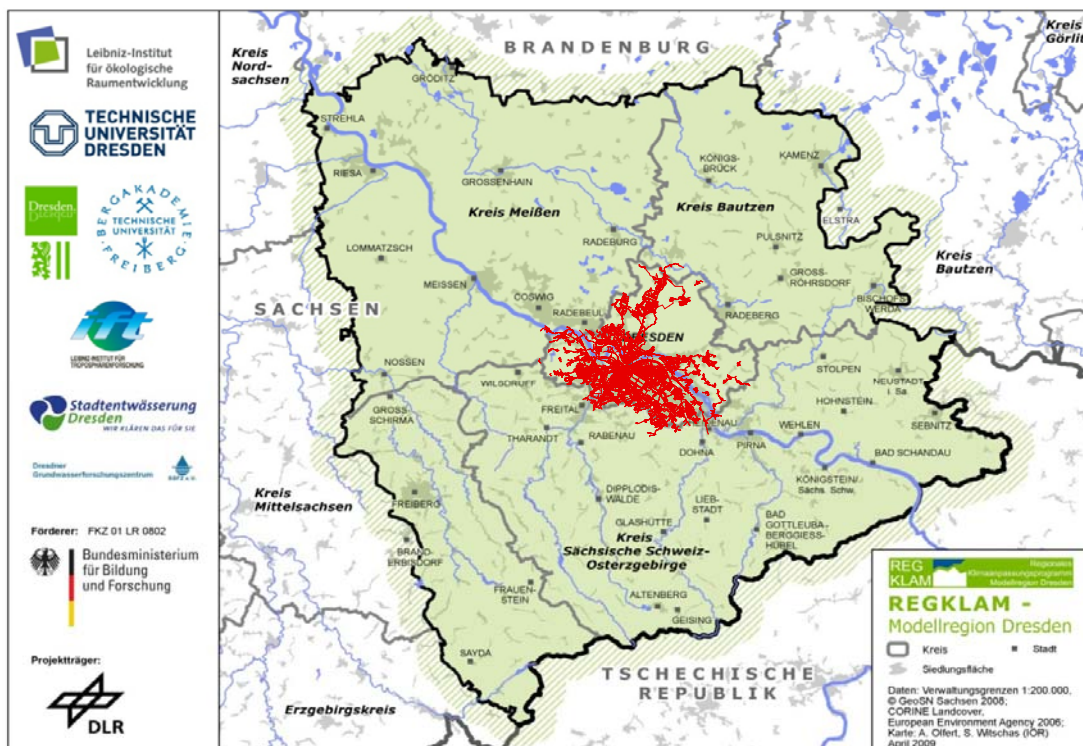


Abbildung 1: REGKLAM Modellregion mit Kanalnetz im Stadtgebiet Dresden(rot)

2. Veranlassung und Zielstellung

2.1 Herkunft und Zusammensetzung von Ablagerungen

Das Entwässerungssystem hat verschiedene bestimmungsgemäße Schnittstellen zur oberirdischen Bebauung und Nutzung, als auch ungewollte, wie die Infiltration von Grund- und Schichtenwasser. Durch diese werden organische und anorganische Feststoffe eingetragen. Die für eine Ablagerungsbildung notwendigen Partikel sind immer im Abwasser enthalten. Damit sich daraus Ablagerungen bilden, müssen jedoch bestimmte hydraulische, konstruktive oder durch die Partikelbeschaffenheit determinierte Bedingungen erfüllt sein. Aufgrund der komplexen Bildungsbedingungen im Kanalnetz weisen Ablagerungen in Kanälen eine hohe Heterogenität hinsichtlich Zusammensetzung, Ausspülverhalten und Verschmutzungspotenzial auf. Häufig werden Ablagerungen basierend auf (Crabtree, 1988) in 5 Typen differenziert (Tabelle 1 **Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden.**). Aus betrieblicher Sicht sind vor allem Ablagerungen relevant, welche zu erhöhten Betriebsaufwendungen (Kanalnetzreinigung, Reinigung von Becken und Speicherbauwerken) führen. Dies sind insbesondere Ablagerungen mit hohem mineralischen Anteil, welche nur eingeschränkt durch Selbstreinigungseffekte aus dem Kanalnetz ausgetragen werden. Gemäß Tabelle 1 betrifft dies insbesondere die Typen A und B. Der Typ C fällt ebenfalls darunter, hier bestehen jedoch in der Regel wirksame technologische Lösungen zur Beckenreinigung, so dass diese Ablagerungen in der Regel keine Probleme bereiten.

Tabelle 1: Klassifikation von Ablagerungstypen (Crabtree, 1988)

Typ	Beschreibung	Vorkommen	Herkunft	Verschmutzungspotenzial
A	Grobes, lockeres Kies-Sand-Schlamm-Gemisch	Kanalsole (bleibende Ablagerungen)	Oberflächenabfluss	Mittel (jedoch bedeutend bei Starkregen, wenn anaerobe Ausspülung enthalten)
B	Wie A, jedoch mit Fett und Biomasse verfestigt			
C	Feinkörniger, mobiler, leicht ausschwemmbarer Schluff, oft auch kohäsiv	Meist nur in Zonen mit geringen Geschwindigkeiten. Liegt isoliert entweder unter oder über dem Material von A/B	Trockenwetterabfluss	Hoch (da Hauptursache der Feststoffabspülung bei Mischwasserabfluss)
D	Klebrig, fädige Sielhäute	Wasserwechselzone und Zonen mit hohen Geschwindigkeiten	Biologisches Wachstum	Sehr hoch (Quelle für H ₂ S-Bildung, biologische Aktivität, geringer Feststoffbeitrag, Schwermetallbindung)
E	Feinkörnige Ablagerungen	Regenbecken	Mischwasserabfluss	

2.2 Zielstellung und Gliederung der Untersuchungen

Der Fokus dieses Arbeitspaketes liegt dementsprechend auf der Analyse der Bildung von Ablagerungen mit hohem mineralischem Anteil aufgrund erwarteter klimatischer Veränderungen.

Als szenarienhafte Klimausprägungen werden hier insbesondere

- Lange Trockenperioden mit geringem Trockenwetterabfluss, gefolgt von intensiven Starkregen (Sommercharakteristik)
- Häufige, gemäßigte Niederschläge mit hohen Niederschlagssummen (Wintercharakteristik)

betrachtet.

Es gilt zu untersuchen, ob eine zunehmende Verschiebung in diesen Niederschlagscharakteristiken zu prognostizierbaren Veränderungen der Sedimentbildung im Kanalnetz führt. Darauf aufbauend sollen geeignete Maßnahmen abgeleitet werden.

Für die Bearbeitung wurde in folgenden Schritten vorgegangen:

1. Auswertung historischer Daten zum Anfall von Sandfang- und Kanalräumgut und Vergleich mit der zugehörigen Niederschlagsverteilung
2. Langzeitbeobachtung der Sedimentbildung in einem Kanalnetzabschnitt als Funktion der hydraulischen Randbedingungen in Kombination mit in-situ Messungen zur Mobilisierbarkeit der Ablagerungen
3. Theoretische Untersuchungen zur Bildung von Sedimenten für einen Kanalnetzabschnitt unter Nutzung eines Sedimenttransportmodells
4. Ableitung von Kriterien zur Bildung und Mobilisierung von Ablagerungen und Anwendung auf das Kanalnetz von Dresden mit Hilfe hydrodynamischer Simulation, Identifizierung ablagerungsanfälliger Bereiche und Abschätzung möglicher klimabedingter Veränderungen
5. Erarbeitung von Empfehlungen für eine Optimierung des Sedimentmanagements
6. Weiterentwicklung des Stauwagens für die als besonders relevant erkannten Großprofile mit geringem Sohlgefälle

3. Untersuchungsgebiet und Ausgangssituation

Das Kanalnetz der Stadt Dresden wird ebenso wie die Abwasserreinigungsanlage von der Stadtentwässerung Dresden GmbH betrieben. Dabei bildet das Abwassersystem im Stadtgebiet nur einen Teil des gesamten Netzes, das unter anderem Städte wie Heidenau, Pirna und Freital umfasst und deren Abwässer über zwei so genannte Abfangsammler parallel zur Elbe der Kläranlage Dresden Kaditz zugeführt werden. Das Kanalnetz mit einer Gesamtlänge von knapp 1800 km setzt sich zu 50% aus Mischkanalisation, 26% Schmutzwasserkanalisation und 19% Regenwasserkanalisation zusammen. Ein großer Anteil des Netzes ist in den Kanalnetzreinigungsplan der Stadtentwässerung integriert. Dieser definiert haltungsscharf die erforderlichen Reinigungsintervalle. Der Kanalnetzreinigungsplan wird von der Stadtentwässerung kontinuierlich angepasst. Maßgebende Einflussgrößen sind die angefallenen Sedimentmengen bei der Reinigung aber auch die Auswertung von Kundenbeschwerden aufgrund von Geruchsbelästigung bzw. logistische Aspekte. Diese interaktive Art der Spülplanerstellung hat über die Jahre zu einer bereits weitgehenden Optimierung des Reinigungsaufwandes geführt. Für die Ableitung der Sedimentverteilung im Kanalnetz im Rahmen dieses Arbeitspaketes ist er jedoch nicht geeignet.

Tabelle 2: Angaben zu Kanalnetz und Kläranlage Dresden

Parameter	Wert	
Einwohner	517 000 E	
Anschlussgrad	> 99 %	
Spezifischer Abwasseranfall	35 m ³ /(E·a) bzw. 95 l/(E·d)	
Kanalisationstyp	Länge (Haltungs-Anzahl)	Anteil an Netzlänge
- Mischwasser	893,6 km (24015)	50%
- Schmutzwasser	463,6 km (13403)	26%
- Regenwasser	349,2 km (10890)	19%
- Sonstige	95,5 km (2745)	5%
Summe	1801,9 km (51053)	

4. Auswertung dokumentierter Ablagerungsmengen

4.1 Verwendete Daten und Untersuchungsziel

Feststoffe werden auf dem Weg von der Quelle bis zur Kläranlage hauptsächlich auf drei Wegen aus dem Kanalnetz entfernt: durch Kanalnetzreinigung mit Anlieferung über die Spülfahrzeuge, über den Sandfang am Ende des Altstädter Sammlers vor dem Düker Richtung Kläranlage und auf Neustädter Seite direkt durch den Sandfang auf der Kläranlage. Das Kanalräumgut wird zum Teil direkt zur Behandlungsanlage auf der KA Kaditz gebracht, im Meisterbreich Ost jedoch erst in einem Lochcontainer zwischengespeichert und im Abstand von 1 bis 3 Wochen angeliefert. Auch am Sandfang Flügelweg erfolgt die Abfuhr diskontinuierlich, je nach Füllung der Container. Die auf der Behandlungsanlage angenommenen Materialmengen werden durch die Stadtentwässerung Dresden GmbH (SE DD) auf Monatsbasis erfasst. Insgesamt stand eine monatsweise aufgelöste Datenreihe der Jahre 2002 bis 2010 für die Auswertung zur Verfügung.

Die anfallenden Materialmengen wurden sowohl nach Entnahmeort als auch nach jahreszeitlicher Verteilung ausgewertet. Zusätzlich wurde versucht, saisonale Zusammenhänge sowie Einflüsse der Niederschlagscharakteristik zu erkennen.

4.2 Ergebnisse

Abbildung 2 zeigt die Verteilung der anfallenden Ablagerungsmengen aus dem Kanalnetz der Stadtentwässerung beispielhaft für das Jahr 2010. Auffällig ist, dass von den insgesamt angefallenen 1884 t nur 26% bis zum Sandfang der Kläranlage gelangt sind. Eine ebenso große Menge wurde bereits am Ende des Altstädter Abfangsammlers (Sandfang Flügelweg) entnommen. Der hier anfallende Sand wird teilweise direkt mit dem Abwasserstrom verfrachtet. Parallel wird mit Hilfe von Stauwagen Sediment mobilisiert und zum Sandfang transportiert. Diese Stauwagen werden diskontinuierlich eingesetzt, was einen bisher nicht eindeutig zuordenbaren Einfluss auf die anfallenden Ablagerungsmengen hat.

Ein sehr hoher Anteil der Ablagerungen (37%) fällt direkt als Kanalräumgut aus den kombinierten Hochdruckspül- und Saugfahrzeugen (HDSG) an.

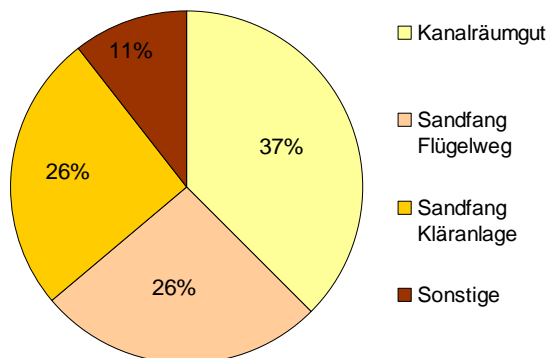


Abbildung 2: Verteilung der angefallenen Materialmengen 2010

In Abbildung 3 ist die jahreszeitliche Verteilung der anfallenden Mengen als Box-Whisker-Plot über alle Jahre dargestellt. Insgesamt ist die Streuung sehr groß und lässt keine klaren Aussagen über eine jahreszeitlich bedingte Dynamik von Ablagerungsmengen zu. Aufgrund des geringen Stichprobenumfangs ist eine statistische Auswertung nicht möglich. Es lassen sich jedoch einige Trends aus den Daten interpretieren. So fallen die leicht erhöhten Mengen in den Monaten April und Juni/Juli auf. Im April könnte dies durch die Kombination von erhöhten Niederschlägen, Schmelzwasser und dem Eintrag von Streugut verursacht sein. Die erhöhten Mengen im Juni/Juli lassen sich schlecht deuten.

Beim Kanalräumgut werden in den Sommermonaten die höchsten Mengen angeliefert. Dies ist aber in erster Linie auf die Einsatzplanung des Betriebspersonals zurückzuführen, da bei Frost Kanalnetzreinigung nur im begrenzten Umfang durchgeführt wird.

Auch bei einer Zuordnung der monatlich erfassten Ablagerungsmengen gegenüber der Niederschlagssumme des Monats lässt sich keine Abhängigkeit erkennen. Dies kann zum Teil durch die diskontinuierliche Anlieferung von Kanalräum- und Sandfanggut und den zeitverzögerten Geschiebetransport im Kanal verursacht sein.

Aus diesem Grund wurden zusätzlich die Werte auf Jahresscheiben aggregiert. Damit verbunden ist allerdings auch eine weitere Reduzierung des Stichprobenumfangs auf insgesamt 7 Werte. Hier zeigt sich ein schwacher negativer Zusammenhang der Niederschlagssumme zur Ablagerungsmenge, d.h. je trockener das Jahr, umso höher die anfallenden Ablagerungsmengen (Abbildung 4). Dieser auf den ersten Blick überraschende Zusammenhang lässt sich vorerst nur durch konzeptionelle Annahmen erklären. Sollte sich dieser Trend auch bei längeren Datenreihen bestätigen, ist zu vermuten, dass durch lange Trockenperioden der größere Mengen Bodenmaterial durch Wind auf abflusswirksame Flächen verfrachtet und von diesen abgewaschen werden. Dies würde bisherige Akkumulationsansätze in der Modellierung infrage stellen, welche von einem asymptotischen Anstieg des Schmutzfrachtpotentials auf Oberflächen in Trockenwetterperioden ausgehen. Bei diesem Erklärungsansatz sollte auch die Anzahl der Trockenwettertage mit der Ablagerungsmenge korrelieren. Mit dem zur Verfügung stehenden Stichprobenumfang ist dies jedoch kaum belegbar. Alternativ bzw. ergänzend bleibt zu prüfen, inwieweit in nassen Jahren Material über die Entlastungen in das Gewässer eingetragen wird. In Abbildung 5 sind aus Übersichtsgründen nur lineare Regressionslinien zwischen der Summe von Sandfang- und Kanalräumgut mit den Trockenwettertagen dargestellt. Unter Einbeziehung aller Jahre ergibt sich der erwartete positive Zusammenhang, allerdings mit einem sehr schlechten Korrelationskoeffizienten. Wird das Extremjahr 2003 aus der Betrachtung ausgeschlossen ergibt sich kein Zusammenhang mehr zwischen Trockenwettertagen und Gesamtmenge von Kanalräumgut und Sandfängen. Insgesamt wären aber mehr Jahre mit 200 bis 230 Trockentagen zur Untersuchung des Zusammenhangs notwendig

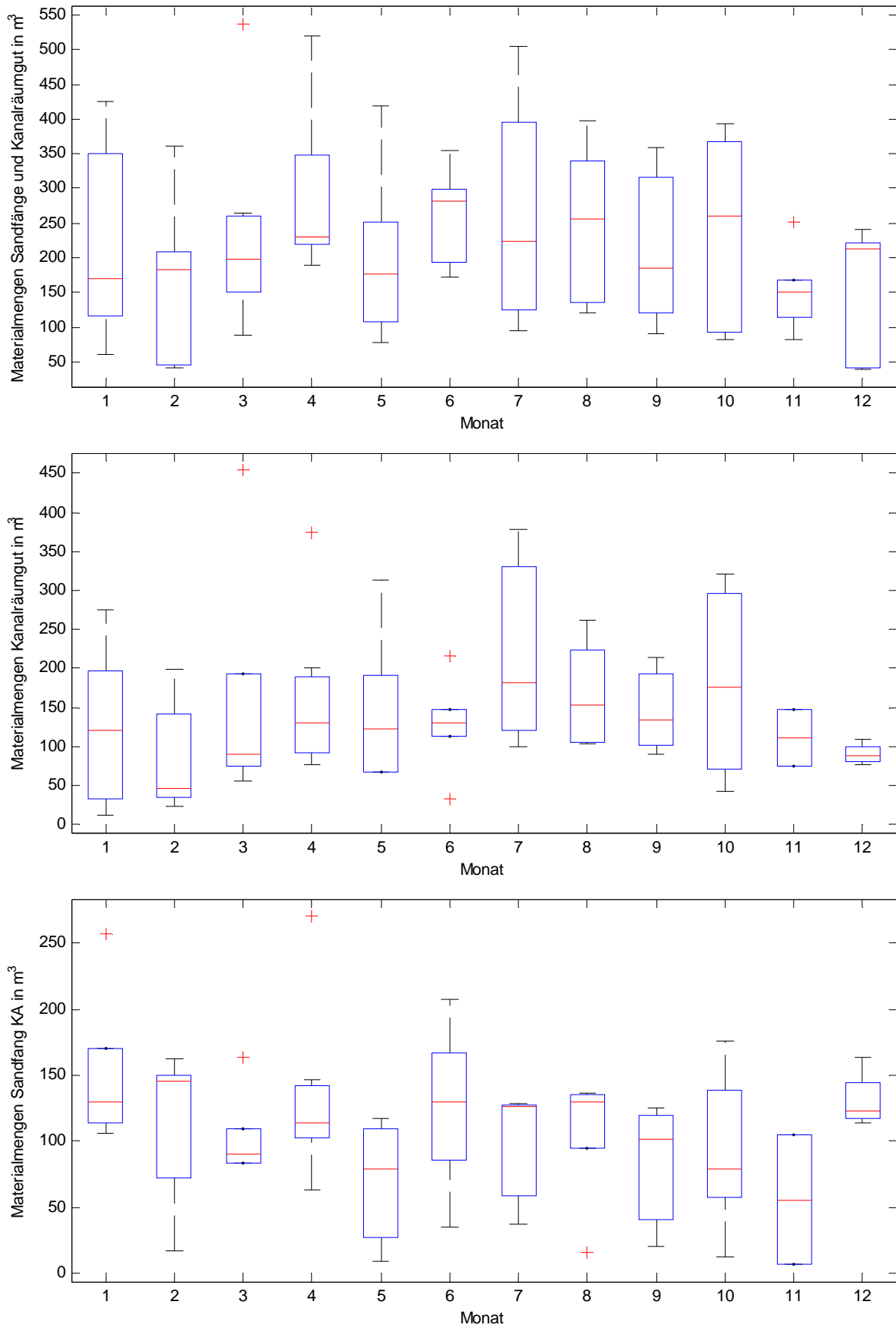


Abbildung 3: Box-Whisker-Plot der Materialmengen der Sandfänge Flügelweg und Kläranlage sowie Kanalaräumung aus dem Stadtgebiet für den Zeitraum 2003 bis 2010 als Monatssummen in m³

