

Universität Rostock
Professur für Wasserwirtschaft
Professur für Numerische Mathematik

Optimale Strategien zur Überwachung und Vermeidung von Sedimentation beim Einsatz drehzahl geregelter Abwasserpumpen

Kurztitel: Energieeffizienz vs. Sedimentation

Abschlussbericht über ein Forschungsprojekt gefördert unter dem AZ: 32253 von der Deutschen Bundesstiftung Umwelt

von


Prof. Dr. Jens Tränckner

Prof. Dr. Klaus Neymeyr

M.Sc. Martin Rinas

Dr. Alexander Fricke

Mai 2016

06/02		Projektkennblatt der Deutschen Bundesstiftung Umwelt			
Az	32253	Referat	24/0	Fördersumme	123.679 €
Antragstitel		Optimale Strategien zur Überwachung und Vermeidung von Sedimentation beim Einsatz drehzahl geregelter Abwasserpumpen			
Stichworte		Energieeffizienz, Sedimentation, Pumpstation, Abwasser			
Laufzeit	Projektbeginn	Projektende	Projektphase(n)		
18 Monate	01.10.2014	31.03.2016	1		
Zwischenberichte					
Bewilligungsempfänger				Tel	0381/498-3460
Universität Rostock Professur für Wasserwirtschaft Professur für Numerische Mathematik					0381/498-6551
				Fax	0381/498-3462 0381/498-6553
				Projektleitung	
				Prof. Tränckner/ Prof. Neymeyr	
				Bearbeiter	
				Martin Rinas/ Alexander Fricke	
Kooperationspartner		WILO SE (Dortmund) EURAWASSER Nord GmbH (Rostock) Abwasserzweckverband Darß (Wieck a.D.)			
Zielsetzung und Anlass des Vorhabens					
<p>Energieoptimaler Betrieb von Abwasserfördersystemen, wie im DBU-Projekt „Energieeffiziente Abwasserfördersysteme“ (Az: 29356-24/0) gezeigt, führt zwar zu Energieeinsparungen durch geringe Reibungsverluste, aber auch zu geringen Fließgeschwindigkeiten und damit der Gefahr von Ablagerungsbildung bis hin zur Verstopfung. Aus Sichtweise der Pumpwerksbetreiber sind Ausfall- bzw. Verstopfung einer Druckrohrleitung unter allen Umständen auszuschließen. Ziel des Projektes ist es, eine energieoptimale Pumpensteuerung unter Vermeidung von Ablagerungsproblemen zu entwickeln. Es sollen dafür Methoden für fallweise angepasste Steuerstrategien zur Vermeidung und Überwachung der Ablagerungsbildung entwickelt werden.</p>					
Darstellung der Arbeitsschritte und der angewandten Methoden					
<p>Drei Abwasserpumpstationen wurden exemplarisch auf ihre Anfälligkeit der Ablagerungsbildung unter energieoptimierter Steuerung untersucht. Dazu wurden die Stationen umgerüstet (Steuerung, Messtechnik), Förderströme zu berechnen, Ablagerungsverhalten des Abwassers in den Rohrleitungen mit Feststoffsonden sowie Laborversuchen analysiert und geeignete Steuerungsmaßnahmen unter Beachtung der Energieeffizienz für die Problemlösung zu entwickelt. Die im DBU-Projekt „Energieeffiziente Abwasserfördersysteme“ (Az: 29356-24/0) bereits ausgestattete Pumpstation im Pumpwerk-Prerow wurde ebenfalls betrachtet. Alle 3 Systeme bieten hinsichtlich Vorbehandlung unterschiedliche Voraussetzungen (Rostock-Schmarl: Rechen, System-Prerow: geschnittenes Abwasser, Regensburg: keine Vorbehandlung). Zur kontinuierlichen Überwachung und Bilanzierung der Feststofftransportprozesse wurden im System Rostock-Schmarl 2 Feststoffsonden installiert. Parallel wurde eine Methode zur kontinuierlichen Berechnung der Ablagerungshöhe aus Motoren- und Anlagenkenndaten entwickelt. Es wurden handhabbare labortechnische Methoden zur Bestimmung der abwasserspezifischen Sedimentations- und Erosionseigenschaften entwickelt. Damit werden notwendige Parameter zur Berechnung von Sedimentationsvorgängen in den Rohrleitungen sowie kritische Schubspannungen zur Remobilisierung der Ablagerungen in Abhängigkeit von Sedimentations- und Konsolidationszeit generiert. Mit den vorgenannten Methoden können notwendige fallspezifisch Randbedingungen zur Vermeidung bzw. Remobilisierung von Ablagerungen mit den Strategien zur energieoptimalen Steuerung kombiniert werden.</p>					

Ergebnisse und Diskussion

Mit der Umrüstung des Abwasserpumpwerks Rostock-Schmarl (PC-Steuerung, Feststoffsonden) wurde die energieoptimierte Steuerung integriert und ein in-situ Messverfahren installiert. Die Ablagerungshöhe lässt sich hinreichend genau durch Vermessung der Anlagenkennlinie in Verbindung mit der Leistungsaufnahme des Elektromotors berechnen. Die Laborversuche zur Charakterisierung des Abwassers wurden für die Pumpstation Rostock-Schmarl und Prerow durchgeführt. Hinsichtlich der Sedimentationseigenschaften im Ruhezustand zeigten sich schnelle Sedimentationsraten der suspendierten Partikel. Vor allem bei Niederschlagsereignissen neigt das Abwasser zur schnellen Sedimentation, hervorgerufen durch eine veränderte Partikelzusammensetzung. Unterschiede zwischen den Pumpstationen selbst konnten jedoch nicht festgestellt werden, obwohl unterschiedliche Vorbehandlungsstufen (Rechen in Rostock-Schmarl, geschnittenes Abwasser in Prerow) vorherrschten. Es sind nur geringe Schubspannungen notwendig, um sedimentierte Partikel zu remobilisieren ($T_{krit} = 0.12 \text{ Nm}^{-2}$ nach 24 Stunden Sedimentation). Die Überwachung der Ablagerungen in Rostock-Schmarl (Vermessung Anlagenkennlinie, Daten der Feststoffsonden) zeigten unter energieoptimiertem Betrieb keine Neigung zur Ablagerungsbildung und auch nicht bei der technisch möglichen Mindestfördermenge. Durch die zusätzliche Entwicklung eines Sedimenttransportmodells, kalibriert nach den Laborergebnissen und Daten der Feststoffsonden konnten auch geringere Fahrweisen simuliert werden. Auch die Modellierung des Systems unter Minimalbedingungen ($v = 0.2 \text{ ms}^{-1}$) zeigte eine ausgeglichene Feststoffbilanz. Verstopfungereignisse sind in Rostock-Schmarl, ausgehend von den Laborergebnissen, erst ab Fließgeschwindigkeiten von $v = 0.034 \text{ ms}^{-1}$ zu erwarten (Rostock-Schmarl). Die Integration energieoptimierter Steuerung in Regensburg (ohne Vorbehandlung) zeigte unter Zuhilfenahme der Ablagerungsberechnung keine permanente Ablagerungsbildung, ebenso wie im System Prerow (geschnittenes Abwasser). Es zeigte sich außerdem, dass die Berechnung der Ablagerungshöhe ebenso wie eine Bilanzierung der transportierten Feststoffmengen, durch ein in-situ Messverfahren, genutzt werden kann.

Öffentlichkeitsarbeit und Präsentation

Auf der am 31.08.2016 bis zum 02.09.2016 in Rotterdam stattfindenden SPN8 (8th International Conference on Sewer Processes & Network) wird die Methode zur Bestimmung der Sedimentationsparameter vorgestellt. Eine nachfolgende peer review Veröffentlichung ist angestrebt. Zwei weitere Paper sind in Vorbereitung. Eine zusammenhängende Projektdarstellung ist weiterhin für die Veröffentlichung in Korrespondenz Abwasser vorgesehen. Das Thema ist auch für die BDEW-Landesverbandstagung (Nord) angemeldet. Auf der „3rd International Rotating Equipment Conference (IREC)“ in Düsseldorf (14 – 15 September 2016) ist eine Präsentation und Veröffentlichung durch die Wilo Se angestrebt.

Fazit

In den untersuchten drei Objekten konnte nachgewiesen werden, dass eine energieoptimale Reduzierung der Drehzahl und der Fließgeschwindigkeit zu keinen Beeinträchtigungen während des Abwasserförderbetriebs führt. Zwar konnten geringe Schwankungen der berechneten Ablagerungshöhen in der Druckleitung festgestellt werden. Diese ergaben sich aber unabhängig von der verwendeten Steuerstrategie. Dies bestätigt auch die Versuche im Labor. Hier wurde eine kritische Schubspannung zur Lösung von Ablagerungen von $0,12 \text{ Nm}^{-2}$ festgestellt, welche bereits bei sehr kleinen Fließgeschwindigkeiten ($<0,1 \text{ m/s}$) erreicht wird. Durch Kombination von Laborversuchen mit dem entwickelten Sedimenttransportmodell lassen die Transportprozesse realitätsnah simulieren und die Wirkung von Steuerstrategien im Vorfeld quantitativ bewerten. Betreiber von Abwasserpumpstationen stehen der Drehzahlregelung ihrer Pumpen bisher noch skeptisch gegenüber, da sie die Betriebssicherheit gefährdet sehen. In diesem Projekt wurde jedoch gezeigt, dass signifikante Energieeinsparungen von bis zu 47 % (Regensburg) gegenüber der herkömmlichen Zweipunktsteuerung erzielt werden können, wobei selbst unter schwierigen Bedingungen keine negativen Auswirkungen auf den Pumpen- und Rohrleitungszustand festgestellt werden konnten.