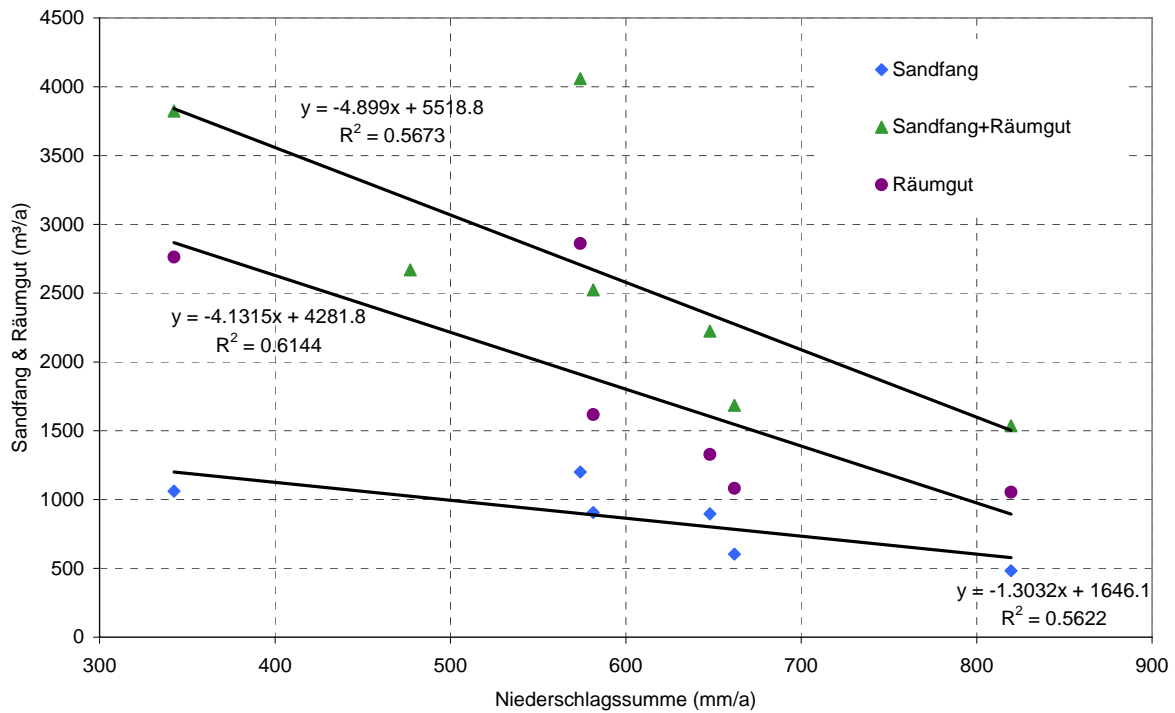


Abbildung 4. Korrelation zwischen angefallenem Sandfang- und Kanalräumgut und Jahresniederschlag

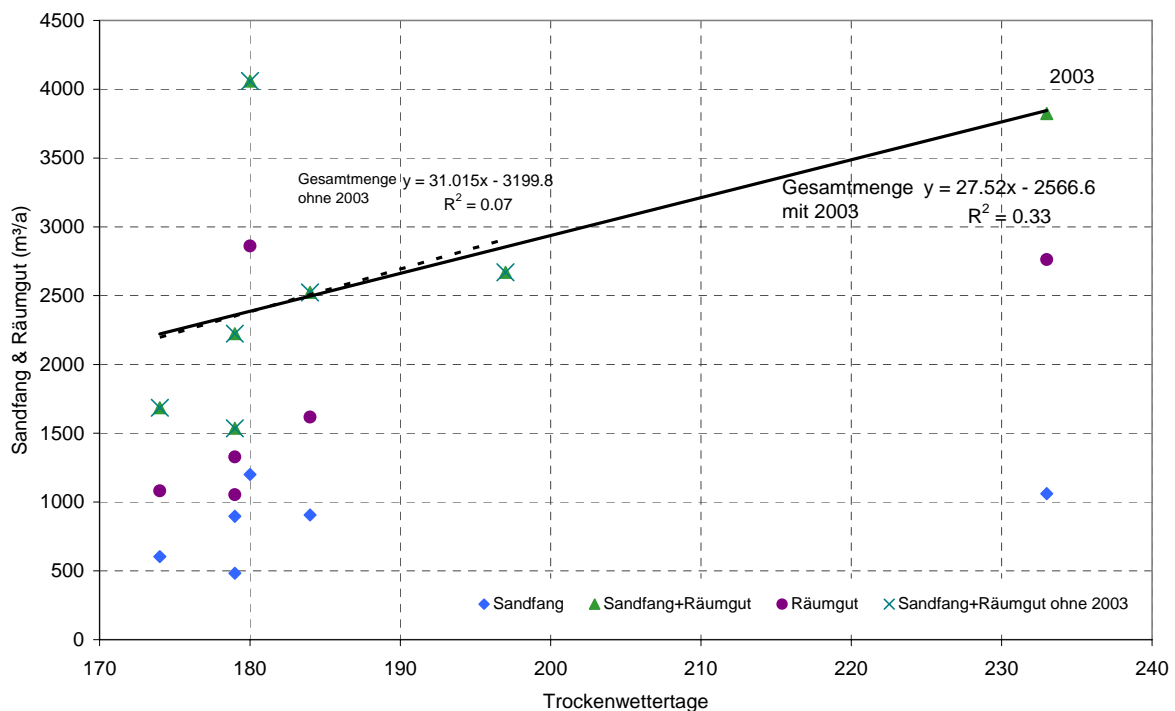


Abbildung 5: Korrelation zwischen angefallenem Sandfang- und Kanalräumgut und Summe der Trockenwettertage

4.3 Schlussfolgerung

Auf Grundlage der vorhandenen Daten kann kein signifikanter Zusammenhang zwischen Klimafaktoren und Materialmengen aus dem Kanalnetz ermittelt werden. Saisonale Schwankungen und kurzfristige Änderungen des Niederschlagsregimes lassen sich nicht mit dokumentierten Ablagerungsmengen korrelieren. Die Ursachen hierfür können zum einen logistischer Natur sein (diskontinuierliche Reinigung und Anlieferung). Andererseits wirkt das Kanalnetz auch als großer und dynamischer Zwischenspeicher, der durch statische Verknüpfung von Klimadaten und Sedimentmengen nicht angemessen abgebildet wird.

Sollte sich der auf Jahresebene beobachtete Anstieg der Ablagerungsmenge in trockenen Jahren langfristig bestätigen, kann unter Annahme künftig längerer sommerlicher Trockenperioden mit einem erhöhten Eintrag ablagerungsfähigen Materials gerechnet werden. Eine grundsätzliche klimabedingte Veränderung der Sedimentmengen im Kanalnetz lässt sich aus diesen Untersuchungen jedoch nicht ableiten. Insgesamt sind die Dynamik und die determinierenden Randbedingungen für den Eintrag ablagerungsfähigen Materials noch nicht hinreichend verstanden und erfordern weitergehende, räumlich und zeitlich höher aufgelöste Untersuchungen über lange Zeiträume.

5. Untersuchungen zur Sedimentdynamik in einem Mischwassersammler

5.1 Zielstellung der Untersuchung

Während die Untersuchungen im Abschnitt 1 (S.12 ff.) eine langfristige Bilanz der Ablagerungsmengen zum Inhalt hatten, zielten die hier durchgeführten Arbeiten auf die Beobachtung der Bildungs- und Abtragsdynamik in einem konkreten ablagerungsbehafteten Kanalnetzabschnitt. Insbesondere sollte hier untersucht werden, unter welchen hydraulischen Randbedingungen die Ablagerungsbildung erfolgt und inwieweit, die gemeinhin unterstellte Selbstreinigung von Mischwasserkanälen bei starken Niederschlagsereignissen beobachtet werden kann.

Hintergrund waren hierbei auch Erfahrungswerte des Betreibers, der häufig nach einer initialen Bildungsphase von Ablagerungen eine weitgehende Stagnation der Sedimentbildung beobachtete. Weiterhin wurde in eigenen modelltheoretischen Untersuchungen festgestellt, dass die Sedimentbildung entgegen der landläufigen Meinung durch Regenereignisse verstärkt werden kann (Tränckner et al., 2008). Dies konnte bisher jedoch noch nicht durch Messungen validiert werden.

Aus den Untersuchungen sollten schließlich Kriterien abgeleitet werden, welche zumindest überschlägige eine Bewertung der Ablagerungsanfälligkeit im Kanalnetz der Stadt Dresden ermöglichen sollen.

5.2 Materialien und Methoden

Für die Untersuchung wurde in Abstimmung mit der Stadtentwässerung Dresden der Endstrang eines Teileinzugsgebiets im Nordosten der Stadt Dresden gewählt. Der Kanalnetzabschnitt „Flensburger Straße“ ist ablagerungsbehaftet bekannt und liegt außerhalb von Straßen in unbebautem Bereich. Er ist damit für den Einbau und die Wartung von Messtechnik gut geeignet. Der Sammler hat ein Ei-Profil mit Profilhöhe von 1200 mm und im untersuchten Bereich ein Sohlgefälle von 0,63 ‰ (1:1667). Der Sammler mündet in das Pumpwerk Stetzsch. Bei sehr intensiven Regenereignissen findet aufgrund begrenzter Pumpenkapazität auch ein partieller Rückstau in den Sammler statt, welcher bis in den Bereich der Messstelle (Haltung 24G36 – 24 G37, Abbildung 8) reichen kann.

Das Einzugsgebiet ist durch lockere Wohnbebauung und eine ausgeprägte Hanglage geprägt. Im Einzugsgebiet liegen einige Mischwasserentlastungen mit geringer Entlastungshäufigkeit.

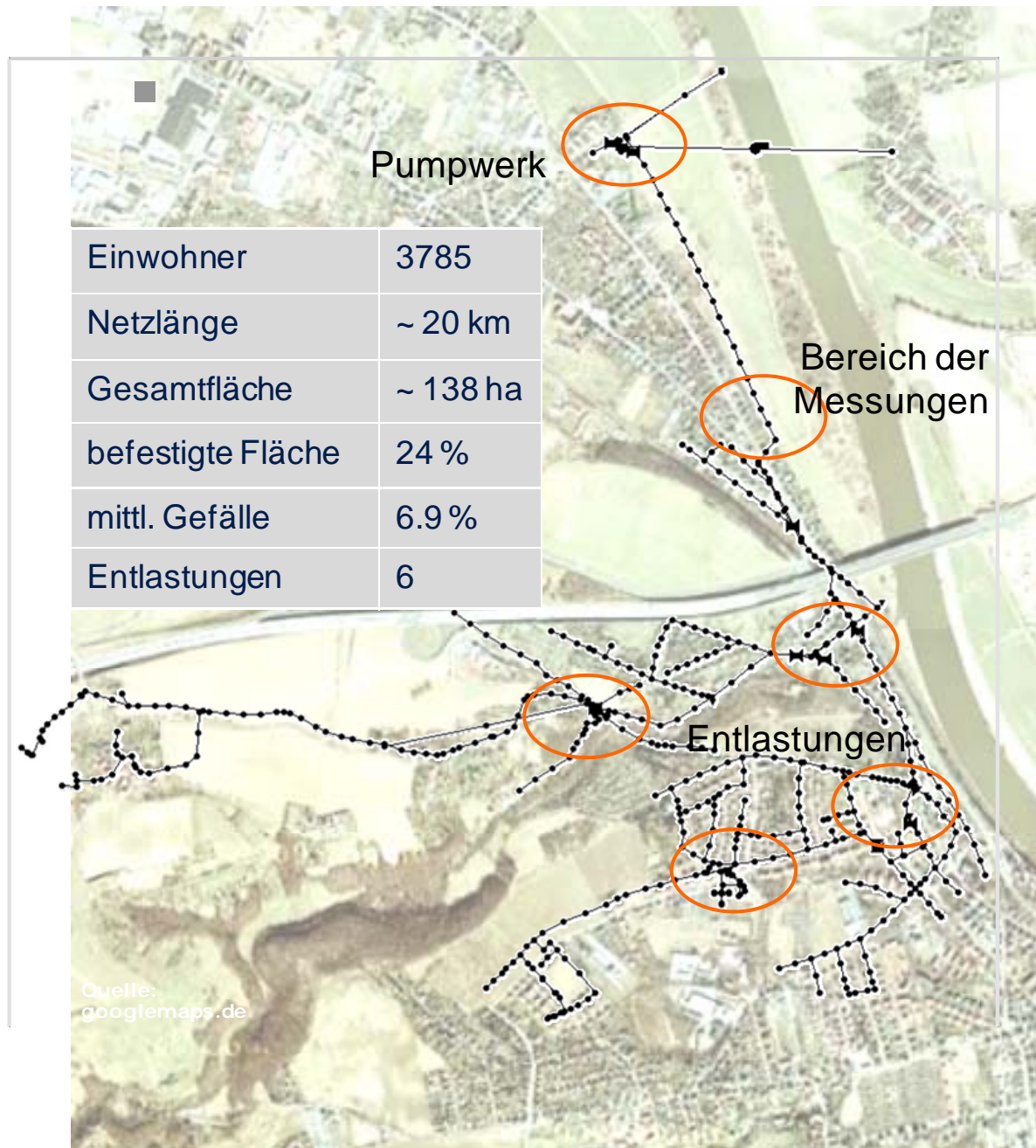


Abbildung 6. Übersichtsplan der Messstelle mit Angaben zum angeschlossenen Einzugsgebiet

Zur kontinuierlichen Erfassung der Sedimenthöhe und des Durchflusses wurden oberhalb des Rückstaubereichs verschiedene Durchflussmesseinrichtungen sowie Füllstandsmessungen eingebaut. Es wurden parallel das radarbasierte Durchflussmesssystem Flow-Dar von der Firma Marsh Mc Birney sowie das Messsystem PCM4 der Firma Nivus auf Ultraschallbasis eingesetzt. Zusätzlich wurde eine Ultraschallsonde der Firma Nivus zur Füllstandsmessung im Rohrscheitel installiert. Die Radarmessung dient hierbei vor allem zur Absicherung und Kontrolle des PCM4. Letzteres wurde für die eigentliche Messaufgabe herangezogen. Das Gerät wurde über Kopf an einen Schwimmkörper montiert und misst damit mittels Ultraschall den Abstand zwischen Wasserspiegel und Sohle mit Sediment. Gleichzeitig wird die Geschwindigkeit gemessen. Der Ultraschallsonde am Rohrscheitel misst den Abstand zwischen dem Rohrscheitel und dem Wasserspiegel. Durch Differenzbildung ($1200 - h\text{-Luft} - h\text{-Wasser}$) lässt sich somit die Sedimenthöhe ableiten (Abbildung 7). Mit dieser Messeinrichtung wurde kontinuierlich über einen Zeitraum von insgesamt 9 Monaten die Sedimentdynamik und die hydraulische Situation beobachtet.

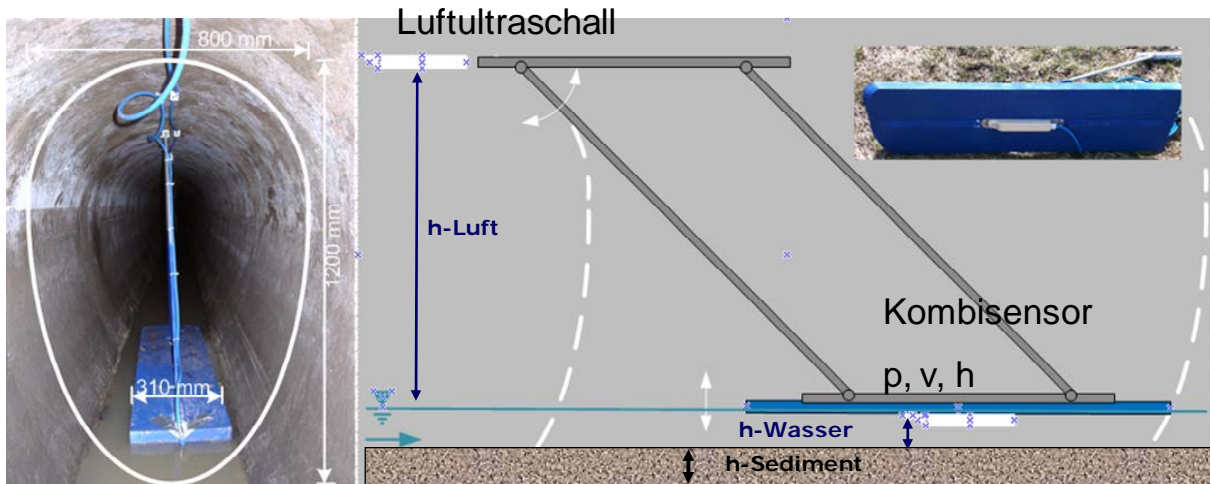


Abbildung 7: Einbausituation des PCM4 und schematische Darstellung der Teilhöhen

Parallel wurden diskontinuierlich die Ablagerungshöhen entlang der Fließstrecke gemessen und Stichproben vom Sediment auf Korngrößenverteilung, organische Trockensubstanz und weitere Parameter untersucht. Die Beprobung der Kanalsedimente erfolgte auf einer Länge von 400 m in 5 Schächten (Abbildung 8). Alle Schächte liegen noch im potentiellen Rückstaubereich des Pumpwerks (siehe skizzierte Wasserspiegellage bei maximalem Rückstau). Die Probenahme erfolgte stromaufwärts, um eine Störung der Proben durch die Aufwirbelung von Partikeln zu minimieren. Vor der Probenahme wurde eine Entnahmebox eingebracht, welche den Durchfluss oberstrom abdichtete und durch einen Bypass an der Entnahmestelle vorbeiführte. Das Wasser innerhalb der Entnahmebox wurde vorsichtig abgeschöpft und das Kanalsediment freigelegt. Anschließend wurden die Ablagerungen schichtweise abgetragen und in Probegefäße abgefüllt. Der Feinkornanteil mit einem Äquivalentdurchmesser $< 0,063$ mm wurde mittels Nasssiebung (DIN ISI 11277) abgetrennt. Anschließend wurden die Proben bei 105°C getrocknet und die Kornverteilung mittels Trockensiebung bestimmt. Von einzelnen Kornfraktionen wurde weiterhin der Glühverlust bei 550°C (\approx organische Trockensubstanz) bestimmt.

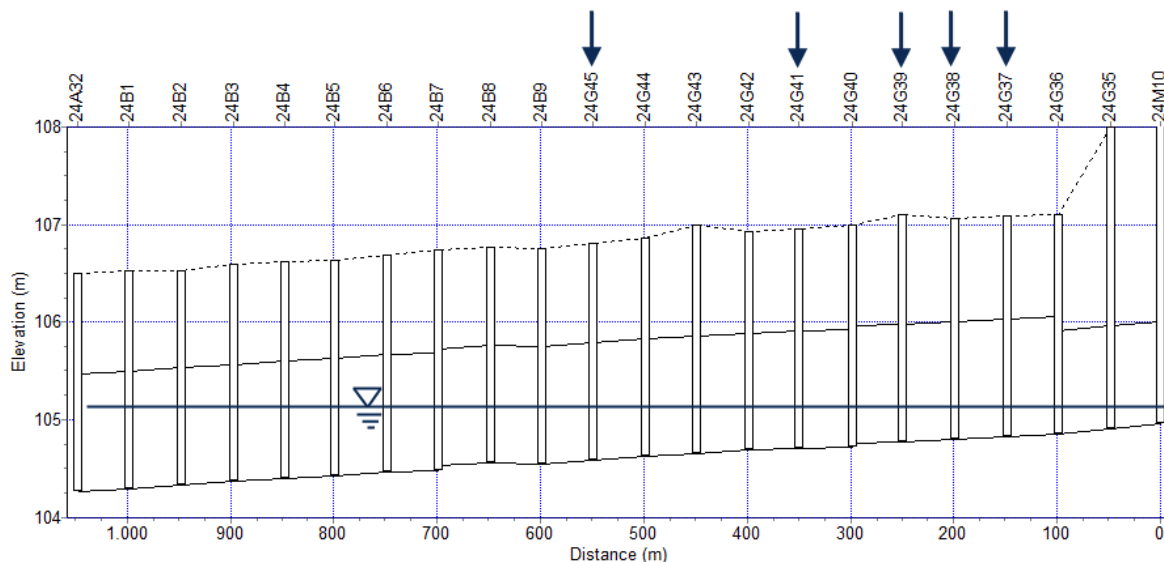


Abbildung 8: Längsschnitt des Sammlers Flensburger Straße mit Angabe der Probenahmestellen (Pfeile), (Stock, 2011)

Der untersuchte Sammler wurde im Zuge von Hochwasserschutzmaßnahmen im Juni 2011 außer Betrieb genommen und durch einen Neubau mit gleichen Dimensionen und Gefälleverhältnissen ersetzt. Dieser verläuft parallel zum alten Sammler um ca. 20 m versetzt. Durch die Inbetriebnahme des neuen Sammlers konnte die Neubildung von Sedimenten zumindest durch regelmäßige

Ablagerungsmessungen verfolgt werden. Aufgrund der noch laufenden Bauarbeiten war eine Installation der online Messtechnik im neuen Kanal leider nicht möglich.