Inhaltsverzeichnis

Projektkennblatt.....	3
I. Abbildungsverzeichnis	6
II. Tabellenverzeichnis.....	7
III. Abkürzungsverzeichnis/Symbolverzeichnis.....	7
1. Zusammenfassung	8
2. Einleitung	9
3. Laborversuche	10
3.1 Sedimentation.....	10
3.2 Erosion.....	18
4. Praxisergebnisse	23
4.1 Umrüstung der Pumpstationen	23
4.2 Ziele und Ergebnisse	25
5. Sedimenttransport in Druckwasserleitungen.....	27
5.1 Vorüberlegungen	27
5.2 Statistische Daten	32
5.3 Die Teilmodelle	33
5.4 Gesamtbilanz als Partielle Differentialgleichung	34
5.5 Numerische Ergebnisse	35
5.6 Diskussion weiterer Effekte	39
5.7 Abschließende Bemerkungen.....	39
6. Optimale und betriebssichere Steuerung von Abwasserpumpstationen.....	40
6.1 Berechnung von Förderströmen	40
6.2 Berechnung der Ablagerungshöhe	41
6.3 Auswertung der Ablagerungshöhe	43
6.4 Steuerung.....	44
7. Ökologische, technische und ökonomische Bewertung der Ergebnisse.....	45
7.1 Ökologische Bewertung	45
7.2 Technische Bewertung	46
7.3 Ökonomische Bewertung	46
8. Maßnahmen zur Verbreitung der Ergebnisse	47
9. Fazit.....	48
10. Literaturverzeichnis.....	49

I. Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Sedimentationsapparat Uni Rostock	12
Abbildung 2: M(t), S(t) & C(t) Versuch 9 APW Schmarl.....	14
Abbildung 3: Verteilungsfunktion $F(v_{s9})$ APW Schmarl	14
Abbildung 4: Daten Probennahme (* = berechnete Werte) mit Zulaufganglinie APW-Schmarl	16
Abbildung 5: Niederschläge Versuchsnummer 9.....	17
Abbildung 6: Niederschläge Versuchsnummer 12.....	17
Abbildung 7: Niederschlag und Zulauf Mitte Juli.....	17
Abbildung 8: Niederschlag und Zulauf Mitte August.....	17
Abbildung 9: Verteilungsfunktionen.....	18
Abbildung 10: Erosionszylinder Uni Rostock.....	19
Abbildung 11 Ergebnisse der Kalibrierung.....	21
Abbildung 12 Ansatz nach [ABD94]	22
Abbildung 13 Ansatz nach [Amo04].....	22
Abbildung 14 Logistische Funktion	22
Abbildung 15: Feststoffsonde ZKA-Rostock,.....	24
Abbildung 16: Feststoffsonde APW-Schmarl,.....	24
Abbildung 17: Beispiel Tagesverlauf Sonden, Q am 1. August.....	25
Abbildung 18: Beispiel Tagesverlauf Differenzmenge am 1. August.....	26
Abbildung 19: Tagesverlauf Differenzmengen 1.-31. August	26
Abbildung 20: Sinkgeschwindigkeit und maximale Sinkdauer in Abhängigkeit von der Partikelgröße	28
Abbildung 21: Kumulierte Trockenmasse und Ausfallrate.....	29
Abbildung 22: Förderströme und Feststoffkonzentration bei optimaler Steuerung der Pumpen in Rostock/Schmarl	30
Abbildung 23: Feststoffkonzentration in Abhängigkeit vom Abwasserzulauf während eines Pumpzyklusses	31
Abbildung 24: Histogramm über Lauf- und Stillstandzeiten bei Zweipunktsteuerung.....	32
Abbildung 25: Histogramm über Lauf- und Stillstandzeiten bei energieoptimaler Steuerung	32
Abbildung 26: Wandschubspannung in Abhängigkeit von der Fließgeschwindigkeit in der Druckrohrleitung Rostock/Schmarl.....	34
Abbildung 27: Vergleich von simulierten und gemessenen Feststoffkonzentrationen an Rohrausgang	36
Abbildung 28: Verlauf von Konzentration und Masse entlang der Druckleitung.....	37
Abbildung 29: Transportierte kumulative Masse für den 01.02.2016, Sondenwerte & Modellwerte ..	38
Abbildung 30 Schubspannungen differenzierter DN gegen die Fließgeschwindigkeit.....	39
Abbildung 31: Leistungsaufnahmekennfeld der Pumpe in Prerow	40
Abbildung 32: Rohrquerschnitt bei Ablagerungen.....	42
Abbildung 33: Verlauf der Ablagerungshöhe in Druckleitung Rostock/Schmarl.....	43

II. Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Arbeitspakete und Fristen.....	10
Tabelle 2: Versuchseinstellungen.....	12
Tabelle 3: Beispielrechnung Verteilungsfunktion.....	14
Tabelle 4: Ergebnisse der Teilmassenberechnung C(t)	16
Tabelle 5 Versuchseinstellungen Erosion	20
Tabelle 6: Ermittelte kritische Schubspannungen nach verschiedenen Sedimentationszeiten.....	23

III. Abkürzungsverzeichnis/Symbolverzeichnis

Abkürzung	Bezeichnung	Einheit
APW	Abwasserpumpwerk	[-]
\bar{A}	Querschnittsfläche Druckleitung	[m ²]
d	Durchmesser Druckleitung	[m]
d_h	hydraulischer Durchmesser Druckleitung	[m]
CSB	Chemischer Sauerstoffbedarf	[mg l ⁻¹]
DM	Druckmessgerät	
DN	Nennweite	[mm]
EZG	Einzugsgebiet	[-]
FU	Frequenzumformer	
H	Wasserstand	[m]
H	manometrische Förderhöhe	[m]
HPW	Hauptpumpwerk	
IDM	Induktives Durchflussmessgerät	
N	Drehzahl	[min ⁻¹]
oTS	Organische Trockensubstanz	[mg l ⁻¹ ; %]
Q	Durchfluss	[m ³ h ⁻¹]
P	Druck	[Pa]
P	Leistung	[W]
PE-HD	Polyethylen „high density“	
SPS	Speicherprogrammierbare Steuerung	
T	Zeit	[s]
TS	Trockensubstanzgehalt	[mg l ⁻¹ ; kg m ⁻³]
V	Fließgeschwindigkeit	[ms ⁻¹]
v_s	Sedimentationsgeschwindigkeit	[mms ⁻¹]
V	Volumen	[m ³]
ZKA	Zentrale Kläranlage	[-]
H	Wirkungsgrad	[-]
τ	Kritische Schubspannung	Nm ⁻²

1. Zusammenfassung

Das Projekt „Optimale Strategien zur Überwachung und Vermeidung von Sedimentation beim Einsatz drehzahl geregelter Abwasserpumpen“ wird an der Universität Rostock an der Professur für Wasserwirtschaft unter der Leitung von Prof. Dr.-Ing. habil. Jens Tränckner sowie an der Professur für Numerische Mathematik unter der Leitung von Prof. Dr. Klaus Neymeyr in Kooperation mit der Firma WILO SE, dem Abwasserzweckverband Darß und der Eurawasser Nord GmbH durchgeführt. Das Vorhaben mit dem Aktenzeichen 32253 wird von der Deutschen Bundesstiftung Umwelt (DBU) mit einer Summe von 123.679 € gefördert.

In diesem Projekt wurde mit theoretischen sowie praktischen Methoden der Nachweis einer gleichzeitig energieeffizienten sowie betriebsunproblematischen Steuerstrategie erbracht. Grundlegende Optimierungen durch Frequenzumformer zur drehzahlregelbaren Pumpensteuerung im Abwasserpumpwerk Rostock/Schmarl sowie im Pumpwerk Regensburg erzielten Energieeinsparungen von 11% in Rostock und bis zu 47% in Regensburg. Trotz schwieriger Bedingungen mit unbehandeltem Abwasser und geringen Fließgeschwindigkeiten ($< 0,2$ m/s), konnte die Bildung permanenter Ablagerungen vermieden werden.

Die praktische Erprobung erfolgte im Pumpwerk Rostock/Schmarl durch eine PC-Steuerung, sowie im Pumpwerk Regensburg lediglich durch eine Speicherprogrammierbare Steuerung (SPS). Zur Regelung der Betriebsweise wurde die im Projekt mit dem Aktenzeichen 29356-24/0, entwickelte Steuerung verwendet. Installierte Feststoffsonden im Pumpwerk Rostock/Schmarl ermöglichten die Überwachung des Partikelflusses. Zusätzlich wurde die Ablagerungshöhe innerhalb der Rohrleitung (DN600) aus der Anlagenkennlinie errechnet.

Die Berechnung der Ablagerungshöhe aus der Anlagenkennlinie ist für die Beurteilung des Ablagerungszustandes der Rohrleitung hinreichend genau, sodass in herkömmlichen Systemen auf Feststoffsonden verzichtet werden kann. Aus den Umsetzungen differenzierter Steuerstrategien in Rostock/Schmarl (Frequenzminderung, Pumpen-Parallelbetrieb) ergaben sich keine signifikanten Änderungen im Ablagerungszustand. Die vermeintliche Ablagerungshöhe steigt zwar mit mindernder Frequenz, hat aber keine Auswirkungen auf das Massengleichgewicht. Die Partikel sammeln sich mit sinkender Fließgeschwindigkeit zunehmend am Boden, woraus eine inhomogene Feststoffverteilung mit steigender Konzentration zur Sohle entsteht, und werden anschließend als Geschiebefracht transportiert. Permanente Ablagerungen entstehen nicht, da die im Labor ermittelten kritischen Schubspannungen ($0,12$ N/m²) bereits bei sehr geringen Fließgeschwindigkeiten erreicht werden.