5.3 Ergebnisse

5.3.1 Höhe und Zusammensetzung der Kanalsedimente

Die beprobten Schächte wiesen unterschiedliche Höhen der Sedimentablagerung auf.

In den nachfolgenden Bildern sind repräsentative Kornverteilungskurven für die Oberschicht (Abbildung 9) und getrennt nach Entnahmetiefe (Abbildung 10) dargestellt. Mit Ausnahme des Schachtes G37 ist die Kornverteilung der Oberschicht ungefähr vergleichbar. Die Kornverteilung im Schacht G37 ist allerdings durch die häufigen Einstiege im Zuge der kontinuierlichen Messungen nicht repräsentativ. Hier wurde beobachtet, dass Vertiefungen (Fußabdrücke, aufgewirbeltes Material) schnell durch sehr feine Bestandteile wieder verfüllt wurden. Dies bestätigt sich mit den Analysen, die einen sehr hohen Feinkornanteil ($\varnothing < 0,063 \text{ mm}$) aufweisen. Alle anderen Sieblinien sind deutlich grobkörniger mit einem d_{50} zwischen 0,6 und 1,2 mm. Die Verteilung ist insgesamt relativ gespreizt (Ungleichförmigkeitsgrad $d_{60}/d_{10} > 10$) mit fast annähernd gleichen Teilen Kies, Mittelsand und schluffig-tonigem Material. Diese weisen stark unterschiedliche Eigenschaften hinsichtlich des Transport-, Ablagerungs- und Adsorptionsverhaltens auf, was eine mathematische Beschreibung der Prozesse erschwert. Durch die hohe Ungleichförmigkeit verbunden mit dem hohen Anteil kohäsiv wirkenden Feinkorns ist die Ausbildung sehr kompakter und damit auch schwer mobilisierbarer Sedimente wahrscheinlich. Eine Bestimmung der Lagerungsdichte war mit der hier angewandten Beprobung nicht möglich. Jedoch fanden Banasiak et al. (2005) für Sediment mit annähernd gleicher Korngrößenverteilung eine Dichte von 2050 bis 2300 kg/m^3 , was der Reindichte von Sand schon sehr nahe kommt. Über die Tiefe weisen die Ablagerungen geringe Unterschiede in der Kornverteilung auf.

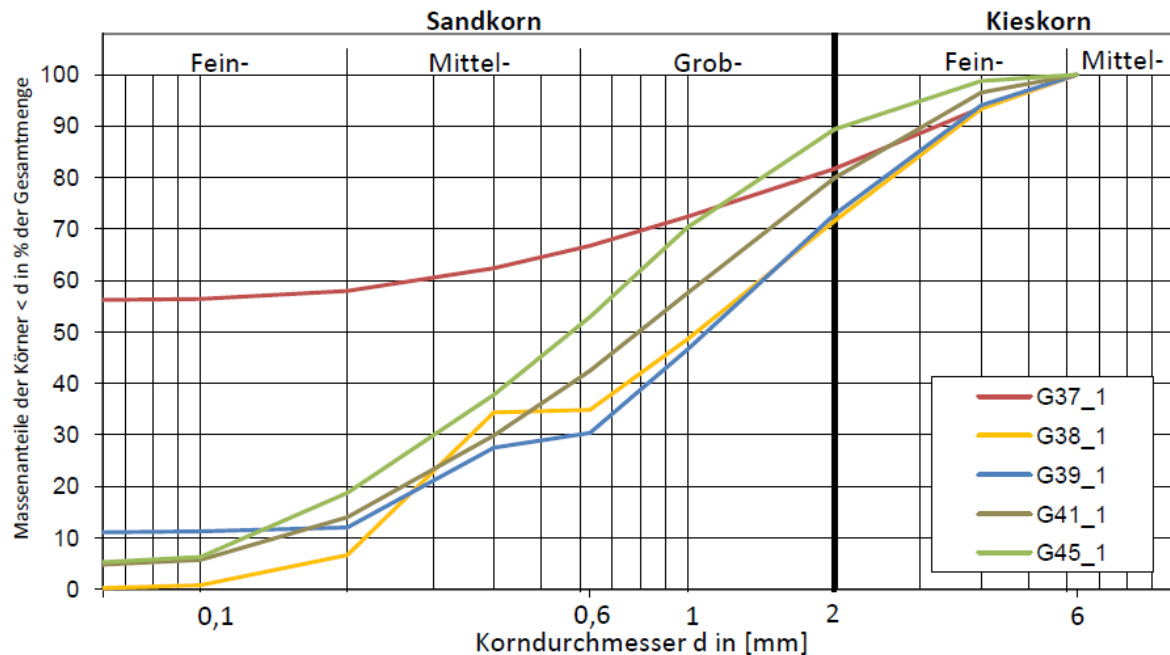


Abbildung 9: Sieblinien der Ablagerungen an den einzelnen Schächten in Oberschicht

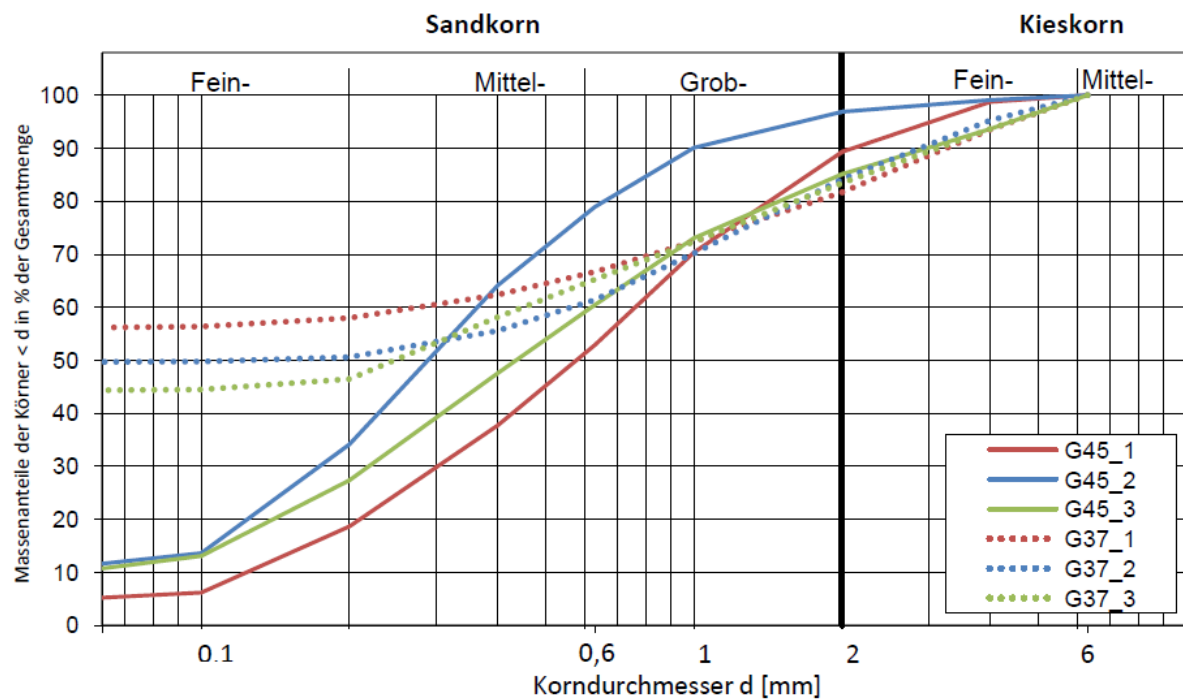


Abbildung 10. Kornverteilung über in Oberschicht(1) , Mittelschicht (2) und Sohlschicht (2) in den Schächten G37 und G45

Erwartungsgemäß ist der organische Anteil im Feinkornanteil am höchsten und nimmt mit der Korngröße bis auf die Größenklasse von 0,4 bis 0,63 ab. Oberhalb ist wiederum ein Anstieg ohne klaren Trend zu erkennen. In diesem Bereich befinden sich zum Teil organische Einzelpartikel wie Obstkerne, Holzstücke, Laub und Papierreste. Der organische Anteil ist in der sohlnahen Schicht durchgängig am höchsten und nimmt nach oben hin ab. Dies wird auf die höheren Scherkräfte an der Grenzfläche zum Wasser zurückgeführt, welche die organischen Bestandteile leichter auswaschen und eine Biofilmbildung und Ansiedlung von Bakterien und Kleinstlebewesen erschweren. Organische Anteile wirken in starkem Maße kohäsiv, insbesondere wenn es sich dabei um Biofilme handelt, welche zur Fixierung an den Oberflächen extrapolymere Substanzen nutzen. Dies erhöht zusätzlich zur hohen Lagerungsdichte die erforderlichen Schubkräfte zur Remobilisierung.

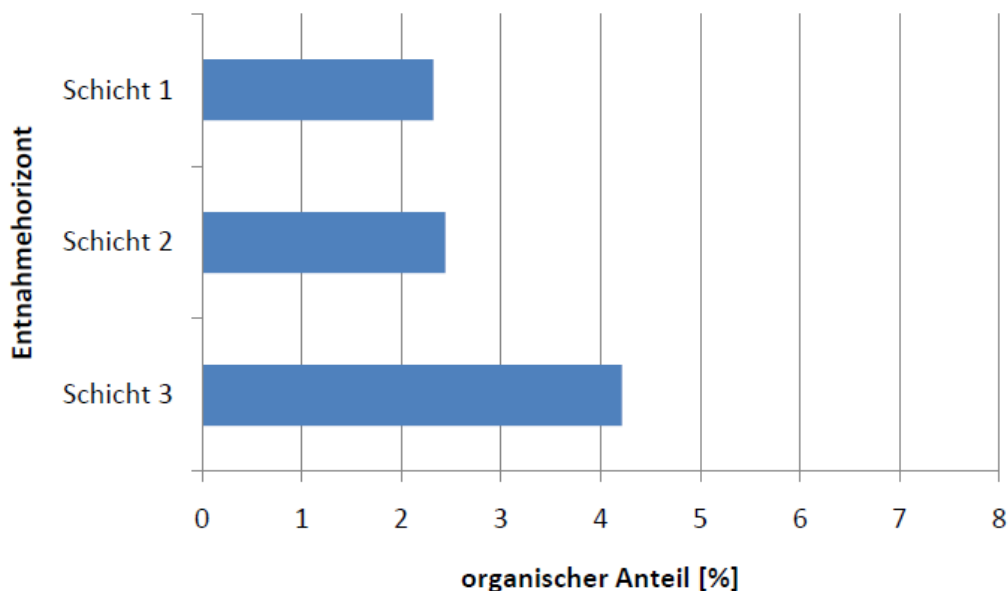
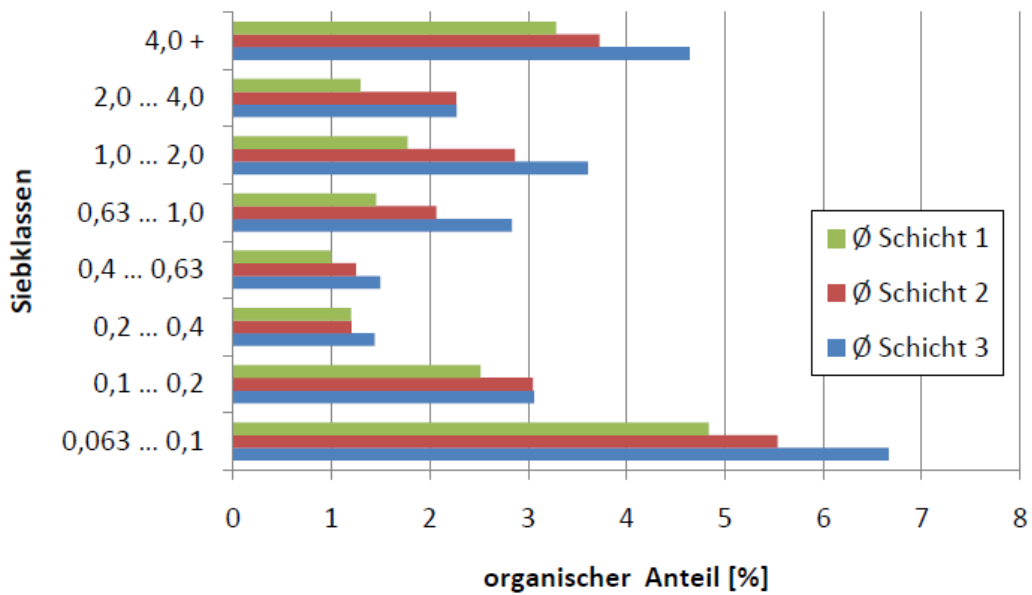


Abbildung 11: organischer Anteil in den einzelnen Entnahmehorizonten, getrennt nach Kornklassen (Stock, 2011)

5.3.2 Sedimentdynamik

Die Messung von Durchfluss und Füllstand mit der oben beschriebenen Messanordnung gestaltete sich sehr wartungsintensiv und ist durch mehrere Messwertausfälle bzw. unplausible Messdaten gekennzeichnet. Offensichtliche Fehlmessungen bzw. Messwertausfälle wurden aus der Datenreihe entfernt. Auch bei den verbleibenden Daten sind noch unplausible Messwerte enthalten. Dies betrifft insbesondere Messungen während und nach Volleinstau. Die Ultraschallmessung benötigt einen Mindestabstand zum Medium von ca. 10 cm. Kleinere Werte werden nicht erkannt. Nach Benetzung der Sonde mit Abwasser sind aufgrund des Wasserfilms oder von Tropfenbildung die Messwerte ebenfalls noch längere Zeit unsicher. Da der Messwert in die Berechnung der Sedimenthöhe eingeht, wird insbesondere bei und nach Ereignissen mit Vollfüllung die kurzfristige Dynamik fehlerhaft wiedergegeben. Bei kleineren Ereignissen tritt dieser Fehler nicht auf.

Sehr gut lässt sich die langfristige Entwicklung der Sedimenthöhe verfolgen (Abbildung 12). Die Messkampagne begann ca. 3,5 Jahre nach der letzten Spülung des Sammlers. In diesem Zeitraum hatten sich an der Messstelle ca. 8,5 cm Ablagerungen gebildet. Kurz nach Beginn der Messungen

stieg die Ablagerungshöhe ereignisbedingt um ca. 1 cm. Auch danach unterlag sie weiteren Schwankungen, wuchs über den Gesamtzeitraum jedoch nicht weiter an.

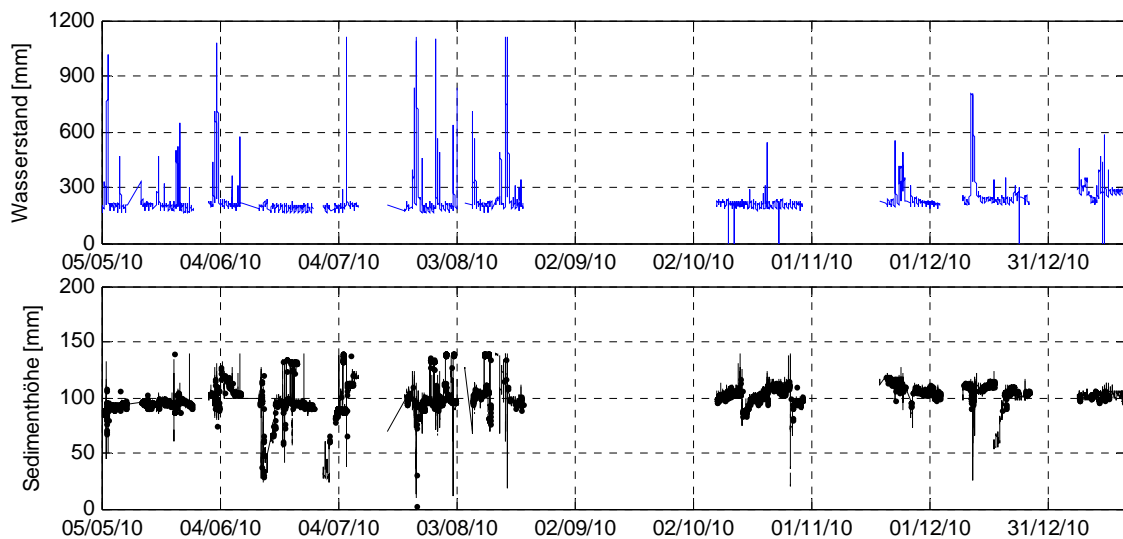


Abbildung 12: Wasserstandsmessung und berechnete Sedimenthöhe über einen Beobachtungszeitraum von 9 Monaten

Interessant ist dabei die Dynamik der Ablagerungsbildung während des ersten Niederschlagsereignisses im Beobachtungszeitraum (Abbildung 13). Es handelt sich dabei um einen relativ schwachen, lang anhaltenden Niederschlag mit einer Dauer von ca. 24 Stunden und einer Gesamtniederschlagshöhe von 14,3 mm. Es ist deutlich zu erkennen, dass zu Beginn des Ereignisses zusätzliches Sediment eingetragen und bei einer Fließgeschwindigkeit von 0,4 bis 0,6 m/s abgelagert wird. Die Ablagerungshöhe steigt um ca. 8 mm. Im weiteren Verlauf steigt die Fließgeschwindigkeit auf ca. 0,9 m/s und die Sohlschubspannung auf max. 1,65 N/m². Diese reicht offensichtlich nicht aus, um die abgelagerten Sedimente wieder zu mobilisieren. In der konkreten Haltung werden auch bei Vollfüllung nur geringfügig höhere Schubspannungen von maximal 1,7 N/m² und eine maximale Fließgeschwindigkeit von 0,95 m/s erreicht. Diese hydraulischen Bedingungen reichen für eine Selbstreinigung des Kanals offensichtlich nicht aus.

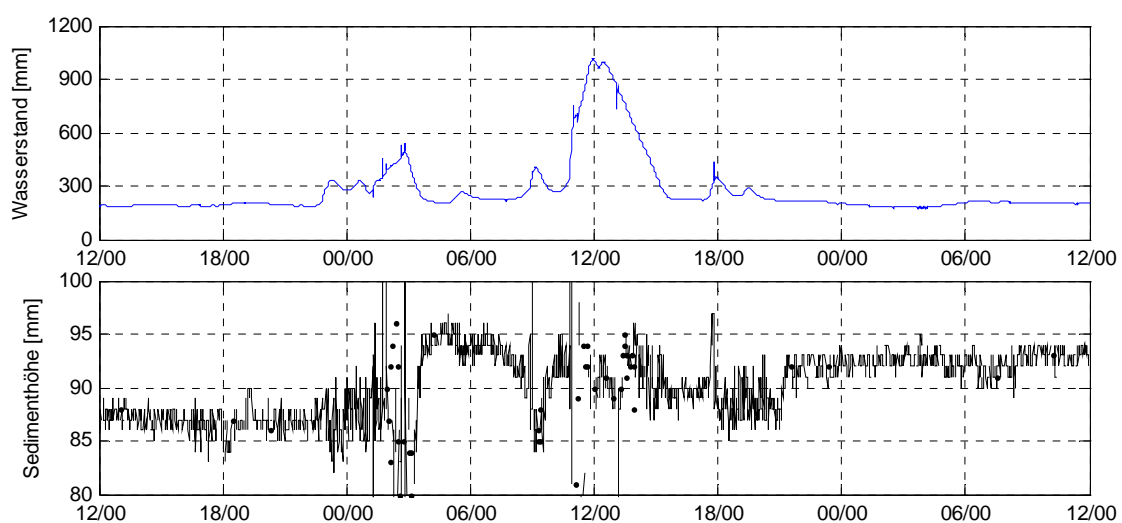


Abbildung 13: Ausschnitt Online-Messung des Wasserstandes und der Ablagerungshöhe (Schacht 24G37)

Die Ablagerungsbildung wird damit offensichtlich in starkem Maße durch den Eintrag ablagerungsfähigen Materials während der Niederschlagsereignisse und die hydraulischen Bedingungen während des Eintrags bestimmt. Wird in dieser Phase aufgrund limitierter Transportkapazität Material abgelagert, ist eine spätere Mobilisierung schwierig. Im weiteren Verlauf ist mit einer weiteren Verfestigung der Sedimente durch Verdichtung und biologische Aktivität zu rechnen, was den erforderlichen Mobilisierungsschwellwert weiter erhöht. Im konkreten Sammler wird dieser aufgrund des geringen Gefälles auch bei Vollfüllung nicht mehr erreicht.

5.3.3 In-situ Untersuchungen zur Mobilisierbarkeit der Ablagerungen

Welche Mobilisierungsschubspannung letztlich erforderlich ist, lässt sich aus den Messungen aufgrund der hydraulischen Limitierung nicht ableiten.

Parallel zum REGKLAM-Projekt wurden im gleichen Sammler jedoch auch gezielte Mobilisierungsversuche durchgeführt. Die Methode und die Apparatur wurden im Rahmen des DFG-Projekts "Organikreiche Kanalsedimente" (ORG-KS) entwickelt. Dabei wird ein doppelwandiger Zylinder direkt in die Ablagerungen gerammt und im inneren Zylinder mit Hilfe eines kalibrierten Rührwerks in situ die Sohlschubspannung stufenweise erhöht. Parallel wird mit einer dynamischen Extinktionsmessung kontinuierlich die mittlere Partikelgröße und Partikelkonzentration gemessen. Die Messwerte werden durch parallele Stichproben auf den partikulären CSB kalibriert. Der Anstieg des CSB ist dabei ein Indikator für die Mobilisierung der Ablagerungen. Die direkte Messung der mineralischen Ablagerungen ist aufgrund experimenteller Limitierungen nicht möglich. Eine vollständige Darstellung des Versuchsaufbaus und der erzielten Ergebnisse wird demnächst in (Hoeft, 2011) publiziert.

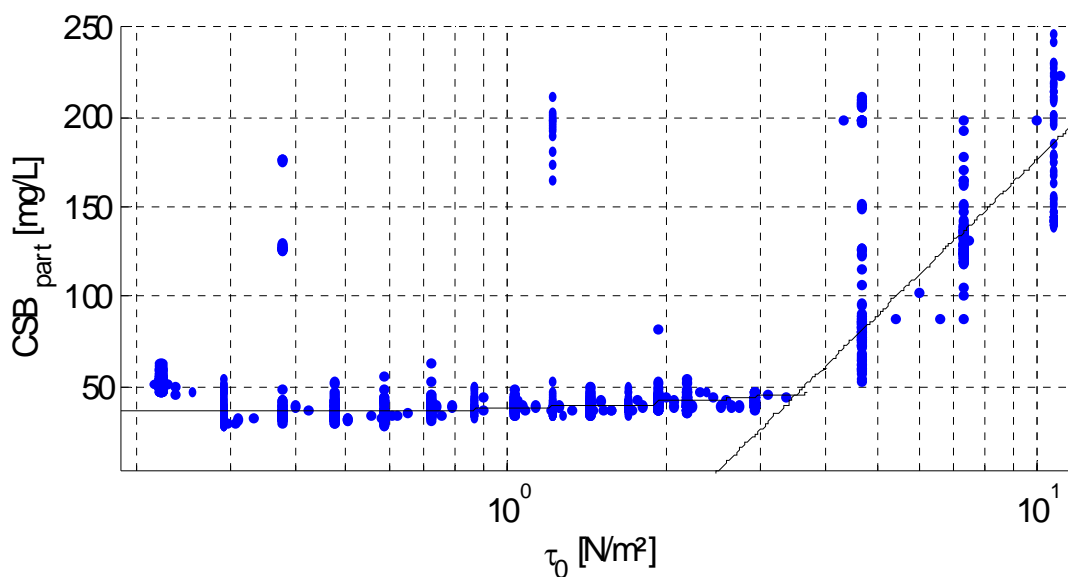


Abbildung 14: Gemessene Entwicklung des partikulären CSB bei kontrollierter Steigerung der Sohlschubspannung in den Ablagerungen des Sammlers Flensburger Straße

Abbildung 14 zeigt den charakteristischen Verlauf einer solchen in-situ Messung. Bis zu einer Sohlschubspannung von ca. 3,5 N/m² ändert sich der Ausgangswert des partikulären CSB nicht. Oberhalb dieses Wertes bricht die Ablagerung auf und eingeschlossene organische Schmutzstoffe werden freigesetzt. Der damit verbundene CSB-Anstieg ist proportional zum Logarithmus des Schubspannung. Der Übergang vom stationären zum logarithmischen CSB-Verlauf kann als kritische Mobilisierungsschubspannung gedeutet werden. Dieser kritische Grenzwert variierte bei den Messungen zwischen 2 und 4 N/m², wobei sich ein leichter, jedoch nicht signifikanter, positiver Zusammenhang zwischen der Anzahl der Trockenwettertage und der kritischen Mobilisierungsschubspannung zeigte. Offensichtlich reichen bereits wenige Tage (ca. 3 - 5) bis zur Ausbildung kohäsiver Sedimente aus. Längere Trockenperioden führen zu keiner weiteren Erhöhung der erforderlichen Schubspannung. Allerdings erhöhen lange Trockenperioden das Schmutzfrachtpotential und damit die eingetragenen Sedimentfrachten im Ereignisfall.

6. Theoretische Untersuchungen zur Ablagerungsbildung mit Hilfe eines Sedimenttransportmodells

6.1 Veranlassung und Zielstellung

Für den gleichen Kanalnetzabschnitt wurden parallel zu den Messungen modelltechnische Untersuchungen durchgeführt, welche insbesondere zwei Zielstellungen verfolgten. Einerseits sollte untersucht werden, inwieweit mit Hilfe eines einfachen Gesamttransportmodells sich die oben gefundenen Zusammenhänge reproduzieren lassen. Andererseits sollte auf modelltechnischer Ebene analysiert werden, inwieweit die Ablagerungshöhe selbst Einfluss auf die Ablagerungsbildung hat.

6.2 Untersuchungsansatz

Für die modelltechnischen Analysen wurde ebenfalls der messtechnisch untersuchte Sammler (Ei-Profil 1200/800, Gefälle: 0,63 ‰) verwendet. Es wurden verschiedene Ablagerungshöhen im Bereich von 0 bis 500 mm angenommen und die Auswirkungen auf die Schubspannung und die Transportkapazität in Abhängigkeit vom Durchfluss berechnet. Zur Berechnung der Transportkapazität wurde bewusst das relativ einfache Gesamttransportmodell von Pernecker und Vollmers (1965) verwendet, da dieses in früheren Untersuchungen für das Dresdner Kanalnetz plausible Ergebnisse erzielt hatte (Gebhard, 2008) und aufgrund seiner Modellstruktur keine Möglichkeit für einer nutzerabhängige Parameterwahl bietet. Wie andere Transportformeln, verwendet der originale Ansatz einen mittleren Partikeldurchmesser d_{ch} und eine mittlere Partikeldichte ρ_s . Die Besonderheit des Ansatzes besteht darin, dass er den dimensionslosen Transportparameter Φ direkt aus dem Verhältnis des aktuellen Shields-Parameters θ zum kritischen θ_{cr} herleitet. Damit wird der breitenstufenförmige Massestrom m_s ausschließlich auf Basis physikalisch determinierter Größen, ohne den Einsatz von Kalibrierparametern berechnet. Wie viele Sedimenttransportmodelle wurde auch dieser Ansatz ursprünglich für den Feststofftransport in Fließgewässern hergeleitet und berücksichtigt keine Kohäsion oder organische Verfestigung, wie sie für Kanalnetzsedimente typisch sind. Verschiedene Anwendungen zeigen jedoch, dass trotz dieser Einschränkungen mit pragmatischen Annahmen plausible Ergebnisse auch für Transportprozesse im Kanalnetz erzielt werden können (Gebhard, 2008, Tränckner et al., 2008, Vetter, 1992).

$$m_s = \Phi \cdot \rho_s \cdot d_{ch} \cdot \sqrt{g \cdot \left(\frac{\rho_s}{\rho_F} - 1 \right)} \cdot d_{ch} \quad 1$$

[kg/(m·s)]

$$\Phi = \theta^{3/2} \cdot \left(\frac{\theta}{\theta_{cr}} - 1 \right) \quad 2$$

$$\theta = \frac{\tau_0}{(\rho_s - \rho_F) \cdot g \cdot d_{ch}} \quad 3$$

Für die Untersuchungen wurde mit folgenden Annahmen gerechnet:

Mittlerer Partikeldurchmesser	d_{ch}	1 mm
Mittlere Partikeldichte	ρ_s	2,5 kg/l
Manning-Strickler-Beiwert Kanal	$k_{st,Wand}$	80 m ^{1/3} /s
Manning-Strickler-Beiwert Sediment	$k_{st,Sed}$	80 m ^{1/3} /s
Wassertemperatur	T	10°C

6.3 Ergebnisse

Die Bildung von Ablagerungen führt zu einer Einschränkung der hydraulischen Kapazität des Sammlers. Damit steigen bei gleichen Durchflussverhältnissen die Teilfüllungsverhältnisse an (Abbildung 15, oben). Entsprechend schneller wird auch die Volfüllung erreicht, verbunden mit dem charakteristischen „Zuschlagen“ des Kanals und einem deutlichen Rückgang des Durchflusses.

Damit sinkt auch der maximale fließbreitenspezifische Massenstrom m_s [kg/(m·s)] (Abbildung 15, Mitte). Parallel steigt durch die Ablagerungen jedoch bei gleichem Durchfluss auch die Fließbreite. Insbesondere bei niedrigen Teilfüllungsverhältnissen steigt damit bei Vorhandensein von Ablagerungen die berechnete Transportkapazität. In Abbildung 15 (unten) ist die daraus abgeleitete transportierbare Partikelkonzentration dargestellt. Es ist deutlich zu erkennen, dass im Bereich bis ca. 40% des Abflusses bei Volfüllung rechnerisch deutlich höhere Partikelkonzentrationen transportiert werden können, je nach Ablagerungshöhe und Abflusssituation um bis zu 30%. Dieses physikalische Paradoxon wurde bereits von anderen Autoren beschrieben und hat auch Eingang in die britische Bemessungsrichtlinie für abgelagerungsfreie Rohre gefunden (Ackers et al., 1996). Diese theoretischen Betrachtungen sind jedoch nur mit Vorbehalt auf reale Verhältnisse übertragbar. Insbesondere die komplexen Prozesse an der Grenzfläche von Sediment und Wasserphase lassen sich damit nicht beschreiben.

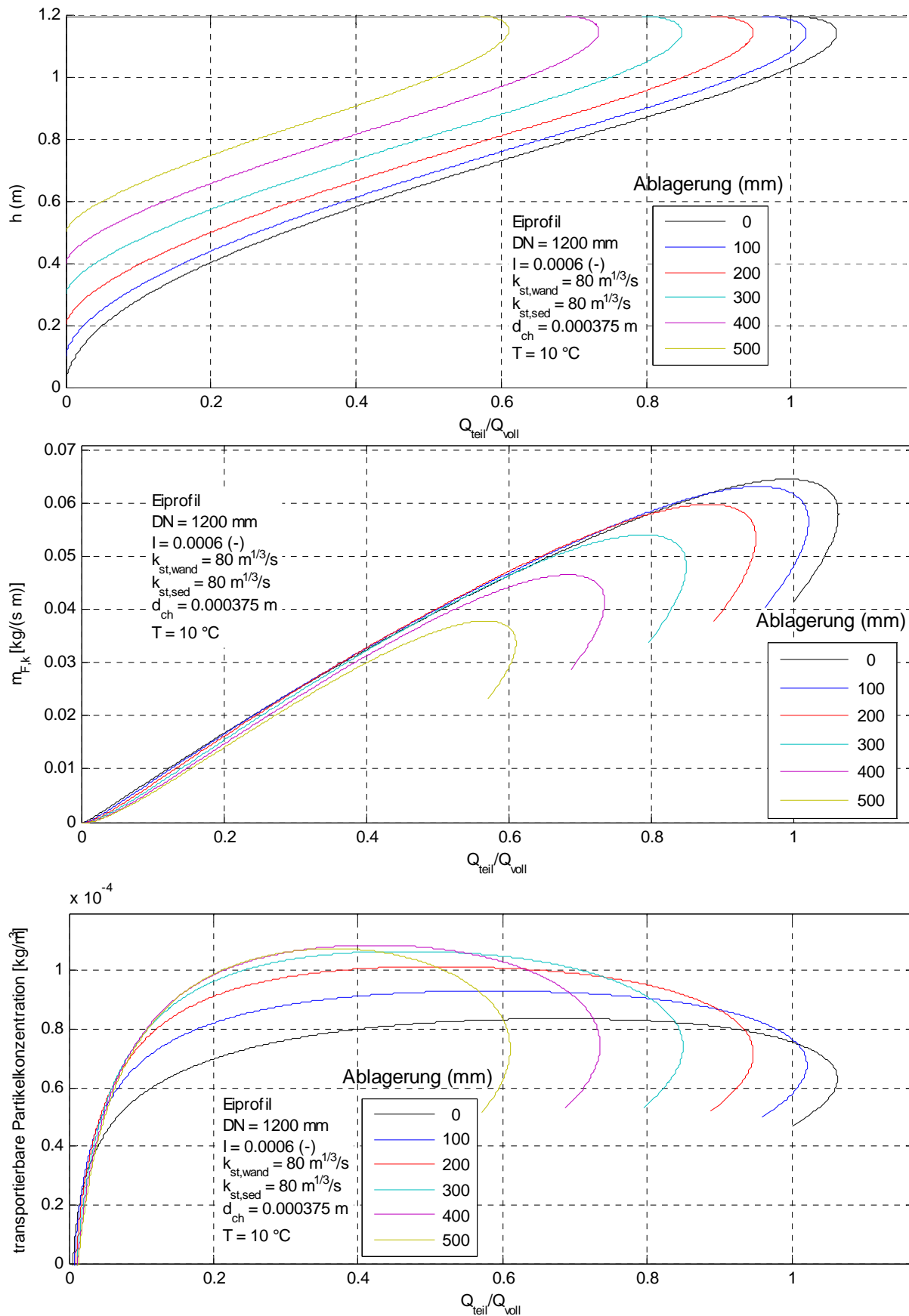


Abbildung 15: a) Einfluss von Ablagerungen auf die Teilfüllungsverhältnisse
 b) Einfluss von Ablagerungen auf den breitenspezifischer Massenstrom
 c) Einfluss von Ablagerungen auf die transportierbare Partikelkonzentration

Für den Betrieb von Kanalnetzen ergibt sich damit die Fragestellung, ob eine gewisse Ablagerungsbildung zugelassen werden kann, falls sich dadurch in einem tolerierbaren Bereich ein Gleichgewichtszustand einstellt, der eine weitere Kanalnetzreinigung entbehrlich macht. Dies hängt allerdings in starkem Maße vom ereignisabhängigen Partikeleintrag und den zugehörigen hydraulischen Bedingungen ab. Weiterhin ist zu beachten, dass die nicht abgelagerten Partikel nun unterstrom zu einer Erhöhung der Partikelfracht führen. Weiterhin verlagern sich auch tolerierte Ablagerungen langsam als Geschiebe in tiefer liegende Kanalnetzbereiche. Diese sehr komplexen Prozesse lassen sich gegenwärtig, insbesondere in ihrer langfristigen Entwicklung, nur eingeschränkt mit vorhandenen Sedimenttransportmodellen beschreiben.

6.4 Schlussfolgerungen

Aus der Kombination der oben beschriebenen Untersuchungen lassen sich folgende Schlussfolgerungen zur Sedimentbildung ziehen:

- Persistente Sedimente bilden sich insbesondere durch den Eintrag mineralischer Partikel mit Niederschlagswasser.
- Insbesondere schwache Niederschlagsereignisse, die auf ein hohes Verschmutzungspotential auf der Oberfläche stoßen, sind kritisch für die Ablagerungsbildung, da hier hohe Partikelkonzentrationen und geringe Transportkapazität zusammenfallen.
- Einmal sedimentierte Partikel können nachfolgend durch Verfestigung und organisch bedingte Kohäsion nur noch schwer mobilisiert werden. Nach eigenen Untersuchungen liegen die erforderlichen Mobilisierungsschubspannungen im Bereich von 2 bis 4 N/m²
- Je nach konkreter Randbedingung kann sich jedoch ein Gleichgewichtszustand durch die Bildung von Ablagerungen einstellen. Ob und auf welchem Niveau lässt sich insbesondere für das Gesamtnetz gegenwärtig modelltechnisch kaum beschreiben. Hierfür ist vor allem noch ein besseres Prozessverständnis, sowohl für den Partikeleintrag als auch das Verhalten abgelagerter Sedimente erforderlich.

Der Bezug zu klimatisch bedingten Veränderungen der Niederschlagscharakteristik lässt sich gegenwärtig jedoch auf Basis eines konzeptionellen Gedankenmodells herstellen. Eine Verschiebung der Niederschlagssummen in die Wintermonate wird für diesen Zeitraum eher für geringere Sedimentbildung sprechen, da für diesen Zeitraum die Akkumulationsphasen an der Oberfläche kurz und die Abflüsse (verstärkt durch Fremdwasser) hoch sind. In den Sommermonaten steigen tendenziell die Akkumulationsphasen und damit das Verschmutzungspotential. Dieses wird dann in Summe von weniger Niederschlag abgewaschen und transportiert, so dass in dieser Periode mit verstärkten Ablagerungen zu rechnen ist.

7. Bewertung der Ablagerungsneigung im Kanalnetz der Stadt Dresden unter Einbeziehung klimatischer Einflussgrößen

7.1 Bewertungskriterien

Um die Ablagerungsneigung von Kanalnetzabschnitten abzuschätzen ergeben sich aus vorgenannten Untersuchungsergebnissen drei Kriterien:

1. **Ablagerungsbildung bei Trockenwetter:** Hier wird empfohlen dem Spülfrachtansatz von Macke (1982) zu folgen, der auch im DWA-A 110 genutzt wird. Dieser lässt sich unter Annahme einheitlicher Partikeleigenschaften und Konzentrationen vereinfacht durch Gleichung 4 ausdrücken.

$$\tau_{0,\min} = n \cdot Q^{1/3} \quad 4$$

Die Annahmen von Macke (1982) sind für schmutzwasserbürtige Abwasserinhaltsstoffe allerdings sehr sicherheitsorientiert. Von ihm wird für Mischwassersammler der Faktor $n = 4,1$ vorgeschlagen. Unter Ansatz typischer Schmutzwasserhältnisse ergeben sich aber eher Faktoren zwischen 0,5 und 1,0 (Tabelle 3). Die bisherigen Untersuchungsergebnisse belegen, dass die Bildung organischer Sedimente auch bei geringen Fließgeschwindigkeiten kaum stattfindet.

Für mineralische Sedimente kann mit dem dem Ansatz $\tau_{0,\min} = 4,1 \cdot Q^{1/3}$ die Bildung von Sedimenten selbst bei Trockenwetterabfluss nahezu vollständig ausgeschlossen werden.

Tabelle 3 oben: Charakteristik von Kanalnetz-Sedimenten nach CIRIA (1996)
unten: abgeleitete Sinkgeschwindigkeiten und erforderliche Faktoren n (gemäß Gleichung 4)

Herkunft	Normaler Transportmodus	Konzentration [mg/L]			Median der Partikelgröße d_{50} [μm]			Dichte [kg/L]		
		gering	mittel	groß	gering	mittel	groß	gering	mittel	groß
Schmutzwasser	Suspension	100	350	500	10	40	60	1,01	1,4	1,6
Regenwasser	Suspension	50	350	1000	20	60	100	1,1	2,0	2,5
Grit	Geschiebe	10	50	200	300	750	1000	2,3	2,6	2,7
Herkunft	Normaler Transportmodus	Sinkgeschwindigkeit [m/s]			Faktoren = $\tau_{0,\min}/Q^{1/3}$					
		gering	mittel	groß	gering	mittel	groß			
Schmutzwasser	Spülfracht	$4 \cdot 10^{-7}$	$3 \cdot 10^{-4}$	$9,2 \cdot 10^{-4}$	0.012	0.46	0.94			
Regenwasser	Spülfracht	$2 \cdot 10^{-5}$	$1,5 \cdot 10^{-3}$	$6,28 \cdot 10^{-3}$	0.060	1.08	3.10			

2. **Ablagerungsbildung bei Regenwetter:** Die Ablagerungsbildung bei Regenwetter ist, wie oben diskutiert, insbesondere bei schwachen Ereignissen zu erwarten und kann temporär in nahezu allen Kanalnetzabschnitten auftreten. Es wird immer Ereigniskombinationen geben, die hohe Partikeleinträge mit geringen Durchflüssen kombinieren. Dieses Kriterium ist deshalb schwer prüfbar.
3. **Mobilisierung von Ablagerungen bei Regenwetter:** Relativ gut überprüfbar ist hingegen das Mobilisierungskriterium. Hier sollten zumindest bei einem Starkregen die erforderliche Mobilisierungsschubspannung überschritten werden, um vorhandene Ablagerungen zu lösen. Wird die-

ser Wert nie erreicht, ist die Bildung permanenter Ablagerungen wahrscheinlich. Welche Mobilisierungsschubspannung erforderlich ist, hängt in starkem Maße von der Zusammensetzung und dem Verfestigungsgrad der Sedimente ab. Nach den oben beschriebenen Versuchsergebnissen, kann das Minimum für τ_{krit} mit ca. 2 N/m² festgelegt werden. Ab 4 N/m² ist mit einer weitgehenden Mobilisierung zu rechnen.