Zum theoretischen Nachweis zur Vermeidung und Überwachung von Ablagerungen wurden Sedimentations- sowie Erosionsversuche durchgeführt. Die Ergebnisse flossen in ein Sedimenttransportmodell mit dem weitere Szenarien gerechnet wurden. Selbst im Modell lassen sich durch die Variation verschiedener Eingangsparameter keine Probleme im laufenden Betrieb feststellen.

Ursache der oft befürchteten Betriebsprobleme ist die überschätzte Verstopfungsneigung von Abwasserleitungen durch zu geringe Transporteigenschaften im Rohrleitungssystem. Die not-

wendigen, kritischen Werte einzelner wichtiger Transportparameter werden bereits bei geringen Fließgeschwindigkeiten erreicht, sodass energieeffizienter Betrieb durch drehzahlregelbare Steuerung und betriebssichere Anlagenführung kein Widerspruch darstellt.

2. Einleitung

Pumpensysteme und Druckluftanlagen sind für ca. ein Drittel des Stromverbrauchs in der Industrie verantwortlich [Fra07]. Durch eine intelligente Steuerung der Anlagen können Einsparungen von ca. 30 % erzielt werden [Her08].

Beim Betrieb von Abwasserpumpstationen besteht ein hohes Einsparpotential durch eine bedarfsabhängige Drehzahlregelung der Pumpen. Entsprechende Regelstrategien wurden im DBU-Projekt „Untersuchung der Möglichkeiten eines energieeffizienten Betriebsmanagements von Abwasserfördersystemen“ erfolgreich entwickelt und an einer Abwasserpumpstation umgesetzt. Im konkreten Fall konnte dadurch eine Energieeinsparung von 20 % erzielt werden.

Die Energieeinsparung resultiert aus einer Absenkung der Fließgeschwindigkeit und damit der Reibungsverluste. Dies erhöht aber das Risiko der Ablagerungsbildung. Betreiber von Abwasserpumpstationen stehen der Drehzahlregelung von Abwasserpumpen daher bisher in vielen Fällen skeptisch gegenüber, zumal durch die Regelung empfohlene Mindestfließgeschwindigkeiten bewusst unterschritten werden. In diesem Projekt sollen deshalb für die Anwendung der Drehzahlregelung Strategien entwickelt werden, mit denen die Sedimentbildung überwacht und vermieden werden kann. Die Methoden sollen dabei mit der typischerweise vorhandenen Messtechnik auskommen.

Um Ablagerungen wieder zu lösen, kann entweder der Durchfluss temporär erhöht oder das Rohr mit Druckluft gespült werden. Druckluftspülungen sind jedoch nicht überall verfügbar und wo vorhanden mit einem hohen Stromverbrauch verbunden. Fehlende Kenntnis des aktuellen Ablagerungszustandes der Druckleitung führt dazu, dass Druckluftspülungen prophylaktisch eingesetzt werden. Aus diesem Grund sollen Strategien zum optimalen Betrieb des Gesamtsystems, bestehend aus der drehzahlregelbaren Abwasserpumpe und der Druckluftanlage, entwickelt werden.

Das Projekt gliederte sich in folgende Teilziele:

- Nicht-invasive Bestimmung des aktuellen Ablagerungszustands der Druckrohrleitung aus der Leistungsaufnahme der Pumpe und dem Zulauf zum Pumpensumpf
- Versuche zur Vermeidung von Ablagerungen durch Bestimmung der fallweise erforderlichen minimalen Fließgeschwindigkeit
- Untersuchung zur Mobilisierbarkeit von Ablagerungen durch Erzeugung starker Geschwindigkeitsgradienten in der Druckrohrleitung
- Optimierung der Druckluftspülung hinsichtlich Einsatzhäufigkeit und Verfahrensführung

Zur Untersuchung des Sedimentationsverhaltens verschiedener Abwässer wurden Laborversuche durchgeführt. Die dabei gewonnenen Erkenntnisse sind in die Entwicklung der Strategien zur optimalen Betriebsweise von Pumpstationen eingegangen. Zur Validierung der Methoden sind zwei reale Pumpstationen verwendet worden

Das Projekt soll den theoretischen und praktischen Nachweis erbringen, dass Drehzahlregelung für den energieeffizienten Betrieb von Abwasserpumpstationen keine Einschränkung für die Betriebssicherheit bedeuten, sondern dass sich die Drehzahlregelung auch gezielt zur Überwachung und Vermeidung von Sedimentation einsetzen lässt.

Dabei gliederte sich das Projekt in die, in Tabelle 1 gelisteten Arbeitspakete.

Tabelle 1: Arbeitspakete und Fristen

Arbeitspaket	Frist
1. Nachrüstung der untersuchten Abwasserpumpstationen	31.05.2015
2. Berechnung von Förderströmen	31.12.2014
3. Untersuchungen zum Ablagerungsverhalten in der Druckrohrleitung des HPW Prerow und des HPW Schmarl	29.02.2016
4. Bestimmung von Abwassertypen und Laborversuche	31.12.2015
5. Möglichkeiten der Lösung von Ablagerungen mittels drehzahlregelbarer Abwasserpumpen	29.02.2016
6. Selbstlernende Methoden für die energetisch optimale Steuerung von Abwasserpumpstationen	29.02.2016
7. Schreiben des Abschlussberichts	31.03.2016

Nachfolgend werden zunächst die Laborversuche (Sedimentation und Erosion) mit den Ergebnissen dargestellt (AP 4), um anschließend zu den Ergebnissen der einzelnen Arbeitsphasen zu kommen.

3. Laborversuche

Es werden gezielt Abwässer des HPW Prerow und des HPW Schmarl auf transportrelevante Parameter analysiert. Eine bedarfsgerechte Pumpensteuerung mit entsprechenden Regelstrategien benötigt verschiedenste Eingangsdaten, welche Informationen bezüglich hydraulischer Anpassungen bereitstellen. Die benötigten Informationen werden in Laborversuchen (Sedimentation, Erosion) generiert um die hydraulischen Eigenschaften des betrachteten Systems sowie des Fördermediums zu bestimmen.

3.1 Sedimentation

Um erweiterte Informationen über die Sedimentationseigenschaften, insbesondere Sedimentationsgeschwindigkeiten (v_s) und jeweilige Mengenanteile, zu erhalten werden labortechnische Untersuchungen durchgeführt. Ziel ist es, verschiedene Sinkgeschwindigkeitsklassen aufzu-

stellen und die jeweiligen Mengenanteile zu analysieren. Des Weiteren werden neben den reinen Feststoffkonzentrationen auch organische Anteile sowie CSB-Gehalte bestimmt. Zur Bestimmung des TS- sowie oTS-Gehaltes wurde nach DIN 38409-1 verfahren [Deu87]. Die Erfassung des CSB-Gehaltes erfolgte durch einen Küvetten-Schnelltest. Als Ergebnis der TS-Bestimmung erhält man eine Verteilungsfunktion $F(v_s)$, welche die kumulierten Massenanteile in Abhängigkeit von der Sedimentationsgeschwindigkeit aufzeigt.

Für das Thema der Energieoptimierung wurde der folgende Versuchsaufbau, angelehnt an das VICPOL- Protokoll von [Gro08] und das VICAS-Protokoll von [CG09] bisher nicht angewandt. Er ist jedoch zur Erfassung der Sedimentationseigenschaften in Abhängigkeit von der Sedimentationsdauer gut geeignet. Um den Durchsatz zu erhöhen wurden 7 Zylinder verwendet, die jeweils separat als auch parallel mit Probenwasser befüllt werden können. Die Befüllung erfolgt aus einem Mischbehälter mit einem Fassungsvermögen von 30 L. Der Mischbehälter wird zur permanenten Homogenisierung der Probe mit einem Rührer durchmischt. In Abbildung 1 ist der Aufbau unter der Abzugshaube zu erkennen. Durch die Verwendung von unbehandelten Abwasserproben wurde die Anlage innerhalb der Abzugshaube errichtet um die Geruchsbelästigung zu minimieren. Die Befüllung der Sedimentationszylinder erfolgt durch eine Schlauchpumpe, zur Probenentnahme wird eine Vakuumpumpe verwendet, die durch Glasröhren am Boden jedes Zylinders eine Probenentnahme in Bodennähe erlaubt.

Ist der Füllvorgang beendet werden die in Tabelle 2 gelisteten Sedimentationszeiten abgewartet. Durch Änderung der Ventilstellung kann ein Vakuum im Probenbehälter, circa 30 Sekunden vor Ende der Sedimentationsdauer, entwickelt, entlüftet und eine definierte Menge am Boden abgesaugt werden. Durch die Elementare Bauweise der Anlage ist sie leicht auseinanderzubauen und zu lagern. Ein Zusammenbau kann innerhalb weniger Minuten erfolgen. Je nach ausgewählter Sedimentationsdauer und zu analysierenden Parametern können damit schnell und effizient Daten generiert werden. Eine detaillierte Beschreibung der Durchführung wurde in Form eines Protokolls mit allen Arbeitsschritten zur Durchführung 2 paralleler Versuche mit einer Versuchseinrichtung erstellt und wird als Hilfestellung oder zur Einweisung von Hilfswissenschaftlern genutzt werden.