Über das Kriterium 3 lassen sich mit Einschränkungen klimatisch bedingte Veränderungen abfragen. So lässt sich die Häufigkeit der zu erwartenden Mobilisierung aus der veränderten Starkregenstatistik abschätzen. Da aber gerade die Bildung von Ablagerungen durch schwache Ereignisse gegenwärtig kaum prognostizierbar ist, ergeben sich ggf. auch falsche Schlussfolgerungen.

Für die Identifizierung ablagerungsanfälliger Haltungen wurden die Kriterien 1 und 3 kombiniert und daraus Ablagerungsklassen definiert. In Tabelle 4 sind die Klassen und ihre quantitativen Bewertungskriterien zusammengefasst. Das Ablagerungsrisiko sinkt mit aufsteigender Klassennummer.

Tabelle 4: Bewertungskriterien zur Identifizierung der Ablagerungsneigung im Dresdner Kanalnetz

Nr.	Kriterium	verbale Bewertung
1	$\tau_{0,m} < 1 \text{ N/m}^2$	extrem ablagerungsgefährdet, keine Mobilisierung bei Starkregenereignissen möglich
2	$1 \text{ N/m}^2 \leq \tau_{0,m} < 2 \text{ N/m}^2$	ablagerungsgefährdet Mobilisierung bei Starkregenereignissen unwahrscheinlich
3	$2 \text{ N/m}^2 \leq \tau_{0,m} < 4 \text{ N/m}^2$	gering ablagerungsgefährdet Mobilisierung bei Starkregenereignissen wahrscheinlich, bei stark verfestigten Sedimenten ggf. persistent
4	$\tau_{0,m} > 4 \text{ N/m}^2$	nur temporäre Ablagerungen bei Trockenwetter ausreichende Mobilisierung bei Starkregenereignissen
5	$\tau_{0,t} = 4,1 \cdot Q^{1/3}$	unkritisch, bereits ausreichende Spülfracht im Trockenwetterabfluss

Die Kriterien wurden durch hydrodynamische Modellierung des Kanalnetzes der Stadt Dresden bestimmt. Dazu wurde das kalibrierte Hystem-Extran-Modell des Kanalnetzes (itwh GmbH) in SWMM 5.0 konvertiert und für den Trockenwetterzustand und ausgewählte Starkregen simuliert. Als Wiederkehrintervalle wurden 1, 2, 5 und 10 Jahre gewählt. Die Starkregen wurden der KOSTRA-Tabelle des DWD entnommen und in Modellregengruppen nach Otter-Königer überführt. Die Niederschlagsverteilung nach Otter-Königer wurde durch Auswertung historischer Starkniederschläge abgeleitet (Hohlfeld, 2009). Das Kanalnetz wurde jeweils nach Einschwingen des Trockenwetterzustandes mit den Niederschlagsereignissen der Dauerstufe 30 min. und 60 min. belastet. Diese Dauerstufen sind nach Ergebnissen von Hohlfeld (2009) in der Regel die hydraulisch maßgeblichen, wobei die kurze Dauerstufe eher für die Anfangshaltungen maßgebend sind und der 60-Minuten-Regen für die unterhalb liegenden Kanalnetzabschnitte. Aus den aufgezeichneten hydraulischen Größen (Durchfluss, Geschwindigkeit) wurden jeweils die Maximalwerte extrahiert und die Sohl-schubspannung unter Annahme eines ablagerungsfreien Profils berechnet. Die Doppelbelegung von Klassen wurde ausgeschlossen, indem immer die größtmögliche Klassen-Nummer zugeordnet wurde. D.h. Haltungen, die bereits im Trockenwetterfall unkritisch sind (Klasse 5), werden immer dieser Klasse zugeordnet, auch wenn sich für den Regenwetterabfluss eine andere Klassifizierung ergibt.

7.2 Ergebnisse und Schlussfolgerungen

Abbildung 16 zeigt die Niederschlagsverteilung für die Dauerstufe 60 min., mit dem das Kanalnetz flächendeckend belastet wurde. Die Niederschlagssummen nehmen mit der Jährlichkeit zu. Daraus lässt sich zumindest qualitativ ein Zusammenhang zum erwarteten Klimawandel in der Region ab-

leiten. Hier wird insbesondere für die kurzen Wiederkehrintervalle mit einem Anstieg der Intensitäten gerechnet. D.h. durch die projizierten Veränderungen der Niederschlagscharakteristik treten im Kanalnetz künftig häufiger intensive Abflüsse auf, welche ggf. die erforderliche Mobilisierungsschubspannung erreichen.

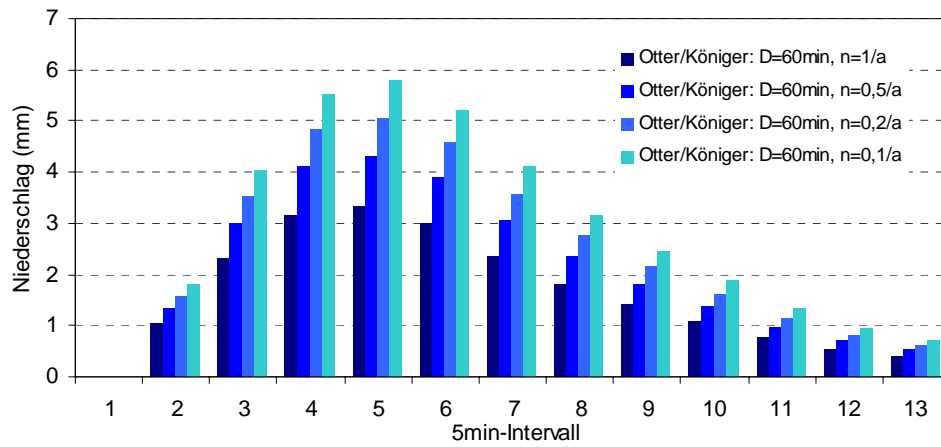


Abbildung 16: Niederschlagsverteilung nach Otter-Königer für die Dauerstufe 60 min. und die verschiedenen Jährlichkeiten

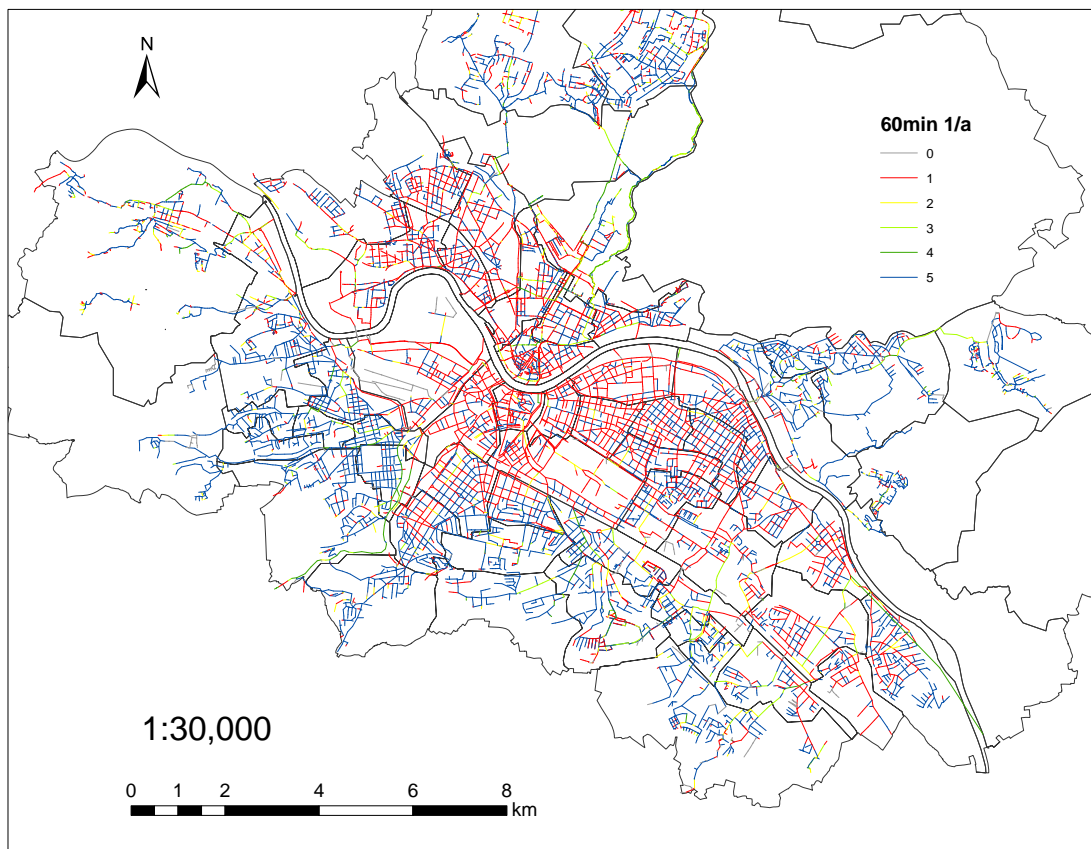


Abbildung 17: Ablagerungsklassen gemäß Tabelle 4 für ein Starkregenereignis mit $n = 1/a$ im Dresdner Netz

Die Zwischenklassen mit gemäßigter Ablagerungsneigung machen nur einen relativ geringen Anteil am Gesamtnetz aus. Mit sinkender Niederschlagshäufigkeit (= wachsender Intensität des Ereignisses) findet eine leicht Umverteilung in die Klassen 1 bis 3 statt. Allerdings sind die Verschiebungen relativ gering (Tabelle 6). Die größten Veränderungen finden in den mittleren Profilgrößen von 750 bis 1000 mm statt. Damit lässt sich mittelbar schlussfolgern, dass eine klimatische Verschiebung der Regenintensitäten nur einen untergeordneten Einfluss auf die Mobilisierbarkeit von Ablagerungen haben. Die Ablagerungsneigung ist maßgeblich konstruktiv bedingt, so dass selbst bei Maximalabfluss keine ausreichende Schubspannung erreicht wird.

Tabelle 6: Änderung der Ablagerungsklassen hinsichtlich Anzahl und Länge für alle Jährlichkeiten

Klassenänderung	Anzahl Haltungen	Anteilige Änderung	Länge in km	Anteilige Länge
1 zu 2	1324	6%	87	7%
1 zu 3	469	2%	24	2%
1 zu 4	224	1%	10	1%
1 zu 5	0	0%	0	0%
2 zu 3	407	2%	26	2%
2 zu 4	126	1%	10	1%
2 zu 5	0	0%	0	0%
3 zu 4	228	1%	14	1%
Summe	2778	13%	170	15%

Auf der Eintragsseite wird demgegenüber mit einem Anstieg bei sinkenden Jahresniederschlagsmengen bzw. zunehmenden Trockenwetterperioden gerechnet (vgl. Abschnitt 4). In der Kombination beider Aussagen lässt sich vorsichtig schlussfolgern, dass die erwarteten klimatischen Änderungen zu einem gemäßigten Anstieg von Sedimenten im Kanalnetz führen, wobei die Ablagerungsschwerpunkte im Bereich der großen Profile mit durchgängig schwachen Gefälleverhältnissen liegen.

Für die Bewirtschaftung von Kanalsedimenten ergeben sich damit vor allem Ansatzpunkte bei

- der Minimierung des Eintrags
- Optimierung der Reinigungspläne für das Kanalnetz
- Reduzierung des spezifischen Aufwandes für die Reinigung (insbesondere für die Reinigung der Großprofile)

8. Optimierung des Sedimentmanagements

8.1 Grundlagen

Maßnahmen zum Sedimentmanagement lassen sich nach verschiedenen Kriterien klassifizieren: Investiv/Betrieblich, langfristig/kurzfristig. Dabei korrelieren kurzfristige eher mit betrieblichen Maßnahmen und langfristige eher mit investiven. Nachfolgend werden mögliche Maßnahmen nach ihrer zeitlichen Einordnung gruppiert:

Kurzfristige Maßnahmen

- Formalisieren des Ablaufs zur Festlegung von Reinigungsintervallen
- Systematische Erfassung und Dokumentation von Bürgermeldungen
- Systematische Erfassung und Dokumentation von Ablagerungen im Zuge von Inspektionen, Kanalnetzreinigung und sonstigen Arbeiten am Netz

Mittelfristige Maßnahmen

- Optimieren der Spülpläne auf Grundlage erfasster Daten (damit Anpassung an tatsächlichen Reinigungsbedarf und Anpassung an sich ändernde Randbedingungen möglich)
- Einsatz von Spülklappen,
- Optimierung der Reinigungstechnik von Großprofilen
- Kanalnetzsteuerung zur Bewirtschaftung der Sedimente (teilweise möglich)
- Beseitigung punktueller, konstruktiv bedingter Ablagerungsschwerpunkte

Langfristige Maßnahmen

- Problembewusstsein und Akzeptanz schaffen
- Abstimmung zwischen Straßenreinigung und Kanalnetzreinigung
- Infrastrukturelle Anpassungen im Zuge von Erneuerung und Renovierung

Maßnahmen zur Minimierung des Eintrages wurden in diesem Projekt nicht vertiefend untersucht. Verschiedene Veröffentlichungen weisen darauf hin, dass durch eine optimierte Straßenreinigung eine deutliche Reduzierung des Sedimenteintrages erreichbar ist. Daneben gibt es einige Untersuchungen zur Wirksamkeit von konstruktiven Sonderlösungen für Straßeneinläufe (z.B. Nassgully), welche ebenfalls in Betracht gezogen werden können. Allerdings ist die regelmäßige Entleerung dieser Straßeneinläufe von entscheidender Bedeutung für ihre Wirksamkeit. Die hierfür erforderliche Aufwendungen sind dabei dem erwarteten Nutzen gegenüber zu stellen. Eine zusammenfassende Darstellung und Bewertung dieser und weiterer betrieblicher und technischer Möglichkeiten kann CD4WC (2006) entnommen werden.

Sofern langfristig kein grundsätzlicher Netzbau (z.B. großflächige Abkopplungsmaßnahmen) vorgesehen ist, beschränken sich konstruktive Maßnahmen in der Regel auf punktuelle Einzelfälle. Eine Veränderung der Gefälleverhältnisse ist in der Regel ausgeschlossen. Auch die Querschnittsverkleinerung ist in Mischwassernetzen meist keine Option. Damit fokussiert sich das Sedimentmanagement im Verantwortungsbereich des Entwässerungsbetriebes auf die organisatorische und technische Optimierung der Kanalnetzreinigung.

8.2 Organisation der Kanalnetzreinigung, Spülplan

8.2.1 Reinigungsstrategien für Kanalisationsnetze

Instandhaltungsstrategien bezeichnen „Rahmenrichtlinien bzw. grobe Handlungsanweisungen, die Art und Weise kennzeichnen, wie niedrige Instandhaltungskosten und eine hohe Anlagenverfügbarkeit zu erreichen sind.“ In Bezug auf die Kanalnetzreinigung lassen sich grundsätzlich drei Instand-

haltungsstrategien hinsichtlich Planmäßigkeit und Vorbeugungswirkung unterscheiden. Die Klassifizierung und Bewertung folgt weitgehend den Angaben von Hennerkes (2002).

Präventivstrategie (zeitdeterminiert)

Die Präventivstrategie in Form einer turnusgemäßen Systemreinigung ist die systematischste Vorgehensweise bei der Kanalreinigung. Die Kanalreinigung beginnt bei dieser Methode an den höchsten Punkten eines Kanalnetzes beziehungsweise Teilgebietes, von dem aus die Rohrabschnitte in Fließrichtung gereinigt werden. Die seitlich einmündenden Kanäle werden ebenfalls einer Reinigung unterzogen, bevor der weiterführende Abschnitt in Angriff genommen wird. Die Vor- und Nachteile sind aus Tabelle 7 ablesbar.

Tabelle 7: Vor- und Nachteile Präventivstrategie

Vorteile
Alle Kanalabschnitte werden turnusgemäß einer Reinigung unterzogen.
Nicht erkannte Ablagerungen und Teile der Sielhaut werden entfernt.
Hydraulische Probleme durch Ablagerungen werden unter Umständen im Entstehen beseitigt.
Die Arbeitsvorbereitung beschränkt sich auf ein Minimum.
Nachteile
Durch einen ständigen ungezielten Einsatz von Fahrzeugen, Personal und Ressourcen entstehen hohe Kosten.

Inspektionsstrategie (zustandsdeterminiert)

Eine bedarfsgerechte Reinigung (Inspektionsstrategie) ist möglich wenn das Ablagerungsverhalten einzelner Haltungen in den Spülplan einbezogen wird. Auf Grundlage dieser Erkenntnisse können Reinigungs- und Inspektionsintervalle bei Bedarf angepasst werden. Diese Reinigungsstrategie erfordert eine genaue Kenntnis der Ablagerungszustände und ermöglicht eine hohe Wirtschaftlichkeit. Allerdings ist der Aufwand zur Erstellung und Weiterentwicklung des Spülplans sehr hoch. Bei kontinuierlicher Arbeit mit und an dem Spülplan ergibt sich aber mittelfristig ein sehr guter Einblick in das Netz.

Tabelle 8: Vor- und Nachteile Inspektionsstrategie

Vorteile
Personal, Fahrzeuge, Energie- und Wasser werden zielgerichtet und auftragsbezogen eingesetzt.
Es werden nur Kanalabschnitte gereinigt, die einer Reinigung bedürfen.
Alle Kanalabschnitte werden irgendwann, allerdings in unterschiedlichen zeitlichen Abständen, einer Reinigung unterzogen.
Die mechanische Beanspruchung des Abwasserkanals wird auf ein Minimum reduziert.
Hohe Wirtschaftlichkeit
Nachteile
Intensive Arbeitsvorbereitung
Veränderte Abflußverhältnisse im Netz und deren Auswirkungen sind schwer erkennbar

Feuerwehrstrategie (ausfalldeterminiert)

Eine Bedarfsreinigung wie sie die Feuerwehrstrategie darstellt, kommt nur bei akutem Bedarf zum Einsatz, d.h. in Not- und Störfällen, häufig auch aufgrund von Bürgerbeschwerden. Vor und Nachteile sind in Tabelle 9 zusammengestellt.

Tabelle 9: Vor und Nachteile Feuerwehrstrategie

Vorteile
Personal, Fahrzeuge, Energie- und Wasser werden zielgerichtet eingesetzt.
Verringerte Beanspruchung des Bauwerkes durch Reinigungsmaßnahmen
Nachteile
Die Stadthygiene leidet erheblich bei einem Rückstau des Abwassers.
Störung des Abwasserflusses haben negative Auswirkungen auf das angeschlossene Entwässerungsgebiet und seine Grundstücke.
Die Betriebssicherheit ist nicht ständig gewährleistet.
Personal und Fahrzeuge müssen für den Störfall vorgehalten werden.
Erhöhtes Auftreten von Störfällen, Geruchsbelästigung etc. kann das öffentliche Ansehen des Entwässerungsunternehmens schädigen.

8.2.2 Reinigungsplanung für das Kanalnetz Dresden

Die Stadtentwässerung Dresden führt eine bedarfsorientierte Reinigung durch. Diese geht aus vom historisch gewachsenen Spülplan und wird auf Basis der nachfolgenden Kriterien kontinuierlich angepasst (Weißflog, 2010):

- Abschätzung der Ablagerungen bei Schachtinspektionen (% vom Querschnitt)
- Prüfung der Ablagerungshöhe vor der Reinigung (% vom Querschnitt)
- Hydraulische Gegebenheiten (insbesondere Gefälle)
- Bürgermeldung (in der Regel Geruch)

Das Gesamtnetz wird hierzu in Wartungsbezirke aufgeteilt. Die die Reinigungspläne weisen jeder Haltung ein Intervall für die Reinigung mit kombinierten Hochdruckspül-Sauggeräten zugewiesen. Bei der Reinigung wird die entfernte Sedimentmenge vom Bedienpersonal des HDSG abgeschätzt und für die Fortschreibung des Spülplans rückgemeldet. Auf diese Weise ist grundsätzlich eine hohe Wirtschaftlichkeit aber auch Anpassungsfähigkeit gewährleistet. Allerdings ist die Qualität der Spülplanerstellung in starkem Maße von der Verfügbarkeit und Qualität der Eingangsdaten abhängig.

So wurde aus Betreibersicht, in den letzten Jahren tendenziell ein Rückgang der Ablagerungsmengen eingeschätzt. Aufgrund der eher qualitativen Schätzungen des Betriebspersonals, lässt sich dies aber nicht zahlenmäßig belegen. Die Auswertung der dokumentierten Ablagerungsmengen in Abschnitt 4 zeigen demgegenüber keinen eindeutigen Trend. Da das Kanalräumgut einem erheblichen Wasseranteil umfasst, ist auch eine Bestimmung durch einfaches Wiegen des Fahrzeuges mit großen Unsicherheiten behaftet. Viele Schächte werden nur bei Bedarf geöffnet, so dass ggf. auch Ablagerungen, sofern sie keine Betriebsprobleme verursachen unentdeckt bleiben.

Für die weitere Optimierung der Spülplanung wird deshalb noch viel Potential gesehen. Hierfür ist es jedoch erforderlich, alle Informationen konsistent in einer Datenbank zusammenzuführen und auszuwerten. Für eine konsequente Datenerfassung sind mobile Datenerfassungsgeräte notwendig, mit denen sowohl die Stammdaten abgerufen werden, als auch Zustandsdaten eingegeben werden können. Hierfür stehen GIS-basierte Betriebsführungssysteme mit entsprechenden mobilen Lösungen zur Verfügung und wurden auch in einigen Pilotprojekten erfolgreich umgesetzt (Hennerkes, 2002, Orth et al., 2008). Diese nutzen in der Regel Transponder- oder Barcodes oder andere Erkennungssysteme, welche direkt am Bauwerk (z.B. am Schachtkonus) angebracht sind und mit dem mobilen Lesegerät eine schnelle und eindeutige Zuordnung ermöglichen.

Diese Technologie in Kombination mit einer konsequenten Inaugenscheinnahme der Schächte, könnte die Einschätzung der Ablagerungssituation deutlich verbessern. Nach Untersuchungen von (Orth et al., 2008) stimmt in 70% der Fälle die Ablagerungssituation im Schachtgerinne mit der

Situation in der Haltung überein. Punktuelle Ablagerungen und insbesondere Wurzeleinwüchse lassen sich damit nicht erkennen. Hierfür wäre die Nutzung von Schachtkameras erforderlich. Für die Schachtinspektion (mit/ohne Kamera) kann mit einer Tagesleistung von 50 bis 90 Schächten gerechnet werden, wobei die angegebene Tagesleistung erstaunlicherweise mit Kameranutzung nicht wesentlich geringer ist als ohne (Orth et al., 2008).

Bei der Festlegung der Spülintervalle ist zu berücksichtigen, dass sich in Kanälen Material bis zu einem spezifischem Gleichgewichtszustand akkumuliert. Bereits kurze Zeit nach der Reinigung befindet sich bei ausreichendem Dargebot wieder Material im gespülten Kanal. Dabei darf nach DIN EN 752 Teil 7 eine Ablagerungshöhe von $< 15\%$ der Nennweite toleriert werden, wenn weder Störeinflüsse noch Einschränkungen der Funktionalität der Kanalisation (vermehrten Rückstau, Überstau oder Geruchsbelästigung) erkennbar sind. In der britischen Richtlinie zum Entwurf ablagerungsfreier Kanäle wird eine Ablagerungshöhe von 2% der Profilhöhe toleriert. Diese zu definierende Eingriffsschwelle beeinflusst maßgeblich das Reinigungsintervall. Sie kann jedoch nicht pauschal für das Gesamtnetz festgelegt werden, da sowohl hydraulische und betriebliche Aspekte als auch Fragen der Öffentlichkeitsarbeit die Toleranzgrenze beeinflussen.

In Zusammenarbeit mit der Stadtentwässerung Dresden GmbH werden diese Fragestellungen systematisch weiter bearbeitet, wobei der aktuelle Schwerpunkt vorerst auf der richtigen Bewertung der Ablagerungssituation liegt.

9. Weiterentwicklung Stauwagen zur Reinigung von Großprofilen

9.1 Veranlassung und Zielstellung

Zur Beseitigung dieser Ablagerungen wird in kleineren Profilen (DN < 1000 mm) üblicherweise das Hochdruckspülverfahren (HD-Verfahren) eingesetzt. Dieses wird jedoch mit zunehmender Profilgröße sowohl technisch als auch wirtschaftlich deutlich aufwändiger (Abbildung 19) und lässt sich in Großprofilen (DN > 1500mm) kaum noch effektiv und effizient anwenden. Der Einsatz des HD-Verfahrens kann dann für die kommunalen Träger sehr kosten- und energieintensiv bei gleichzeitig unbefriedigender Spülwirkung werden.

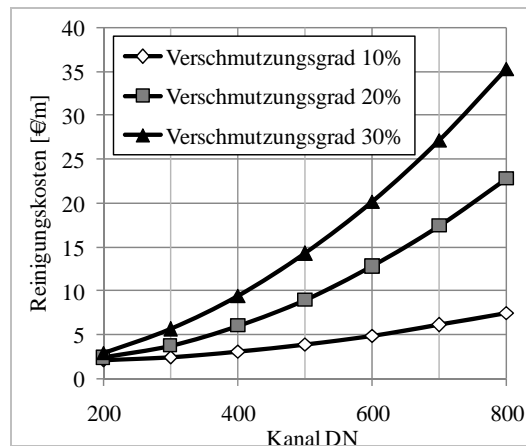


Abbildung 19: Spezifische Reinigungskosten der HD-Reinigung in Abhängigkeit von Verschmutzungsgrad und Nennweite (nach Winkler (2010), verändert)

In Dresden sowie einigen anderen deutschen Großstädten wird hierfür nach wie vor die historische, sehr früh entwickelte Technik der Niederdruckspülung mittels Stauwagens verwendet. Dieses Prinzip basiert darauf, dass durch ein dem jeweiligen Kanalprofil angepasstes Stauschild einen Aufstau hinter dem Wagen erzeugt wird, dessen potenzielle Energie durch Spalten zwischen Kanalsohle bzw. Wandung und dem Stauschild sowie durch weitere Öffnungen im Stauschild selbst eine Spülwirkung vor dem Stauwagen durch eine Um- bzw. Durchströmung erzeugt wird (Bernoulli-Prinzip). Der Stauwagen löst somit die vorliegenden Ablagerungen und hält sie in Bewegung, so dass sie an entsprechend zugänglichen Stellen abgelagert und mittels Saugfahrzeug aufgenommen werden können. Aufgrund der ortsspezifischen Gegebenheiten und eher empirischen Optimierungsbemühungen haben sich in verschiedenen Städten und Kommunen verschiedene technologische Lösungen entwickelt.



Abbildung 20: rechts: Dresdner „großer“ Stauwagen; links: „kleiner“ (links) Stauwagen (bei Reinigung der Trockenwetterrinne eines Bezirkssammlers)

Der Hauptgrund, weshalb dieses „klassische“ Reinigungsverfahren bei manchen Kanalnetzbetreibern bis dato überlebt hat, liegt in seiner **ökonomischen Effizienz**. In begehbaren Kanälen

ist diese Technologie deutlich günstiger als die Hochdruckreinigung. Gleichzeitig kommt sie ohne Fremdenergie aus und erzeugt entsprechend auch keine zusätzliche CO₂-Emissionen. Des Weiteren erfolgen die Arbeiten im Kanal, ohne Verkehrsraumeinschränkung und Lärmemission.

Diesen überzeugenden Vorteilen stehen aber trotz zahlreicher Optimierungsbemühungen auch maßgebliche Defizite gegenüber:

- Starke Abhängigkeit vom Durchfluss: hohe Durchflüsse machen eine kontrollierte Reinigung fast unmöglich, niedrige Durchflüsse erzielen nicht die gewünschte Reinigungswirkung.
- Schwere körperliche Arbeit bei Auf- und Abbau sowie der Bedienung sowie Probleme bei der Arbeitssicherheit: die Wagen werden manuell gebremst oder fahren unkontrolliert durch den Sammler. Die hohen Schubkräfte lassen sich mitunter kaum halten. Dies gefährdet das Bedienpersonal, gleichzeitig fährt der Stauwagen bei zu hohen Geschwindigkeiten auf oder über die Sedimente. Große Hindernisse führen zu Verblockungen, die Brechstangen und ähnlichem Gerät gelöst werden.
- Sonderbauwerke und Hubfahrzeuge sind für Einsetzen und Entnahme der Stauwagen erforderlich.

In Zusammenarbeit mit der Stadtentwässerung Dresden GmbH und dem Institut für Hydromechanik und Wasserbau wurden deshalb grundlegende Forschungsarbeiten zum hydrodynamischen Wirkungsprinzip einschließlich modellhafter Untersuchungen durchgeführt. Zielstellung dieser Arbeiten war die Ermittlung der wissenschaftlich-technischen Grundlagen für die Entwicklung einer neuen Reinigungstechnologie auf der Basis einer neuen gerätetechnischen Lösung.

9.2 Materialien und Methoden

9.2.1 Grundsätzliche Vorgehensweise

Die Arbeiten gliederten sich in vier Arbeitsschritte:

1. Auswertung von Erfahrungen von Betreibern. Hierzu wurden mit Unterstützung der DWA Betreiber identifiziert, welche noch Reinigungsfahrzeuge mit Niederdrucktechnologie nutzen. Diese wurden schriftlich und telefonisch nach der konkreten technischen Lösung und ihren Erfahrungen befragt.
2. CFD-Modellierung verschiedener Wirkprinzipien (überströmt, unterströmt, Strahlprinzip) und technologischer Details.
3. Auswahl des geeignetsten Wirkprinzips und potentiell günstigsten Detaillösung als Grundlage für einen Prototyp für DN 500, technische Versuche im Versuchslabor des Instituts für Hydromechanik und Wasserbau.
4. Entwurf einer Konstruktionszeichnung für einen Stauwagen in Originalgröße.

9.2.2 Grundlagenuntersuchungen mittels CFD-Modellierung

Software

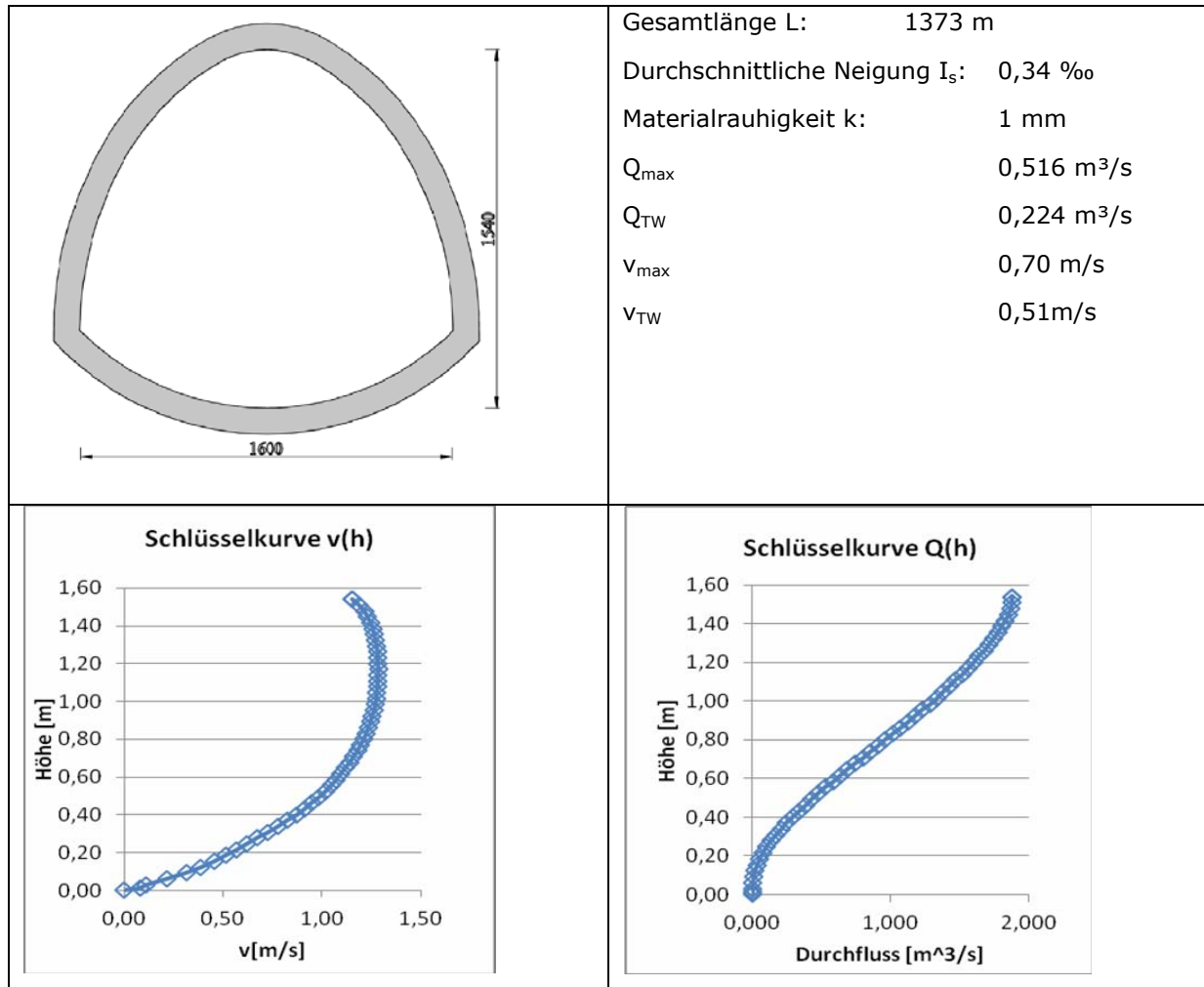
Für die dreidimensionale hydrodynamisch-numerische Simulation wurde das kommerzielle Programm FLOW-3D® in der Version 9.4.2/9.10 verwendet. Die Simulationsrechnungen wurden im Maßstab M 1:1 durchgeführt. Im Nachhinein wurde zusätzlich das physikalische Modell als Kontrolle am Computer nachgerechnet. Die Software berechnet einen Strömungsprozess, indem nach Diskretisierung des Systems, für jede einzelne Zelle des Modells die relevanten Strömungsgleichungen (Reynolds-Gleichungen) gelöst werden. Die Vernetzung der erstellten Geometrie erfolgt mittels orthogonaler Netze. Diese teilen den physikalischen Raum in kleine, miteinander über Knoten verbundene Volumina. An den Knoten werden die Strömungsgleichungen der jeweiligen benachbarten Zellen gleichgesetzt. Die Fluidoberfläche wird als äußerer Rand der Flüssigkeit bezeichnet. Dies macht es erforderlich, die Randbedingungen möglichst genau zu definieren, damit eine ausreichen-

de Beschreibung der freien Oberfläche möglich ist. Das Netz wird als unbeweglich definiert und das Fluid befindet sich relativ zu diesem in Bewegung (Finite-Elemente-Methode).

Untersuchter Kanalabschnitt

Für die Erstellung des hydrodynamischen Modells wurden die Geometrie wurden exemplarisch die Kanalhaltungen im Bereich des Altstädter Abfangsammlers (05M-04A4 bis zur 05M-04C49, Maulprofil B/H=1600/1540mm) ausgewählt.

Tabelle 10: Charakteristik des gewählten Kanalabschnitts für die CFD-Modellierung



Diskretisierung und Modellannahmen

Die Geometrie der Kanalhalterung und der Stauwand wurde mit AutoCAD2011® erstellt und als Stereolithographie (STL-Format) in das Berechnungsprogramm FLOW-3D® eingelesen. Die Stauwand und das Unter- und Oberwasseranfangsvolumne wurden in ähnlicher Weise erstellt. Die hölzernen Stauschilder wurden mit einer größeren Rauheit von $k = 2\text{mm}$ belegt. Die Zellauflösung beträgt $dx: 25 - 100\text{ mm}$, $dy: 40\text{ mm}$ und $dz: 10-100\text{ mm}$. Insgesamt bestand das Modell aus 142 598 Zellen.

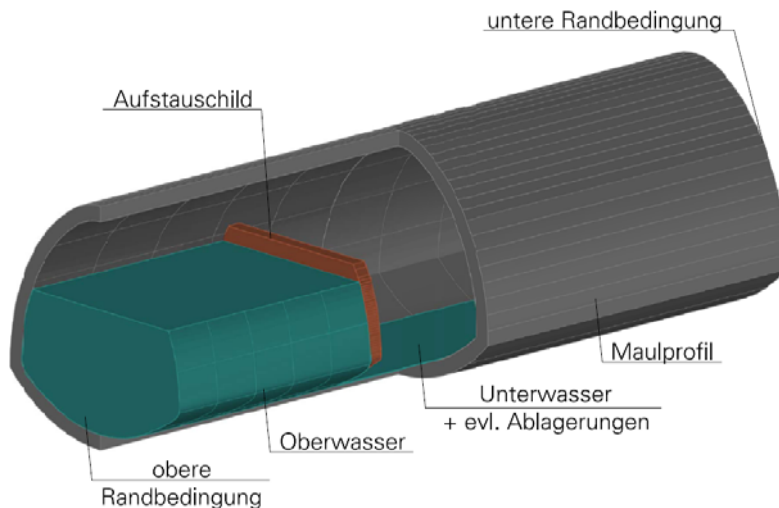


Abbildung 21

Für die Berechnung wurde das Wasser als inkompressibles Fluid behandelt. Zudem wurde ein Zwei-Komponentensystem von Wasser und Luft betrachtet, deren zwei Bestandteile durch eine scharfe Oberfläche getrennt sind.

Sedimenttransport

Das verwendete Simulationsprogramm beinhaltet einen Berechnungsansatz zur diskretisierten Modellierung von Erosions- und Sedimentationsprozessen. Es können bis zu 10 verschiedene nicht kohäsive Sedimentarten, mit den jeweiligen Korngrößen, Dichten und Geometriecharakteristika, definiert werden. Durch die Berücksichtigung der Schwerkraft bzw. Auftriebskraft, durch die Ermittlung einer Erosionsschubspannung infolge der Fließdynamik des Wassers, unter Berücksichtigung von einer Expositionsfunktion der einzelnen Sedimentkörner und der kombinierten Sohlentransportfunktion können Vorhersagen über den Sediment- und Geschiebetransport getroffen werden. Ausgehend von einem modellierten Anfangsvolumen der aus Sedimentmasse zusammengestellt ist der zeitliche Abtrag dieser Masse darstellbar. Es können die Sedimenthöhen, die Massen der einzelnen Sedimentarten und die Sedimentkonzentrationen, welche sich im Modell in suspendierter oder in abgesetzter Form befinden, ausgewertet werden.

Bewegte Komponenten (Stauwagen)

Die verschiedenen Modellkomponenten können im Berechnungsnetz als bewegt definiert werden. Es können entweder vorgegebenen Bewegungen mit definierten Geschwindigkeiten und Bewegungsrichtung gewählt werden (prescribed motion) oder es können vom System die Bewegungen, die von den dynamischen Wasserkräften hervorgerufen werden, selbst berechnet werden (coupled motion).

Physikalischer Modellversuch

Basierend auf den Ergebnissen der modelltechnischen Vorversuche wurde ein Stauwagen im physikalischen Maßstab gebaut und mit verschiedenen konstruktiven und betrieblichen Variationen getestet. Das Modell wurde im Hubert-Engles-Labor am Institut für Wasserbau und Technische Hydromechanik (IWD) der TU Dresden aufgebaut.

Um eine hinreichende Näherung der hydraulischen Modellversuche an realistische Strömungsverhältnisse zu gewährleisten, wurden die physikalischen Modellversuche nach dem Froudeschen Ähnlichkeitsgesetz geplant und ausgewertet. Die Froudezahlen müssen dabei im Modell genauso groß sein, wie im realen System.

Als Kanalprofil wurde ein PE-Kreisrohr mit einem Innendurchmesser von 630 mm gewählt. Dies entspricht einem Modellmaßstab von ca. 1:2,6 bezogen auf das Beispielprofil in Tabelle 10. Der Stauwagen wurde aus Eisenprofilen geschweißt. Als Werkstoff für die Stauschilder wurde der

Kunststoff „Forex[®]“, eine leicht geschäumte, geschlossenzellige Hartschaumstoffplatte auf PVC gewählt.