Abbildung 1: Sedimentationsapparat Uni Rostock

Insgesamt wurden 19 Versuche durchgeführt. In Tabelle 2 sind die Versuchseinstellungen der durchgeführten Versuchsreihen in stark komprimierter Form dargestellt. Jede Sedimentationsdauer/-geschwindigkeit steht für eine Klasse und einen separaten Zylinder. Die wesentlichen Änderungen zwischen den Anordnungen sind markiert. Das Abwasser wurde vom APW-Schmarl, sowie dem HPW in Prerow entnommen. Bei beiden Standorten handelt es sich um unbehandeltes Abwasser. Das zum HPW-Prerow laufende Abwasser wird durch Einzelpumpstationen, die mit Schneidwerken ausgerüstet sind, gefördert.

Versuch	Sedimentationsdauer [min]							Filtriertes Probenvolumen nach Sedimentation [ml]
	Sedimentationsgeschwindigkeit [mm/s]							
1 - 2	5,	10	20	60	120	240	1440	100
	1,267	0,633	0,317	0,106	0,053	0,026	0,004	
3 - 8	7	15	30	60	120	240	1440	500
	0,905	0,422	0,211	0,106	0,053	0,026	0,004	
9								400
10	0,25,	0,75	3	7	30	240	1440	300
11	25,3	8,4	2,1	0,905	0,21	0,026	0,004	345
12 - 19								345

Tabelle 2: Versuchseinstellungen

Wie bereits in [CG09] erwähnt, ist die Ermittlung der Fraktionsanteile pro Sedimentationsklasse schwierig, da es keine einheitlich lange Sedimentationsstrecke gibt. Aufgrund der anfänglichen, homogenen Verteilung innerhalb der Zylinder beginnen die Partikel, unabhängig

ihrer Größe, auf unterschiedlichem Höhenniveau zu sedimentieren. Gelöst wird das Problem durch die $M(t)$ Funktion [Che92] & [CCL98], siehe Formel (1). $M(t)$ = kumulierte Trockenmasse, bezeichnet die Gesamtmasse sedimentierter Partikel zum Zeitpunkt t :

$$M(t) = S(t) + t \frac{dM(t)}{dt} \quad (1)$$

Wie in [CG09] bereits erwähnt, wurde von [Ber01] für eine Anpassung folgende Funktion gewählt:

$$M(t) = \frac{b}{1 + \left(\frac{c}{t}\right)^d} \quad (2)$$

Die Gesamtheit der vorher sedimentierten Partikel erhält man durch Umstellung der Formel (1) (vgl. [CG09]). $S(t)$ = kumulierte Trockenmasse, bezeichnet die Gesamtmasse sedimentierter Partikel zum Zeitpunkt $t-1$:

$$S(t) = M(t) - t \frac{dM(t)}{dt} \quad (3)$$

Für eine Anpassung wurde aus Formel (2) folgende Funktion abgeleitet (vgl. [CG09]).

$$S(t) = \frac{b \left(1 + (1-d) \left(\frac{c}{t}\right)^d\right)}{\left(1 + \left(\frac{c}{t}\right)^d\right)^2} \quad (4)$$

Die letztlich wichtige Verteilungsfunktion $F(v_s)$, welche die kumulierten Trockenmasseanteile in Abhängigkeit der Sedimentationsgeschwindigkeit aufzeigt, erhält man schließlich durch Formel (5):

$$F(v_s) = 100 \left(1 - \frac{S(t)}{M_{tot}}\right) \quad (5)$$

Für die Ausgleichsrechnung der $M(t)$ - und $S(t)$ -Werte wurden in Formel (2) und (4) nichtlineare Wachstumsmodelle verwendet. Diese Modelle wurden ebenso für die Regression der hier untersuchten Abwasserproben eingesetzt. Die zum Zeitpunkt t sedimentierte Partikelmasse wird durch die Funktion in Formel (6), $C(t)$ = aktuelle (engl. „current“) Trockenmasse, repräsentiert:

$$C(t) = t \frac{dM(t)}{dt} = M(t) - S(t) \quad (6)$$

Dabei handelt es sich um eine reine Umstellung der maßgebenden Parameter $M(t)$ und $S(t)$, bzw. der entsprechenden Funktionswerte. Eine Regressionsrechnung ist nicht erforderlich, da die benötigten Koeffizienten aus der Regression der $M(t)$ - und $S(t)$ -Funktionen hervorgehen. Durch die Subtraktion dieser Verteilungsfunktionen, kennzeichnet $C(t)$ die Anteile einer bestimmten Partikelklasse an der Gesamtmenge. Die $C(t)$ -Funktion ist letztlich in ihrer Form von der Größenzusammensetzung und deren Massenanteilen der untersuchten Probe abhängig. Sind weniger Grobstoffe/mehr Feinstoffe vorhanden verschiebt sich die $C(t)$ -Funktion nach rechts und umgekehrt.

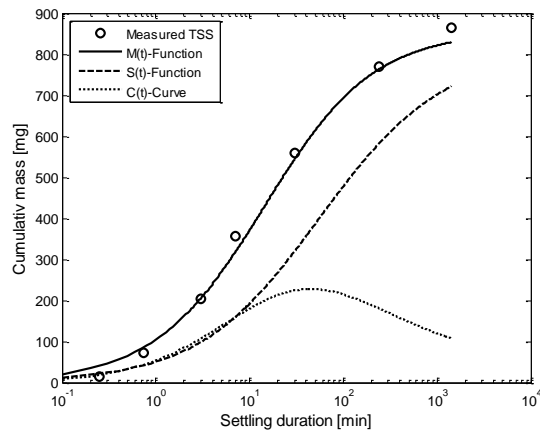


Abbildung 2: M(t), S(t) & C(t) Versuch 9 APW Schmarl

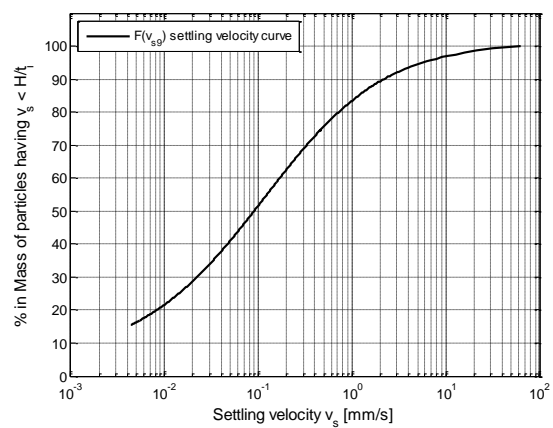


Abbildung 3: Verteilungsfunktion F(v_{s9}) APW Schmarl

In Abbildung 2 sind die 3 Funktionen der Versuchsnummer 9 beispielhaft dargestellt. Die Funktionen stellen die verschiedenen Anteile an der Gesamtmasse in Abhängigkeit von der Sedimentationsdauer dar. Als M(t) werden, wie bereits erwähnt, alle Partikel zusammengefasst die bis zur jeweiligen Dauer den Boden der Sedimentationsäule erreicht haben. Jeder Messpunkt steht dabei für eine Säule. In der Funktion S(t) sind alle Partikel enthalten die bereits in der vorrangegangenen Klasse erfasst wurden. Subtrahiert man von M(t) den Anteil S(t) erhält man die Masse der Partikel einer bestimmten Sedimentationsklasse C(t), zu der jeweiligen Sedimentationsdauer bzw. mit der jeweiligen Sedimentationsgeschwindigkeit. Als Ergebnis der Berechnung aus Formel (5) erhält man die in Abbildung 3 dargestellte Verteilungsfunktion.

Zum besseren Verständnis werden im Folgenden zwei Beispiele bezüglich der Verteilungsfunktion in Abbildung 3 genannt. Circa 50 % der Gesamtmasse des beprobten Abwassers hat eine Sedimentationsgeschwindigkeit von kleiner, als auch größer 0,09 mm/s (= 70 Minuten Sedimentation). Des Weiteren kann die Funktion in beliebig viele kleine Teile zerlegt werden. Dabei kann der jeweilige Anteil einer Geschwindigkeitsklasse prozentual erfasst werden. Teilt man die Funktion in 10 Minuten-Werte auf, wird folgendes deutlich (hier bis maximal 70 Minuten).

Intervall [min]	10	20	30	40	50	60	70
Intervall [mm/s] = Behälterhöhe H _B /Sedimentationsdauer t _s	0,6	0,3	0,2	0,15	0,13	0,1	0,09
Anteil an Gesamtmasse mit Sedimentationsgeschwindigkeit > als H _B /t _s [%]	23,0	30,9	36,2	40,2	43,6	46,3	48,6
Anteil an Gesamtmasse mit Sedimentationsgeschwindigkeit < als H _B /t _s [%]	77	69,1	63,8	59,8	56,4	53,7	51,2
Anteil der Intervallmasse [%]	23,0	7,9	5,3	4,0	3,4	2,7	1,7

Tabelle 3: Beispielrechnung Verteilungsfunktion

Aus den Tabelle 3 berechneten Intervallmassen geht hervor, dass zum Beginn, schnell sehr viel Material sedimentiert und mit fortschreitender Dauer der Anteil stetig sinkt. Die ersten 50% der Gesamtmasse benötigen circa 70 Minuten zum Sedimentieren, der restliche Teil allerdings

bis zum Versuchsende nach 24 Stunden, entsprechend 1370 Minuten. Aus der Verteilungsfunktion kann, wie in Tabelle 3 gezeigt, für beliebig große und kleine Abschnitte der Massenanteil sedimentierter Partikel errechnet werden.