Während der Versuchsdurchführung wurden die Wasserstände durch zwei Wellenmesspegel kontinuierlich ($f=10\text{Hz}$) im Oberwasser und im Unterwasser (5 cm vor und nach dem Schild) gemessen und aufgezeichnet, bei gleichzeitiger Kontrolle mittels einer Wasserstandsskala. Der Stauwagen wurde durch ein Seil an einem drehzahlgesteuerten Motor befestigt und bewegt. Mit einer Kraftmessdose wurde die Kraft auf den Stauwagen gemessen. In unmittelbarer Nähe des Stauschildes wurde durch einen Geschwindigkeitsmessflügel die lokale Geschwindigkeit an verschiedenen Punkten auf Sohlhöhe erfasst und aufgezeichnet

Es wurden 26 Varianten im physikalischen Modell untersucht. Dabei wurden das Wirkprinzip (überströmt, unterströmt) sowie für Untertrömung die Schlitzform, Schlitzweite, Schildneigung und Schildform variiert. Eine Modellmessung beinhaltet drei Untersuchungsschritte:

1. stehender Wagen

- Erfassung des sich einstellenden Durchflusses.
- Messung der Ober- und der Unterwasserhöhe sowie der Wasserdruckkraft, die auf dem Wagen wirkt.
- Messung der Geschwindigkeiten in direkter Nähe der Stauwand durch einen Geschwindigkeitsmessflügel.

2. fahrender Wagen: Schritte wie im Punkt 1.

3. Sedimenttransport: Erfassung des Sedimenttransportes durch Abmessung der Sedimenthöhen in Rohrlängsrichtung.

9.2.3 Konstruktiver Vorentwurf

Basierend auf den Erkenntnissen aus den drei vorangegangenen Arbeitspaketen wurden Schlussfolgerungen für den konstruktiven Vorentwurf abgeleitet. Diese beinhalteten

- die Festlegung des Wirkprinzips und der Geometrie Schildes,
- die Definition wichtiger betrieblicher Anforderungen und Ableitung konstruktiver Vorschläge zur Umsetzung,
- einen konstruktiven Vorentwurf (CAD-Zeichnung) für den letzten Abschnitt des Alstädter Abfangsammlers (Weißeritzstraße → Flügelweg).

Der Vorentwurf wurde mit der Stadtentwässerung Dresden abgestimmt.

9.3 Ergebnisse und Ausblick

9.3.1 Erfahrung von Betreibern

Im deutschsprachigen Raum konnte der Kontakt zu folgenden Betreibern hergestellt werden:

Deutschland: Berlin, Bremen, Dresden, Halle, Hamburg, Karlsruhe, Leipzig, Magdeburg, Mönchengladbach, München

Österreich: Wien

Alle nutzen radgetriebene Stauwagen allerdings mit unterschiedlichen Wirkprinzipien: überströmt, unterströmt und mittels Strahlrohr ("Iltis"). Einige begleiten den Stauwagen mit einer Reinigungskolonnen, andere lassen ihn ohne Begleitung fahren und kontrollieren mehrmals täglich seine Position. Insgesamt werden damit noch ca. 650 km Kanalnetz mit dieser Technologie gereinigt, insbesondere im begehbaren Bereich mit Ei- und Sonderprofilen

Unabhängig von den konstruktiven und betrieblichen Unterschieden bestätigen alle Betreiber grundsätzlich die vorgenannten Vor- und Nachteile der Niederdruckreinigung. Einige Betreiber haben z.T. bereits sehr weitgehende Optimierungen (z.B. Leipzig) vorgenommen. Diese beinhalten insbesondere die Stabilisierung der Fahrrichtung durch Leitschienen sowie diverse Lösungen für die Anpassung an variierende Profildimensionen. Eine nach Durchfluss und Ablagerungssituation kontrollierte Einstellung und Fahrt des Wagens ist jedoch in keinem Fall gegeben.

9.3.2 CFD-Modell

Ziel der Untersuchungen war die grundsätzliche Auswahl des optimalen Wirkprinzips und die Eingrenzung der konstruktiven Lösung. Hierzu wurden folgende Varianten untersucht:

- Unterströmtes Schild
 - Seitlich dichtes / undichtes Schild
 - Schlitz gerade / Schlitz parallel zum Rohrprofil
 - Variation der Schlitzbreite
 - Verschiedene Kombination von Oberwasser- und Unterwasserhöhe
 - Grundformen des Stauschildes (gerade, V-Form, U-form, Bogen-Form)
 - Stauschildneigung (schräg nach vorn, schräg nach hinten, gerade)
- Überströmtes Schild
- Kombination von Überströmung und Unterströmung
- Strahlrohr („Iltis“)
- Kombination von Strahlrohr und Unterströmung

Für die durchgeführten 3D-Modellierungen wurden jeweils die Geschwindigkeitsverteilungen, die mittleren Geschwindigkeiten, und die vorhandenen Wasserhöhen in Kanalmitte für die Kanallängsachse ausgewertet. Aus diesen konnten die mittleren Sohlschubspannungen durch die Beziehung $\tau = \lambda/8 \cdot \rho \cdot v^2$ (λ = Rauheitsbeiwert, ρ = Dichte des Wassers und v = über die Wassertiefe gemittelte Geschwindigkeit) ermittelt werden. Als erforderliche Grenzsobspannung für eine erfolgreiche Reinigung $\tau = 5 \text{ N/m}^3$ definiert (Dettmar, 2006, Schaffner, 2008). Zusätzlich wurden der Durchfluss und die Wasserdruckkräfte in Längsrichtung, welche auf das Stauschild wirken, ausgewertet. Optimal sind Bedingungen, welche ausreichend Schubspannungen bei Trockenwetterabfluss mit geringen Wasserdruckkräften erreichen.

Im folgenden werden die zusammenfassenden Erkenntnisse aus allen Untersuchungen zusammengestellt:

- Die beste Reinigungswirkung bei gleichzeitig moderatem Wasserbedarf wird mit einem unterströmten Schild erreicht.
- Eine seitliche Abdichtung verbessert die Reinigungswirkung und reduziert den erforderlichen Durchfluss.
- Eine parallele Schlitzführung ist etwas günstiger als ein gerader Schlitz.
- Die Wahl der Schlitzbreite ist maßgeblich vom verfügbaren Trockenwetterabfluss abhängig. Im Fallbeispiel werden die besten Reinigungsleistungen bei einer Schlitzbreite zwischen 8 und 15 cm erzielt. Bei höhere Schlitzbreiten wird keine ausreichende Wasserspiegeldifferenz und damit geringere Schubspannung erreicht. Der Abtrag von Ablagerungen verlangsamt sich und es bleibt teilweise Sediment in der Kanalmitte liegen.
- Ein U- oder V-förmiges Schild ergibt die höchste Räumgeschwindigkeit von 5,5 bis 6 cm/s. Gerade Schilde erreichen 3,5 bis 4 cm/s.

- Überströmte Stauschilde und Strahlrohrtechnologie sind weniger effizient. Besonders ungünstig ist Kombinationen von Überströmung und Unterströmung, da durch die Verwirbelungen in der oberen Wasserschicht und die Lufteinmischung die Sohlschubspannungen deutlich zurückgehen. Entsprechend sinkt auch die Räumgeschwindigkeit auf max. 2-3 cm/s.
- Ein Neigung des Schildes bringt kaum hydraulische Vorteile.

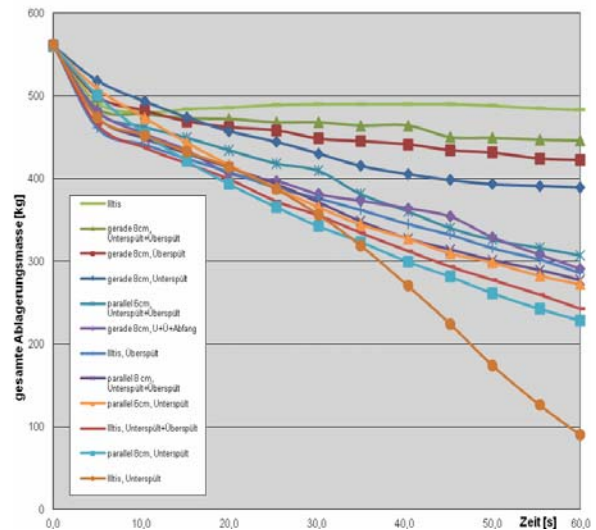
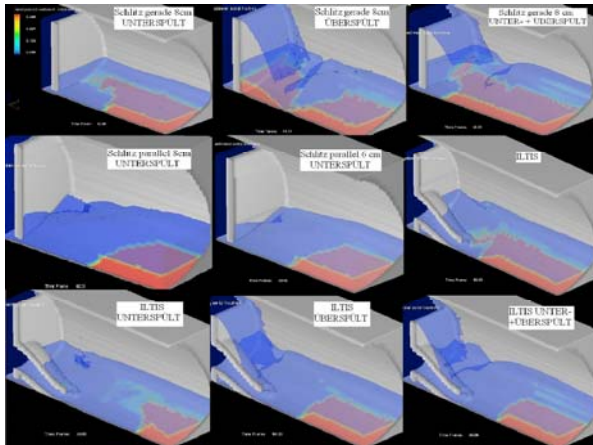


Abbildung 22: Sedimentmasseabtrag: links: nach 60 s Strömungssimulation (qualitativ), rechts: Gesamtmasse

Um den Reinigungserfolg zu gewährleisten, ist eine hohe Wasserspiegeldifferenz zwischen Oberwasser und Unterwasser erforderlich, was hohe Wasserkräfte mit sich bringt. Diese liegen bei $h_{ow} = 100$ cm und $h_{uw} = 50$ cm zwischen 4 und 5 kN. Um eine kontrollierte Fahrt des Wagens zu gewährleisten, muss der Stauwagen mit wirkungsvollen Bremsen ausgerüstet werden.

Zusätzlich wurde eine automatische Schwallklappe entworfen, welche bei Erreichen einer maximalen Wasserspiegeldifferenz automatisch öffnet. Damit werden drei Ziele erreicht:

- Begrenzung der Druckkräfte auf einen beherrschbaren Maximalwert,
- Schwallspülung,
- Weitgehende Freigabe des Fließquerschnitts bei Regenwetter.

9.3.3 Physikalischer Modellversuch

Im physikalischen Modellversuch bestätigten sich weitgehend die im Vorfeld berechneten Ergebnisse. Direkt vor dem Schlitz des Schildes werden in Abhängigkeit von Wasserstand und Schlitzbreite Schubspannungen zwischen 9 und 20 N/m² erzielt. Das Maximum wurde hier bei einem unterströmten Schild mit einer Schlitzweite von 4 cm erreicht.

Durch Einbau von einem Sand-Kies-Gemisch von 1 bis 16 mm Korngröße konnte auch die Räumwirkung gut dokumentiert werden. Der Sedimenttransport läuft dabei in mehreren aufeinander folgenden Phasen ab:

- Annäherung des Schildes an die Ablagerungen.
- Erosion von Material des Ablagerungskopfes und Spülung der einzelnen Sandkörner über das davor liegende Material und damit Anwachsen der Kopfhöhe des Sedimentberges.
- Auf dem Sedimentberg, welcher eine Neigung talabwärts aufweist, werden die feineren Sedimentkörner von der Strömung nach vorne geschleppt, bis die Fließgeschwindigkeit kleiner als die Treibgeschwindigkeit für das jeweilige Sandkorn wird. Die Körner setzen sich

ab, und es entsteht eine natürliche Sortierung der Sandkörnung. Das gröbere Material lagert in Kanalmitte und das feinere auf den Seiten.

- Anwachsen des Sedimentkörpers in Länge und Höhe.
- Je nach Schlitzgröße und -form, Schildneigung und -form, Fahrgeschwindigkeit und Kanalneigung wird der Wagen immer näher an den Ablagerungsberg heranfahren, bis eine Grenzhöhe des Sedimentberges erreicht ist und das Abtragen nicht mehr möglich ist.
- Der Wagen fährt auf das Sediment, der Schlitz wird verstopft und der Schild wird überspült.

Im Fall einer **Überströmung ohne Schlitz** fährt der Wagen direkt auf das Sediment zu und schiebt es nach vorn weg. Wenn der Sedimentberg eine Grenzhöhe erreicht hat und die auf den Wagen wirkende Wasserdruckkraft nicht ausreicht diesen zu bewegen, bleibt der Wagen stehen.

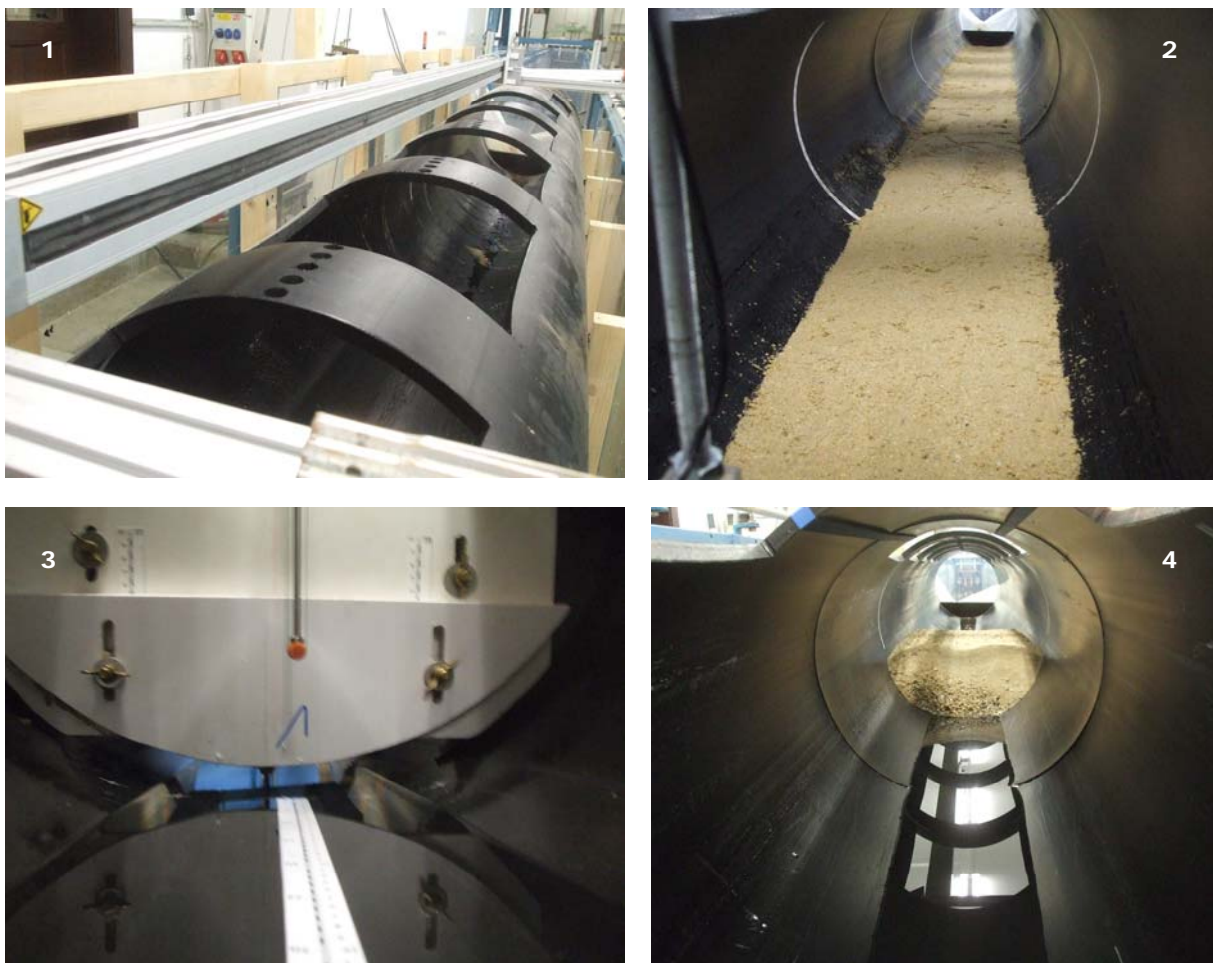


Abbildung 23: Physikalischer Modellversuch

- 1) Kanalabschnitt mit Beobachtungsöffnungen 2) Sedimentverteilung vor Versuch
3) Paralleler Schlitz 30 mm 4) Sedimentberg nach Versuch (parallel, 30 mm)

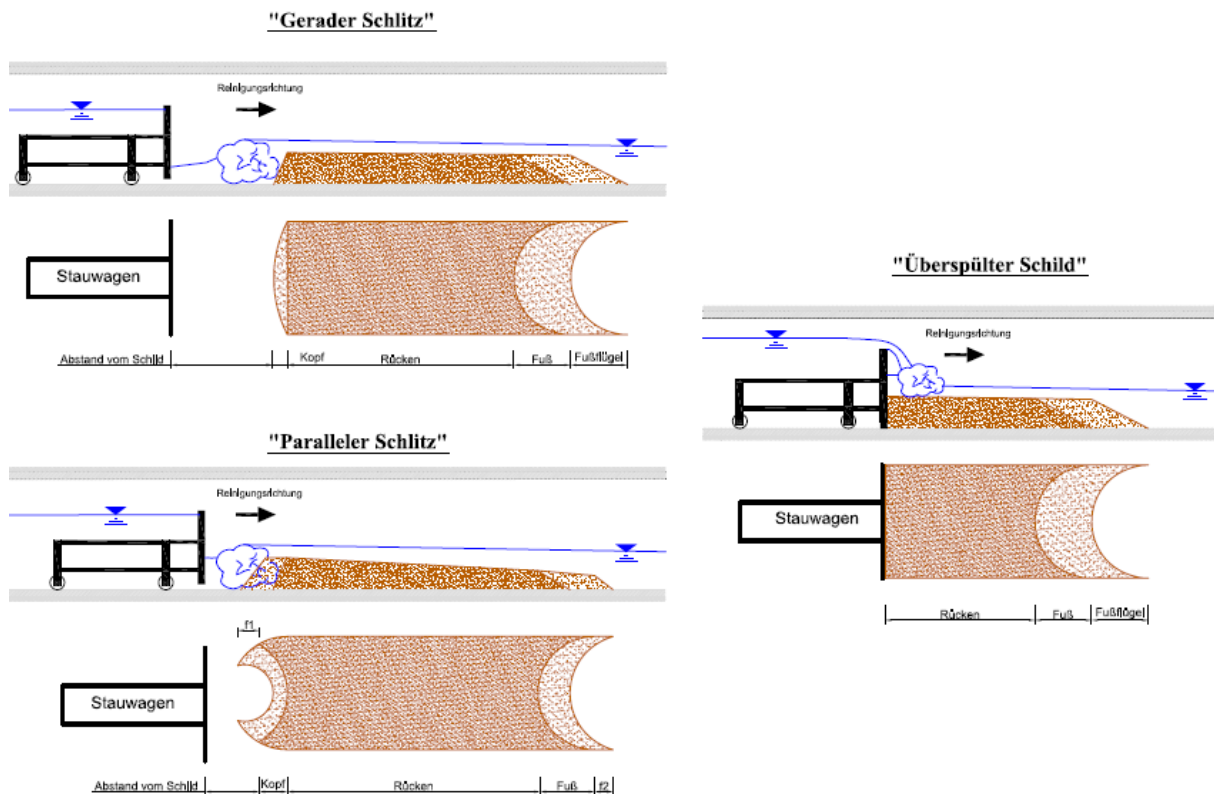


Abbildung 24: Charakteristische Form der Sedimentberge für die Varianten unterströmt, gerader Schlitz (oben), unterströmt, paralleler Schlitz (unten), überspült (rechts)

Um eine Quantifizierung des Sedimenttransportes durchführen zu können, wurde der Wagen mit konstanter Geschwindigkeit auf eine jeweils gleiche Ablagerungslänge und Höhe (10% des Querschnittes) bewegt und die verschobene Ablagerungsmenge vermessen.

Abgesehen von der Unschärfe der Messungen und von einigen Ausreißern konnten folgende Schlussfolgerungen getroffen werden:

- Unterströmt, Gerader Schlitz:
 - Je größer der Schlitz desto weiter entfernt bildet sich der Sedimentkopf → die Räumgeschwindigkeit kann erhöht werden.
 - Je größer der Schlitz desto geneigter ist der Sedimentrücken → das mögliche Räumvolumen ist größer.
 - Je größer der Schlitz desto länger fällt der Sedimentberg aus → die Ablagerungen werden weiter weg transportiert.
- Unterströmt, paralleler Schlitz
 - Im Bezug zu einem „geraden Schlitz“ fährt der Wagen näher an das Sedimentkopf heran, der Sedimentrücken ist aber deutlich steiler und fällt länger aus → höhere Räumvolumen können mit niedrigerer Fahrgeschwindigkeit transportiert werden.
- Variable Stauwandanordnung
 - Eine Neigung der Stauwand nach hinten vergrößert sowohl die Entfernung zum Sedimentkopf als auch das Räumpotenzial.