Aus allen durchgeführten Versuchsreihen konnten sowohl aus den Auswertungen der analysierten Parameter als auch der Versuchsdurchführung selbst, Erkenntnisse gewonnen werden, die eine schrittweise Optimierung des Gesamtprozesses zur Folge hatten. Ab Versuchsnummer 9 wurden verschiedene Versuchseinstellungen geändert. Zunächst wurde die Sedimentationszeiten einzelner Klassen herabgesetzt um möglichst das gesamte Spektrum der Sedimentation abbilden zu können. Zudem wurden, soweit möglich, alle Schritte der Vorgehensweise, beispielsweise bei der Probenentnahme, weitestgehend vereinheitlicht. Maßgeblich trug auch die Erhöhung des Probenvolumens zur verbesserten Datenqualität bei. Die vergrößerten Entnahmemengen aus Tabelle 2 wurden vollständig zur TS-Bestimmung genutzt. Aufgrund steigender Konzentrationen und dem erhöhten Probenvolumen wurden teilweise sehr hohe Filtrationszeiten benötigt. Eine schrittweise Verringerung des Probenvolumens führte bei gleichbleibender Datenqualität zu geminderten Filtrationszeiten. Um den Durchsatz weiter zu erhöhen können auch zwei Versuche parallel ablaufen. Der hohe Aufwand rentiert sich, da somit sowohl qualitativ als auch quantitativ gute Daten erzeugt werden können.

Zur Bestimmung der Verteilungsfunktion ist der TS-Gehalt der Referenzprobe (R) ausschlaggebend, da aus diesem die Gesamttrockenmasse (TM_{ges}) des Zylinders (Volumen $V_Z = 2417,46$ ml) errechnet wird, als Beispiel:

$$TM_{ges} = TS_{Ref} * V_Z = 347,6 \frac{mg}{l} * 2,41746 l = 840,31 mg$$

Wird nun angenommen, dass jegliche Partikel innerhalb der Sedimentationsssäule innerhalb der maximal gewählten Sedimentationszeit zu Boden gehen, ist die Summe der Trockenmassen der 7 verwendeten Zylinder gleich der berechneten Gesamttrockenmasse TM_{ges} .

$$\sum_{i=1}^n TS_i * \left(\frac{V_Z}{n}\right) = TM_{ges} \qquad \sum_{i=1}^n C(t_i) = TM_{ges}$$

In Tabelle 4 sind einzelne Ergebnisse der Berechnung der Massenanteile pro Klasse, sowie die ermittelte Gesamt-Soll- und –Ist-Menge dargestellt. Das Beispiel zeigt, dass nicht immer 100 % der Sollmenge erreicht wird. Demnach befinden sich, beispielsweise in Versuchsreihe 12, nach 24 Stunden noch 40% der Partikel in Schwebelage.

Die Unterschiede in den erfassten Gesamtmengen sowie die Erfassung von teilweise über 100% (siehe Tabelle 4) könne auf 2 Ursachen reduziert werden.

- Fehler in Versuchsdurchführung (Probennahme, Befüllung, Entnahme, TS-Bestimmung)
- Veränderte Zusammensetzung der Abwasserprobe

Versuch	Parameter	0,25 (1)	0,75 (2)	3 (3)	7 (4)	30 (5)	240 (6)	1440 (7)	Σ TM ist [mg]	Σ TM soll [mg]	Diff. [%]
	Sedimentationsdauer [min] (Zylinder)										
	Sedimentationsgeschwindigkeit [mm/s]	25,3	8,4	2,1	0,905	0,211	0,026	0,004			
9	C(t) [mg]	13,2	58,0	133,9	151,4	202,6	209,6	96,6	865,2	840,3	24,93
	C(t) [%]	1,57%	6,90%	15,93%	18,02%	24,11%	24,94%	11,50%	102,97 %	100,00 %	2,97%
12	C(t) [mg]	150,2	173,7	169,2	146,6	125,3	263,6	497,5	919,7	1526,0	-606,34
	C(t) [%]	2,64%	1,55%	8,30%	6,48%	7,40%	5,96%	27,93%	60,27%	100,00 %	-39,73%

Tabelle 4: Ergebnisse der Teilmassenberechnung C(t)

Fehler aus der Versuchsdurchführung sind kaum zu vermeiden, da sich trotz allen Vereinheitlichungen, selbst kleinste Ungleichheiten aufsummieren. Auf eine Berechnung der Fehlerfortpflanzung wird verzichtet, da die Datenqualität für das Anwendungsgebiet hinreichend ist.

Eine veränderte Abwasserzusammensetzung entsteht aus unterschieden in den Zuläufen zum Pumpensumpf, sowie durch den Einfluss von Regenereignissen. Wird eine Probe bei verringerten Zuläufen entnommen, enthält diese, aufgrund geringerer Transportkapazitäten, weniger grobe Bestandteile. Der TS-Gehalt allerdings ist erhöht, da bei nahezu gleichbleibender Feststoffmenge der Wasseranteil sinkt. In Abbildung 4 sind zu den Beispielversuchen die jeweiligen Entnahmedaten, -uhrzeiten sowie zu diesen Zeiten die Zu- und Abläufe des Pumpwerks gelistet.

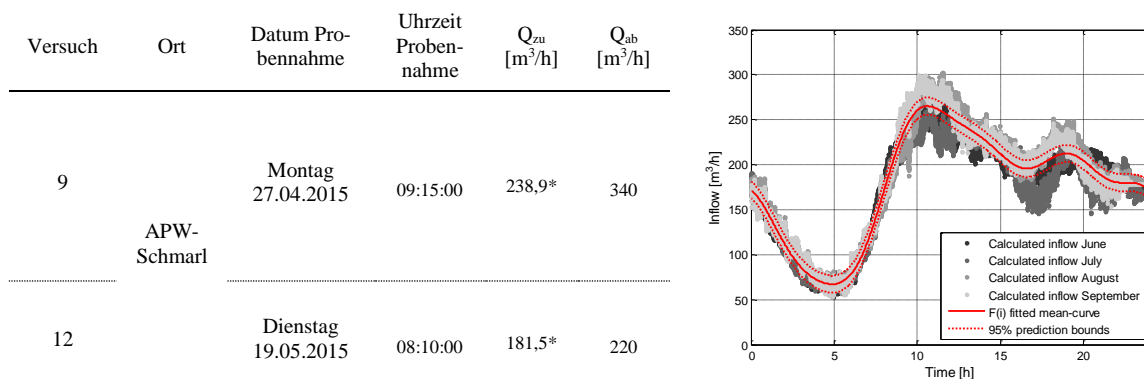


Abbildung 4: Daten Probennahme (* = berechnete Werte) mit Zulaufganglinie APW-Schmarl

Die Unterschiede bezüglich des Zulaufstroms zwischen Versuchsreihe 9 und 12 belaufen sich auf 57,4 m³/h. In Abbildung 5 und Abbildung 6 sind die stündlich aufgezeichneten Niederschlagsmengen der Station Warnemünde (liegt im EZG des APW-Schmarl) bis 48 h vor Probenahme dargestellt. In beiden Fällen hat es unmittelbar vor, bzw. teilweise auch während der Probenahme Regenfälle gegeben. Bei Versuchsnummer 9 fallen diese etwas höher aus, bis circa 1,2 mm/h. Für die Versuchsnummer 12 wurden Niederschlagsmengen von maximal 0,6 mm/h unmittelbar vor Probenahme verzeichnet.

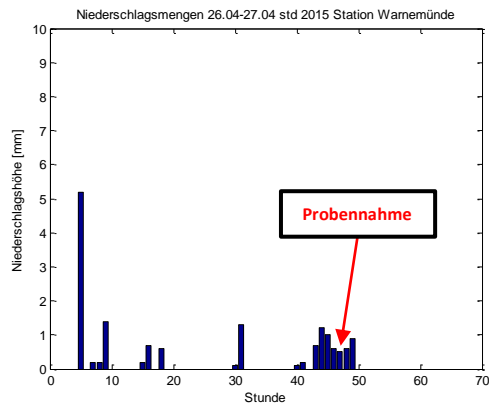


Abbildung 5: Niederschläge Versuchsnummer 9

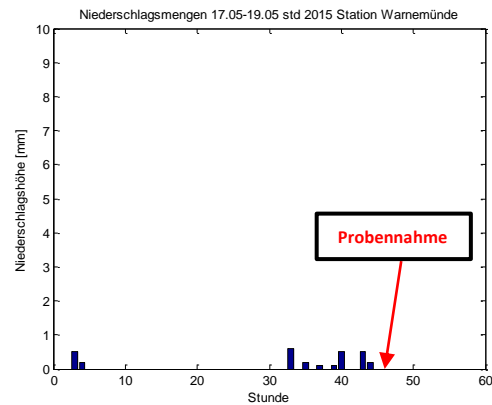


Abbildung 6: Niederschläge Versuchsnummer 12

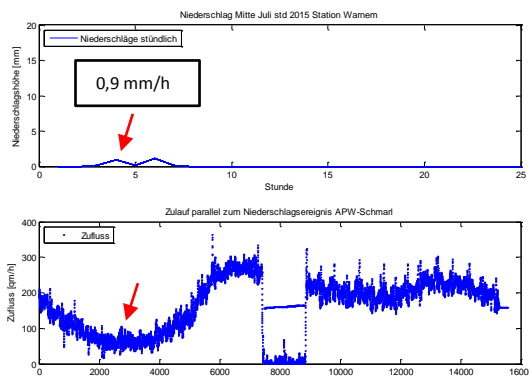


Abbildung 7: Niederschlag und Zulauf Mitte Juli

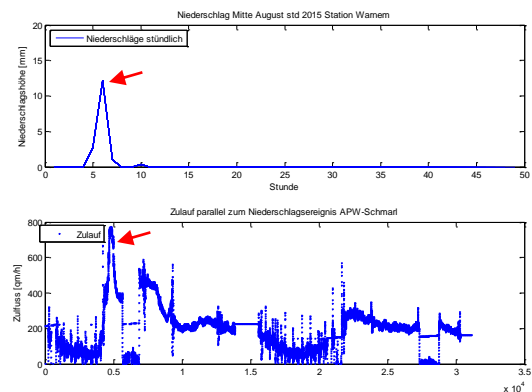


Abbildung 8: Niederschlag und Zulauf Mitte August

Die in Abbildung 4 errechneten Zulaufwerte des Pumpwerkes in Schmarl sind aus der gemittelten Zulauffunktion errechnet, da konkrete Daten erst ab Ende Mai 2015 zur Verfügung stehen. Die Berechnung der Zuläufe ist daher rein Zeitabhängig. Regenereignisse zum Zeitpunkt der Entnahme, die Einfluss auf den Zulauf zum Pumpwerk haben, können nicht zurückgerechnet werden. In Abbildung 7 und Abbildung 8 sind Beispielergebnisse aus dem Sommer 2015 dargestellt.

Sowohl bei starken (Abbildung 8) als auch kleinen Regenereignissen (Abbildung 7) steigt der Zulauf zum Pumpwerk schnell an. Die abflusswirksamen Flächen im Stadtgebiet übertragen ihre Niederschlagsmengen sehr schnell in das Trennsystem. Die maximale Differenz (Trocken- zu Mischzufluss) liegt im Beispiel aus Abbildung 7 zwischen bei $50 \text{ m}^3/\text{h}$. Die Gesamtdauer des Ereignisses beläuft sich im Pumpwerk auf circa 7 Minuten. Das Beispiel aus Versuchsnummer 12 (Abbildung 6) wurde nicht durch ein Niederschlagsereignis beeinflusst.

Die bereits aus der Zulauf-Funktion errechnete Differenz zwischen Versuchsnummer 9 und 12 erfährt durch das Niederschlagsereignis bei Versuch 9 eine Erhöhung. Es wird sich an dem Ereignis aus Abbildung 7 orientiert und ein Zuschlag von $50 \text{ m}^3/\text{h}$ addiert. Es kann demnach von etwas über $100 \text{ m}^3/\text{h}$ Zufluss-Differenz zwischen den Versuchsreihen 9 und 12 ausgegangen werden. Der verringerte TS-Gehalt ($347,6 \text{ mg/l}$) entsteht scheinbar durch einen vergrößerten Wasseranteil. In Versuchsreihe 12 ist der Wasseranteil weitaus geringer, durch den geringeren Zulauf aus der Zulauf-Funktion, sowie dem fehlendem Einfluss der Niederschläge, wodurch sich der Feststoffanteil erhöht.

Die Unterschiede zwischen Trocken- und Regenwetterabfluss zeigen sich auch letztlich in den Verteilungsfunktionen in Abbildung 10. Dies wurde ebenfalls von [CG09] festgestellt. Aus den Untersuchungen einer Mischkanalisation unter trockenen sowie nassen Verhältnissen, ergaben sich Verteilungsfunktionen mit unterschiedlichen Anstiegen. Eine Abflachung der Kurve bei trockenem Abfluss ist ebenso wie ein vergrößerter Anstieg der Verteilung bei größeren Abflüssen die Folge.

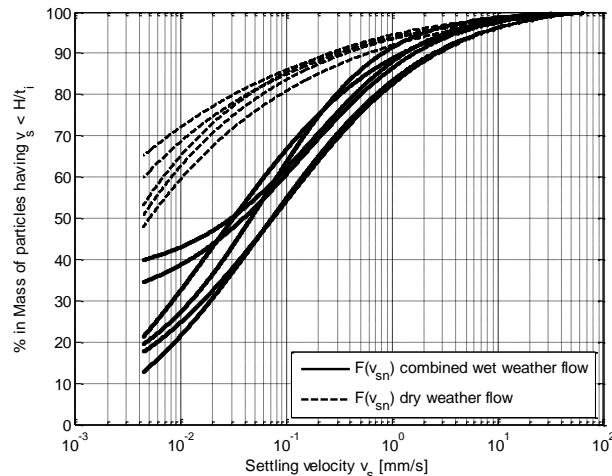


Abbildung 9: Verteilungsfunktionen

Die Funktionen werden letztlich genutzt, um verschiedene Anpassungsstrategien im Modell zu entwickeln, als auch in der Validierungsphase zu überprüfen. Mit den Verteilungsfunktionen ist es möglich Anpassungsstrategien noch weiter zu verfeinern um letztlich für sämtliche Systemzustände optimale Steuerungen zu entwickeln.

Aus der Analyse der organischen Bestandteile (oTS, CSB) gehen keine gesonderten Erkenntnisse hervor. Eine Konsolidierung oder biogene Verfestigung der Sedimente konnte aufgrund der geringen Sedimentationszeiten nicht festgestellt werden. Der Großteil des organischen Materials befindet sich innerhalb der feinen Sedimentklassen mit niedrigen Sedimentationsgeschwindigkeiten. Eine Gefährdung der Rohrleitungen, bei unveränderter Abwasserzusammensetzung, zur Konsolidation kann ausgeschlossen werden, da der Transport in den Leitungen nicht lang genug gestoppt wird.

3.2 Erosion

Während sich das Abwasser in Bewegung befindet, finden, je nach angreifenden Kräften auf die Partikel, unterschiedlich stark ausgeprägte Sedimentations- und Erosionsvorgänge statt. Da eine Vielzahl an Kräften, wie Auftriebs-, Gravitations-, Antriebs- und Zugkraft, sowie Effekten, wie Advektion, Diffusion und Dispersion zur Beschreibung des Zustandes eines Partikels herangezogen werden können, wird die Schubspannung als maßgebender Parameter für den Zustand eines Partikels im Fluid gewählt, da diese die direkt einwirkenden Kräfte beschreibt (vgl. [VAB94]). „Die Geschwindigkeit besitzt zwar den Vorteil, dass sie einfacher bestimmbar bzw.

messbar ist, gegenüber der Schubspannung ist sie aber nur eine mittelbare Größe. Die Bett-schubspannung hingegen stellt den Parameter dar, der unmittelbar die die Feststoffbewegung verursachenden Kräfte repräsentiert.“ [Ris95, S.27]. Konkret handelt es sich hier um die Erfassung der Erosionsschubspannung in einem Laborversuch, um Sedimente in Abhängigkeit von verschiedenen Sedimentationszeiten von der Sohle zu lösen.

Ausschlaggebend für die Auswahl der Versuchsanordnung sind folgenden Punkte:

- Durchführbarkeit der Erosionsversuche von einer Person im Labormaßstab
- Einfacher Auf- und Rückbau
- Schnelle Erfassung von qualitativ hochwertigen Messdaten
- Relativ genaues, erprobtes Messverfahren

Um diese Anforderungen zu erfüllen, wurde eine Erosionsapparatur, basierend auf den Untersuchungen von [Hoe15] entwickelt.



Abbildung 10: Erosionszylinder Uni Rostock

Bei der hier verwendeten Versuchsanordnung ist das untere Ende mit einem Blindflansch verschlossen. Dieser sorgt neben einem stabilen Stand der PVC Röhre auch für die Möglichkeit die Versuchsanordnung einfach zu reinigen. Für einen gleichmäßigen Anstieg der Sohl-schubspannung ist ein Drehzahlregelbares Rührwerk verbaut. Ein Matlab-Skript steuert das Rührwerk nach Programmstart selbstständig in definierten Intervallen. Für die Durchmischung wurde ein dreiblättriger Rührer in Kombination mit 6 Strömungsbrechern verwendet. Um die Partikelbewegung zu erfassen wurde eine dynamische Extinktionssonde (DEP) verwendet. Die Probenahme ist durch ein PVC-Rohr DN10 am Boden der Apparatur möglich. Diese Versuchsdurchführung ist relativ einfach gehalten. Nach der Kontrolle der Positionierung aller Instrumente und Geräte wird der Behälter mit homogen durchgemischtem Abwasser befüllt.

Um die Messung nach der jeweiligen Sedimentationszeit zu starten wird die DEP-Sonde in klarem Wasser kalibriert. Fünf Minuten vor Ablauf der geplanten Sedimentationszeit wird die Sonde vorsichtig in die Halterungen eingesetzt. Beim Einsetzen ist darauf zu achten das möglichst geringe Turbulenzen erzeugt werden. Sobald die DEP-Sonde richtig sitzt, wird die Extinktionsmessung sowie das vorher eingestellt Rührprogramm gestartet. Nach Beenden eines Messintervalls wird die Anlage entleert und mehrfach mit klarem Wasser gespült. Bei größeren Verunreinigungen wird der Flansch auf der Unterseite des PVC Zylinders geöffnet um alle Rückstände der Messung entfernen zu können. In Tabelle 5 sind die Versuchseinstellungen der Erosionsversuche gelistet. Aufgrund der geringen Unterschiede in den Sedimentationsversuchen, wurden die Abwasserproben lediglich aus dem APW-Schmarl gezogen.

Versuch	Ansatz	Sedimentationsdauer [h]	Rührwerkeinstellung	Probennahmezeit
			Start/Ende/Stufe/Dauer [rpm/rpm/rpm/sec]	
1	I	0,33/0,66/1/2	20/400/10/60	08.09.2015 11:45
2	I	0,33/0,66/1/2	20/400/10/60	15.09.2015 12:15
3	II	0,33/0,66/44/72/	20/400/10/60	14.10.2015 13:00
4	III	0,33/1/4/7/24	20/400/10/60	28.10.2015 10:00
5	III	0,33/1/4/7/24	20/400/10/60	23.11.2015 11:30

Tabelle 5 Versuchseinstellungen Erosion

Die Bestimmung des Trockenrückstandes und des Glührückstands aus dem beprobten Erosionsmessungen wurde wie in [Deu87] beschrieben ermittelt. Der chemische Sauerstoffbedarf (CSB) der Proben wurde mit Hilfe eines Küvettenschnelltest nach [Deu03].