- Ein V-förmiges Stauschild bewirkt das Heranfahren des Wagens bis auf 50cm an den Sedimentkopfes → diese Anordnung erbringt keine besseren Ergebnisse.
- Die V-förmige Anordnung unterscheidet sich kaum bei unterschiedlichen Flügelneigungen und Spitzenorientierungen.
- Überströmt
 - Das Sedimentberg befindet sich direkt am Wagen → der Wagen wird durch den sich einstellende Gegendruck aus Wasser und Sediment abgebremst.
 - Das Räumpotential ist wegen der geringen Anzahl von Versuchen nicht einschätzbar.
- Unterströmt + Überströmt
 - Eine Kopplung Ü+U erbringt gute Räumegenschaften sowohl für einen „geraden“ als auch für einen „parallelen Schlitz“.

Für die beiden Varianten mit Überströmung muss berücksichtigt werden, dass deutlich höhere Trockenwetterdurchflüsse zur Verfügung stehen müssen. Die Räumegenschaften können somit auch nicht direkt mit den vorigen Varianten verglichen werden.

Zusätzlich wurde die Wirksamkeit der vorgeschlagenen Entlastungsklappe untersucht. Durch die Anordnung des Drehpunktes lässt sich der maximale Differenzwasserstand zur Klappenöffnung exakt definieren. Der Wasserstand zum erneuten Schließen der Klappe lässt sich durch Gegengewichte optimieren. Die Klappe erfüllte vollumfänglich die in sie gesetzten Erwartungen. Allerdings mussten zum Erreichen einer ausreichenden Schwallwirkung Leitwände eingebaut werden (siehe auch Abbildung 25).

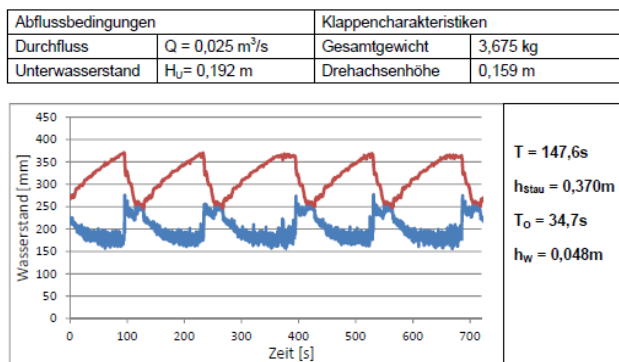


Abbildung 25: Verlauf der Ober- und der Unterwasserhöhe während einiger Klappvorgänge (links); Betrieb der Entlastungsklappe während der Entlastung (rechts)

9.4 Konstruktive Lösung

Aus den theoretischen und physikalischen Modellversuchen ergibt sich der Bau eines unterströmten Stauwagens als Vorzugslösung. Der Differenzwasserstand sollte zwar eine ausreichende Schubspannung von mindestens 5 N/m^3 sicherstellen, aber aus Gründen der Bedienbarkeit nicht zu groß sein. Der maximale Oberwasserstand ist nach Absprache mit den Kanalarbeitern verschiedener Betreiber auf ca. 100 cm zu begrenzen. Hohe Durchflüsse sind bei flachen Kanälen nicht unbedingt von Vorteil, da der Unterwasserstand den Wasserstrahl im Schildbereich abbremst. Günstig ist deshalb die Reinigung bei niedrigen Abflüssen, was eine möglichst dichte Ausbildung des Stauwagens im Seitenbereich und geringe Schlitzbreiten bedingt. Ein gerader Schlitz erreicht höhere Räumgeschwindigkeiten, wohingegen ein paralleler Schlitz bei geringem Durchfluss und geringen Räumgeschwindigkeiten mehr Sediment transportieren kann. Eine U- oder V-förmige Anordnung der Stauwand ergibt zwar höhere Abflusseigenschaften im unmittelbaren Bereich des Stauwagens, lässt

sich konstruktiv allerdings kaum mit einer variablen Profilanpassung kombinieren. Eine Schildneigung nach hinten erhöht die erreichbaren Sohl Schubspannungen.

Um einen guten Reinigungsvorgang zu erzielen, sollte der Wagen in kontrollierter und langsamer Weise durch den zu reinigende Kanal fahren. Als Richtgeschwindigkeit wird maximal 2cm/s (72m/h) empfohlen. Damit kann verhindert werden, dass der Wagen zu nah an den Sedimentberg heranfährt, was den Reinigungsvorgang beeinflussen oder sogar zu Verstopfungen, zur Havarie und zum Überfahren von Sedimente führen könnte.

Es ist wichtig, die auf den Stauwagen einwirkenden Kräfte, welche den Wagen in Bewegung setzen, richtig abzuschätzen. In vertikaler Richtung wirken die Auftriebskräfte und die Gewichtskräfte des Wagens, welche ausgeglichen werden, wenn der Wagen genügend schwer ist und z.B. aus Edelstahl gebaut wird. In horizontaler Richtung wirken (neben der vernachlässigbaren Hangabtriebskraft) die Wasserdruckkräfte.

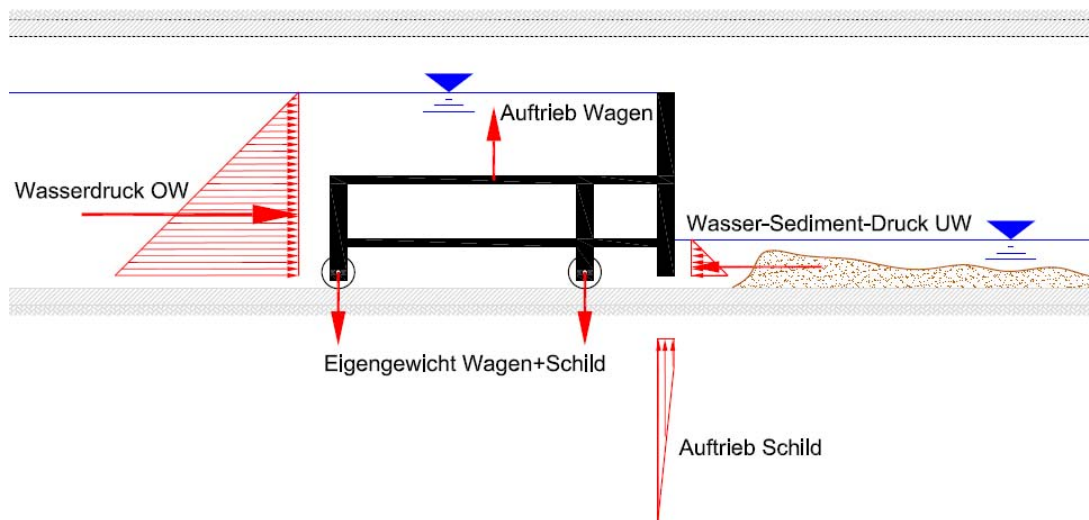


Abbildung 26: Kräfte die auf dem Wagen einwirken (Hangabtriebskraft wird vernachlässigt)

Für eine kontrollierte und langsame Fahrweise des Spülwagens ist der Einbau von Bremsen erforderlich. Nach dem gegenwärtigen Untersuchungsstand wird die Kombination einer regulierbaren mechanischen Bremse (z.B. Scheibenbremse) für die Vorderräder und einer Wirbelstrombremse für die Hinterräder empfohlen. Um ausreichend Reibungskräfte übertragen zu können, sollten die Räder aus Gummi gefertigt werden.

Weiterhin wird der zusätzliche Einbau der Entlastungsklappe empfohlen.

Insbesondere ist zu vermeiden, dass der Stauwagen auf die Sedimente auffährt. In diesem Fall käme es zur Verstopfung des Schlitzes, zum Verkeilen des Wagens oder zum Überrollen des Sedimentes. Drückt schließlich der untere Teil der Entlastungsklappe auf den Sedimentberg, öffnet sich diese und der Reinigungsvorgang wird unterbrochen. Um das zu verhindern, wird ein Abstandshalter vor dem Schild empfohlen. Eine entsprechende Einrichtung wurde bereits in der ersten Hälfte des 20. Jh. entwickelt (Abbildung 27, links), ist jedoch offensichtlich in Vergessenheit geraten. Für den Stauwagen wird eine konstruktive Lösung wie in Abbildung 27 (rechts) vorgeschlagen.

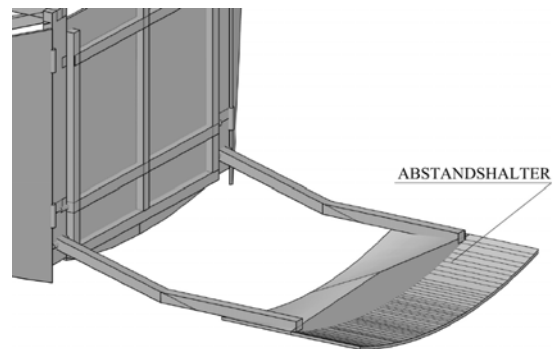


Abbildung 27: Abstandshalter zur Verhinderung des Auffahrens auf den Sedimentberg: Werbung (links); geplanter Abstandshalter (rechts)

Damit der Wagen in der Spur bleibt, sind seitliche und obere Führungsräder vorgesehen. Seitliche Führungsschienen sollen verhindern, dass sich die Räder in Seiteneinläufen verkeilen. Um Profiländerungen in Grenzen ausgleichen zu können, werden die Führungsschienen federbelastet ausgeführt.

Aus den vorgenannten Empfehlungen wurde eine Konstruktionskizze für einen Stauwagen im letzten Abschnitt des Altstädter Abfangkanals mit einem Querschnitt zwischen 2900/2780 mm und 3200/2870 mm erstellt (Abbildung 28)

Da innerhalb der Projektlaufzeit der Bau und ein Funktionstest im technischen Maßstab nicht möglich war, wurde erfolgreich ein Antrag an die Deutsche Bundesstiftung Umwelt für die Entwicklung eines marktfähigen Produkts gestellt. Als Partner konnte die HST-WKS Hydro-Systemtechnik GmbH gewonnen werden. Ziel ist der Bau und Test eines Prototyps bis März 2013.

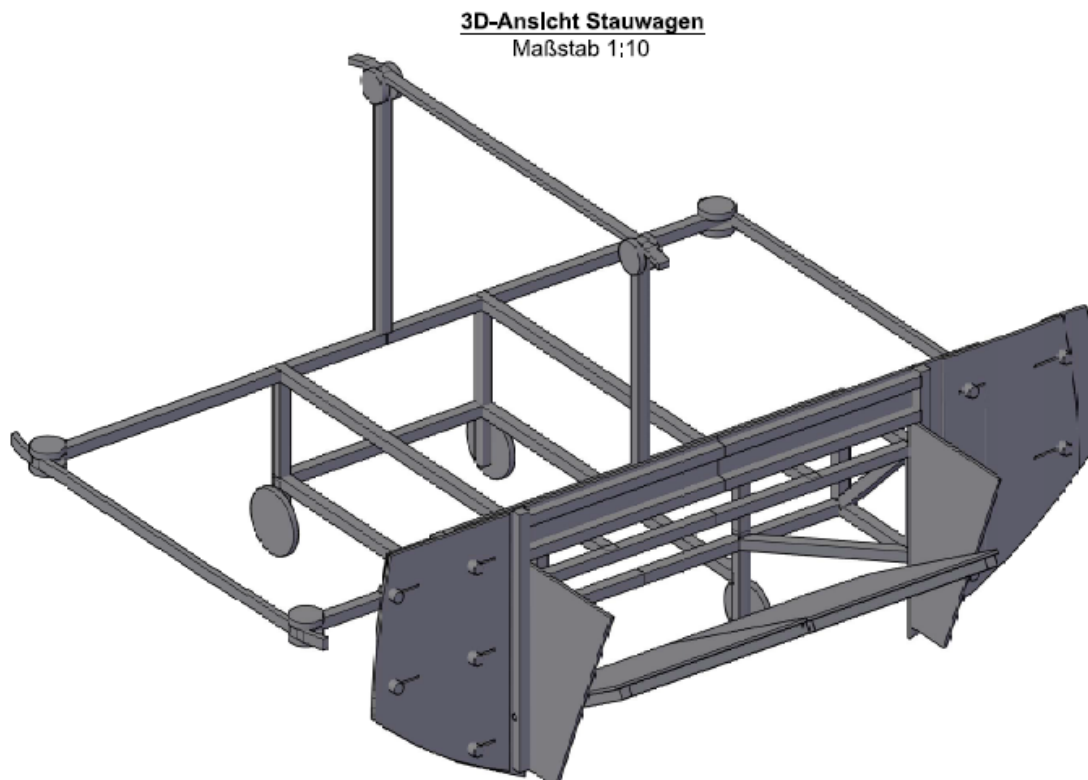


Abbildung 28: Konstruktionskizze des Stauwagens

10. Zusammenfassung und Ausblick

Die Untersuchungsergebnisse zur Anpassung an klimatischer Auswirkungen auf die Ablagerungsbildung lassen sich wie folgt zusammenfassen:

- Die kurzfristige Niederschlagscharakteristik lässt sich nicht mit dem anfallenden Kanalräum- und Sandfanggut korrelieren
- Kumuliert auf Jahresscheiben ergibt sich ein schwacher Zusammenhang zwischen Anzahl der Trockenwettertage und dem anfallenden Kanalräum- und Sandfanggut.
- Gebildete Ablagerungen verfestigen sehr schnell innerhalb weniger Tage und erfordern für ihre Remobilisierung zwischen 2 und 4 N/m².
- Dies bestätigen auch zeitlich hochaufgelöste Messung von Durchfluss und Ablagerungshöhe in einem Kanal mit einer maximal erreichbaren Schubspannung von 1,7 N/m². Über einen Zeitraum von mehreren Monaten konnte faktisch keine Mobilisierung festgestellt werden. Vielmehr scheint die Ablagerungsbildung vor allem durch den Eintrag mineralischen Materials bei Niederschlagsereignissen verursacht zu sein. Die Bildung organischer Sedimente bei Trockenwetter konnte messtechnisch nicht erfasst werden.
- Schubspannungen > 2 N/m² werden in ca. 40% des Dresdner Netzes selbst bei Starkregenereignissen nicht erreicht.
- Die erwartete Verschiebung zu intensiveren Starkregenereignissen wird keine maßgebliche Erhöhung der Schubspannungen bewirken, da die meisten Limitierungen durch das geringe Sohlgefälle und nicht durch den Durchfluss verursacht sind.
- Theoretische Modellbetrachtungen zeigen, dass bei Vorhandensein von Ablagerungen die Transportkapazität im teilgefüllten Bereich (bis ca. 40%) über dem eines ablagerungsfreien Rohres liegen kann. Sofern keine betrieblichen oder hydraulischen Probleme entgegen stehen, ist somit eine gewisse Ablagerungshöhe tolerierbar. Die Toleranzgrenze hat entscheidenden Einfluss auf das erforderliche Reinigungsintervall und ist unter Abwägung vieler, z.T. auch weicher Faktoren, haltungsspezifisch festzulegen.
- Es wird empfohlen, die bedarfsgerechte Kanalnetzreinigung in Dresden weiter zu entwickeln. Ansatzpunkte sind vor allem die genauere und flächendeckende Erfassung der Ablagerungsmengen und die Einbindung in ein GIS-basiertes Betriebsführungssystem unter Nutzung mobiler Datenerfassungsgeräte
- Grundsätzlich findet die Verlagerung der Sedimente aus den meist unkritischen Anfangshalbungen in die großen Sammler mit durchgängig schwachen Gefälleverhältnissen statt.
- Für diese ist eine regelmäßige Reinigung unabdingbar. Allerdings ist der Einsatz der konventionellen HDSG-Technik auf Nennweiten bis ca. 800 mm begrenzt.
- In Zusammenarbeit mit dem Institut für Wasserbau und technische Hydromechanik wurden deshalb umfangreiche Untersuchungen zur Optimierung der Niederdruckreinigung mittels Stauwagen durchgeführt.
- Im Ergebnis wurden zahlreiche konstruktive Verbesserungsvorschläge erarbeitet und im halbtechnischen Maßstab umgesetzt und auf ihre Wirksamkeit bewertet.
- Im Rahmen eines DBU-Projektes soll der optimierte Stauwagen zu einem marktfähigen Produkt weiterentwickelt werden.

Im Rahmen dieses Arbeitspaketes konnten viele Zusammenhänge aufgeklärt, Schlussfolgerungen zum Einfluss des Klimawandels gezogen und Anpassungsmaßnahmen empfohlen werden. Es sind jedoch auch viele Fragen offen geblieben. Insbesondere sind die Prozesse und Randbedingungen des Sedimenteintrages bisher noch weitgehend unerforscht. Diese sind jedoch die Voraussetzung für eine plausible Modellierung des Sedimenttransports im Gesamtsystem.

Am ISI wird deshalb insbesondere an der weiteren Aufklärung der Eintragsdynamik und dem Transportverhalten im Netz gearbeitet. Parallel laufen Untersuchungen zum partikelgebundenen

Schadstofftransport. Beide Untersuchungsstränge sollen in einem gekoppelten Sedimenttransport- und Schadstofftransportmodell zusammengeführt werden.

11.Literatur

- Ackers J.C., Butler D., May R.W.P. (1996) Design of sewers to control sediment problems, CIRIA-Report 141, London
- Banasiak R., Verhoeven R., De Sutter R., Tait S. (2005) The erosion behaviour of biologically active sewer sediment deposits: Observations from a laboratory study, Water Research, 39 (20), 5221-5231, ISSN: 0043-1354
- CD4WC (2006) Evaluation of Operation of Sewer Sediments, <http://isi.tu-dresden.de/twiki/bin/view/CD4WC/DeliverableSixTwo>, letzter Zugriff: 02.03.2010
- Crabtree R. W. (1988) A Classification of Combined Sewer Sediment Types and Characteristics, WRc Engineering, Report ER 324 E
- Dettmar J. (2006) Beitrag zur Verbesserung der Reinigung von Abwasserkanälen, Dissertation, RWTH Aachen
- Gebhard V. (2008) Interaktionen bei der Modellierung von Stofftransport, Sedimenthaushalt und Abfluss in der Siedlungsentwässerung, Schriftenreihe des Instituts für Siedlungs- und Industrierwasserwirtschaft, Band 32, ISSN: 1615-083X
- Hennerkes J. (2002) Optimierung von Reinigungsintervallen als Grundlage für die Erstellung eines Spülplans, Abschlussbericht im Auftrag des MUNLV Nordrhein-Westfalen, Institut für Siedlungswasserwirtschaft, RWTH Aachen
- Hoefst S. (2011) Experimentelle Bestimmung der Bildung und Mobilisierbarkeit von Ablagerungen in Mischwassersystemen, Dissertation (in Vorbereitung), TU Dresden, Institut für Siedlungs- und Industrierwasserwirtschaft
- Hohlfeld A. (2009) Wahl der Niederschlagsbelastung für die Bewertung des Überflutungsverhaltens von Kanalnetzen am Beispiel von Dresden, Diplomarbeit, TU Dresden, Institut für Siedlungs- und Industrierwasserwirtschaft
- Macke E. (1982) Über den Feststofftransport bei niedrigen Konzentrationen in teilgefüllten Rohrleitungen, Mitteilungen, Leichtweiß-Institut für Wasserbau der TU Braunschweig, 76
- Orth H., Lange R.-L., Pahl A., Meßmann S. (2008) Zustands-, Prozess- und Wirkungsanalyse zur Entwicklung einer bedarfsorientierten Reinigungsstrategie für Kanalnetze, Lehrstuhl für Siedlungswasserwirtschaft und Umwelttechnik, Ruhr-Universität Bochum
- Pernecker L., Vollmers H.-J. (1965) Neue Betrachtungsmöglichkeiten des Feststofftransportes in offenen Gerinnen, Die Wasserwirtschaft, 55, 386-391
- Schaffner J. (2008) Numerical Investigations on the Function of Flush Waves in a Reservoir Sewer, Dissertation, Technische Universität Darmstadt
- Stock J. (2011) Probenahme und Analyse von Kanalsedimenten aus Mischwasserhaltungen, Bachelorarbeit, TU Dresden, Institut für Siedlungs- und Industrierwasserwirtschaft
- Tränckner J., Bonisch G., Gebhard V. R., Dirckx G., Krebs P. (2008) Model-based assessment of sediment sources in sewers, Urban Water Journal, 5 (4), 277-286, ISSN: 1573-062X
- Vetter Martin (1992) Ein Beitrag zur Berechnung des Feststofftransportes in offenen Gerinnen, PhD thesis, Universität der Bundeswehr München, Neubiberg
- Weißflog (2010) Erläuterung zur Spülplanerstellung, Persönliche Mitteilung, Stadtentwässerung Dresden
- Winkler U. (2010), Berücksichtigung von demografischen und strukturellen Unsicherheiten bei der strategischen Kanalsanierungsplanung, in: Demografischer Wandel - Herausforderung für die Wasserwirtschaft, 159-169, DWA, Hennef, ISBN: ISBN 978-3-941897-33-5