Um aus den Drehzahlen des Rührers die auf dem Grund der Versuchsvorrichtung herrschende Schubspannung zu ermitteln ist es nötig die Erosionsapparatur zu kalibrieren. Um den Zusammenhang zwischen Drehzahl und Sohlschubspannung zu ermitteln, wurde die Shields-Approximation nach Zanke (2013) für die von Shields (1936) erhobenen Messwerte verwendet [Hoe15], [Lan13].

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

$\tau_{c,shields}$ =kritische Schleppspannung nach Shields

$u_{rms,b}$ =Standardabweichung der Geschwindigkeitsschwankungen

v_b =Geschwindigkeit am Boden in Höhe der Körner

v^* =gesamte Schubspannungsgeschwindigkeit

K =Koeffizient zur Beschreibung der Kohäsionswirkung

In [Lan13] ist die Vorgehensweise der Kalibrierung mithilfe der oben gegebenen Formel beschrieben.

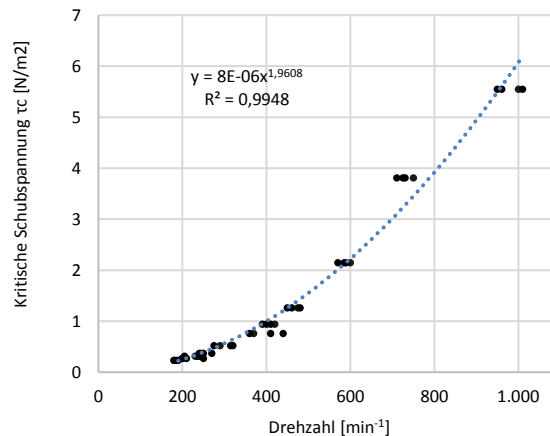


Abbildung 11 Ergebnisse der Kalibrierung

Um den Zusammenhang zwischen der so ermittelten kritischen Sohlschubspannung und der Rührerdrehzahl zu ermitteln ist es nötig die Drehzahl zu bestimmen bei der die jeweilige Korngröße erodiert. In Abbildung 11 ist der ermittelte mathematische Zusammenhang dargestellt. Um die aufgenommenen Daten reproduzierbar in die kritische Sohlschubspannung umrechnen zu können sind in der Literatur mehrere Ansätze zu finden, die alle versuchen einen Punkt zu definieren bei dem die ersten Erosionserscheinungen auftreten. In dem Ansatz nach [AM04] wird mit Hilfe von Regression eine lineare Funktion auf die Ausgangskonzentration angepasst. Für die Werte nach eindeutigem Beginn und vor Ende der Erosion wird eine logarithmische Funktion gewählt. Aus dem Schnittpunkt dieser beiden Funktionen in einem halb logarithmischen Koordinatensystem lässt sich die Sohlschubspannung ermitteln (Abbildung 7).

Der Ansatz von [ABD94] ähnelt sehr dem Ansatz von [Amo04]. Beide legen zwei Regressionskurven durch die Messdaten um anhand des Schnittpunkts die kritische Sohlschubspannung zu bestimmen. In diesem Ansatz sind im Gegensatz zum Ansatz nach [Amo04] beide Funktionen Potenzfunktionen, welche in einem doppelt logarithmischen Koordinatensystem aufgetragen werden (Abbildung 13). Da in den hier durchgeführten Versuchen die Sohlschubspannung, trotz beginnender Erosion noch weiter erhöht wurde zeigt sich in den Messwerten ein typischer Sättigungsverlauf. Da die kritische Sohlschubspannung als Punkt definiert ist an dem die ersten Partikel erodieren fällt eine Festlegung dieses Punktes schwer. Um diesen dennoch festzulegen wurde in dieser Arbeit angenommen, dass die kritische Sohlschubspannung erreicht ist, wenn die Funktion 10% des maximalen Extinktionsanstiegs erreicht hat. Diese 10% ergeben sich aus dem in der Kalibrierung verwendeten Wert für den Start der Erosion. In dem Beispiel aus Abbildung 14 konnte die logistische Funktion (Ex. $= \frac{0,412}{1+7839,55 \cdot e^{-0,047 \cdot x}} + 0,85$) mit einem Regressionswert von 0,94 angepasst werden.

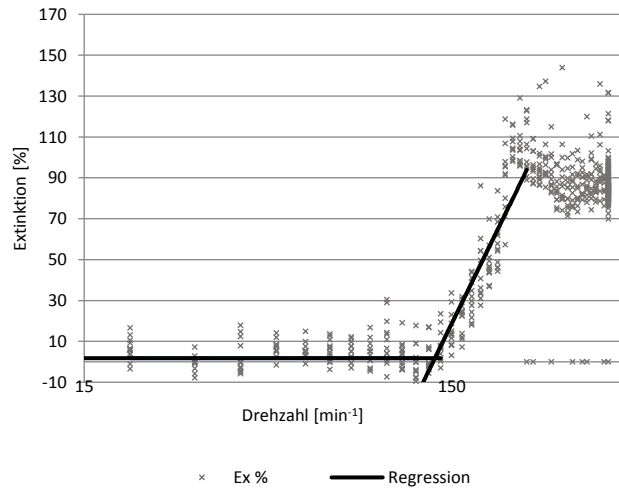


Abbildung 12 Ansatz nach [ABD94]

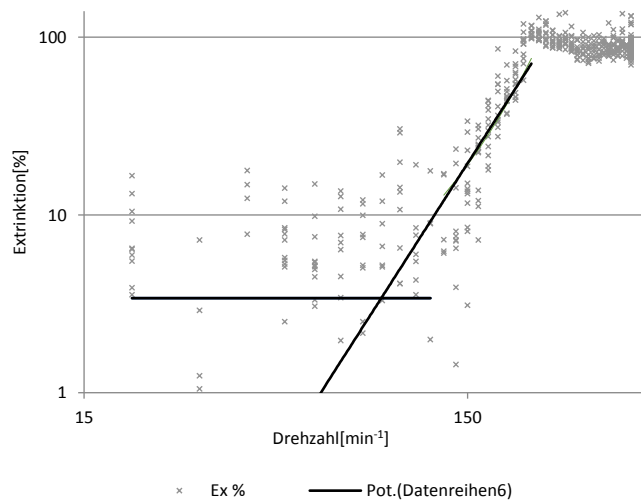


Abbildung 13 Ansatz nach [Amo04]

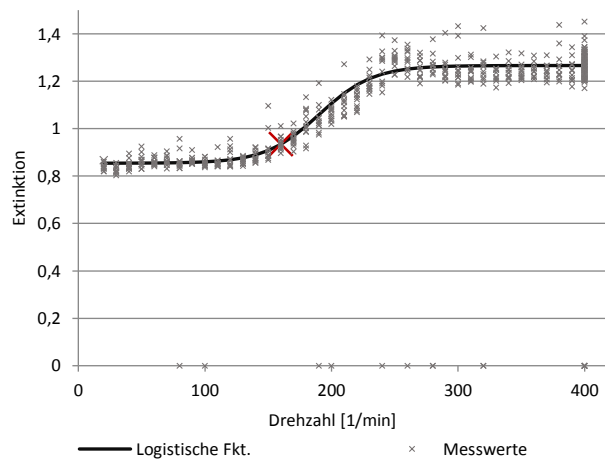


Abbildung 14 Logistische Funktion

Diese hat 10% des Gesamtanstiegs bei einer Drehzahl von 150 min^{-1} erreicht. In der Umrechnen mit der Kalibrierfunktion ($y=8 \cdot 10^{-6} \cdot x^{1,9608}$) errechnet sich eine kritische Sohlschubspannung von $0,148 \text{ N/m}^2$.

Zur Auswertung der Messdaten wurde sich auf die drei oben beschriebenen Ansätze beschränkt. Wie jedoch in Tabelle 6 zu erkennen, weicht der Ansatz nach [Amo04] ($0,054 \text{ N/m}^2$) stark von den Ergebnissen nach [ABD94] ($0,129 \text{ N/m}^2$) und der Anpassung einer logistischen Funktion ($0,168 \text{ N/m}^2$) ab. Jedoch lässt sich endgültig nicht festlegen, welcher der ermittelten Werte der tatsächlichen kritischen Sohlschubspannung entspricht.

Bei der Auswertung verschiedener Sedimentationsdauern fällt bei den Ergebnissen auf, dass die Schubspannungen der 20 minütigen Sedimentation extrem hoch ausfallen (Tabelle 6). Diese starken Abweichungen vom erwarteten Verlauf lassen sich durch den geringen Extinktionsanstieg bei der kurzen Sedimentationszeit erklären. Dadurch fallen die in Ansatz III beschriebenen Fehler sehr hoch aus was die Ergebnisse stark beeinflusst. Diese Fehler verschieben die Ergebnisse in höhere Bereiche was die Verwertung dieser Werte fragwürdig macht. Für die weitere Verarbeitung der Daten im Projekt, wurden jeweils Mittelwerte aus den verschiedenen Ansätzen gebildet.

Ansatz	Sedimentationsdauer				
	20 min	1 h	4 h	8 h	24 h
krit. τ nach [AMO04] [N/m^2]	0,054	0,043	0,054	0,033	0,067
krit. τ nach [AMO94] [N/m^2]	0,148	0,112	0,112	0,148	0,148
krit. τ nach logistischer Fkt [N/m^2]	0,211	0,129	0,148	0,168	0,168
Mittel	0,179	0,0946	0,1046	0,1163	0,1276

Tabelle 6: Ermittelte kritische Schubspannungen nach verschiedenen Sedimentationszeiten

4. Praxisergebnisse

4.1 Umrüstung der Pumpstationen

Während des Projektzeitraumes wurden drei verschiedene Pumpstationen betrachtet:

- Hauptpumpwerk Prerow auf der Halbinsel Fischland Darß/Zingst
- Abwasserpumpwerk in Rostock/Schmarl
- Abwasserpumpwerk in Regensburg

Prerow:

Das Pumpwerk in Prerow wurde bereits während der Projektphasen des Projektes „Untersuchung der Möglichkeiten eines energieeffizienten Betriebsmanagements von Abwasserförder-systemen“, welches von der Deutschen Bundesstiftung Umwelt gefördert wurde. Da hier aufgrund der besonderen Abwassereigenschaften (geschnittenes Abwasser) keine erhöhte Bildung

von Ablagerungen festgestellt werden konnte, wurden zwei weitere Pumpstationen zum Test der entwickelten energieeffizienten Steuerung untersucht.

Rostock/Schmarl:

Der Zulauf des APW Schmarl ist weitestgehend durch die Wohngebiete in Schmarl, Groß Klein, Warnemünde und Lichtenhagen geprägt. Angeschlossene Einwohner, Stand 31.12.2015 [BEN15]:

Schmarl: 8.616 EW

Groß Klein: 12.932

Warnemünde: 5.798

Lichtenhagen: 14.091 (nur teilweise)

Die angeschlossene Kanalnetzlänge summiert sich auf 80,1 km. Im System befinden sich ebenfalls Industrien/Gewerbe die verschiedene Einflüsse auf die Abwasserbeschaffenheit und deren Anfall haben. Insbesondere sei, bezüglich der anfallenden Mengen, der saisonale Einfluss von Hotels/Pensionen im Gebiet Warnemünde zu erwähnen. Zu den Gewerben und Industrien zählen unter anderen Hotel Neptun, Nordic Yards, Caterpillar, Stadtwerke HRO-Heizkraftwerk Marienehe, Technologiezentrum Warnemünde, maritimes Gewerbegebiet Groß Klein sowie die Grauwasserannahme des Kreuzfahrtterminals Warnemünde [Ben15].

Zur kontinuierlichen Überwachung der Ablagerungs- und Remobilisierungsvorgänge wurden 2 Feststoffsonden in der Druckleitung vom APW-Schmarl zur ZKA-Rostock installiert. Das Messprinzip der in Abbildung 15 und Abbildung 16 dargestellten Feststoff-Prozess-Sonden „SOLITAX inline sc“ (Hach Lange) basiert auf der Erfassung des von Partikeln reflektierten Streulichtes durch 2 Detektoren. Die parallel erfassten Daten der Detektoren werden statistisch ausgewertet und in einem Kontrollmodul ausgegeben. Die im jeweiligen Modul ankommenden Daten werden im Steuerungsrechner im APW-Schmarl gespeichert. Die Sonden konnten im Mai 2015 in Betrieb genommen werden. Sie wurden im Laufe des Projektes kontinuierlich kalibriert um konstant, qualitativ gute Messwerte zu erhalten.



Abbildung 15: Feststoffsonde ZKA-Rostock, Abwasser von links kommend vom APW-Schmarl



Abbildung 16: Feststoffsonde APW-Schmarl, Abwasser nach links fließend zur ZKA-Rostock

Regensburg:

Die Pumpstation in Regensburg befindet sich in einem Mischsystem. Das Abwasser erreicht den Pumpensumpf ohne mechanische Vorbehandlung, sodass hier die Auswirkungen der Steuerung unter neuen Bedingungen untersucht werden können. Das Abwasser wird hier über eine 3656 m lange Druckleitung mit einer Nennweite DN300 zum Übergabeschacht der Stadt Regensburg geführt. Für diese Pumpstation waren geringe Umrüstungsmaßnahmen notwendig, da dort bereits Frequenzumrichter installiert sind. Diese werden eingesetzt, um die Drehzahl bei Trockenwetter auf 37 Hz zu senken. Bei Niederschlagseinfluss wird die Drehzahl bis auf Nennfrequenz erhöht.

TS-Sonden wurden im Gegensatz zur Station in Rostock nicht installiert. Die Analyse der Auswirkungen der geänderten Betriebsweise auf den Zustand der Druckleitung soll hier auf Basis der bereits vorhandenen Durchflussmessungen erfolgen. Diese werden zur Bestimmung der Anlagenkennlinie und zur Berechnung einer Höhe von Ablagerungen in der Rohrleitung verwendet.

4.2 Ziele und Ergebnisse

Die von den Sonden erfassten Feststoffgehalte im APW-Schmarl und der ZKA Rostock können in Feststoffmengen umgerechnet werden. In Abbildung 17 ist für den 1. August der Durchfluss innerhalb der betrachteten Strecke mit den In- und Output-Feststoffmengen dargestellt. Während des größten Zuflusses zum Pumpwerk wird mehr Feststoffmaterial eingetragen als ausgelesen. Die erhöhten Mengen erreichen die Sonde in der ZKA Rostock, aufgrund der geringen Fließgeschwindigkeit, erst circa 4 bis 4,5 Stunden später (Scheitelpunkt der Output-Ganglinie). Der Scheitelpunkt ist auch in Abbildung 18, in der Differenzganglinie sichtbar.

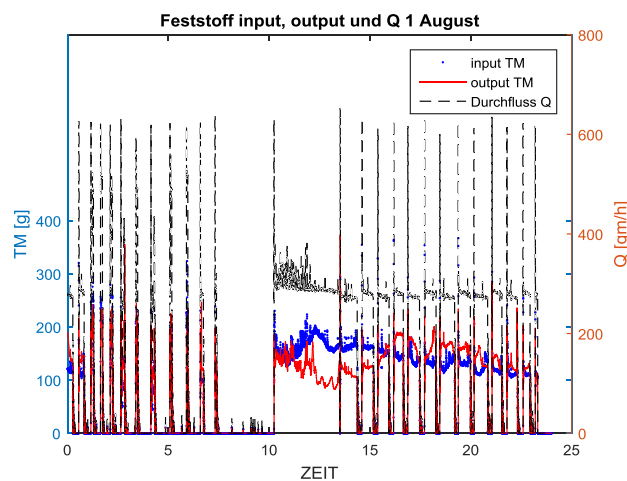


Abbildung 17: Beispiel Tagesverlauf Sonden, Q am 1. August

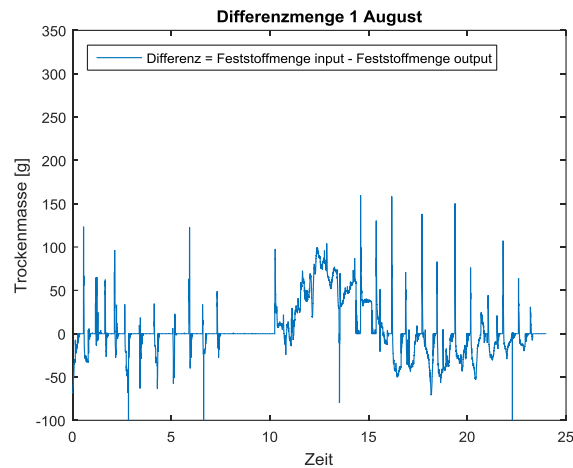


Abbildung 18: Beispiel Tagesverlauf Differenzmenge am 1. August

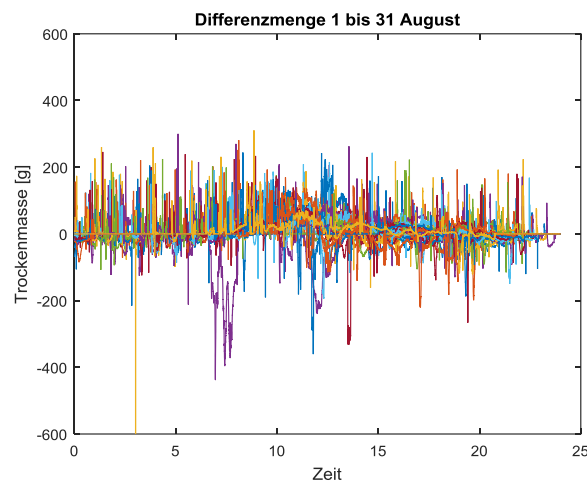


Abbildung 19: Tagesverlauf Differenzmengen 1.-31. August

Unabhängig von der im System befindlichen Gesamtmasse stellt die Differenzganglinie dar, ob sich Material im System zusätzlich anreichert oder ausspült. In Abbildung 19 ist der Tagesverlauf aller 31 Differenzganglinien im August 2015 dargestellt. Erkennbar ist, dass scheinbar stets mehr Material eingetragen als ausgetragen wird. Die Sonde in der ZKA Rostock also stets weniger Feststoffe aufzeichnet. Angesichts der circa 4,5 km lange Förderstrecke mit eher geringen Fließgeschwindigkeiten ($< 1 \text{ ms}^{-1}$) ist anzunehmen, dass die fehlenden Mengen sich als Geschiebefracht fortbewegen und von der Sonde nicht exakt erfasst werden. Die im APW-Schmarl befindliche Sonde detektiert mehr Partikel, da diese im Fördermedium durch den geringen Pumpenabstand noch homogener verteilt sind. Auf dem Weg zur Sonde der ZKA-Rostock treten während des Transportes Sedimentationsvorgänge auf, die eine inhomogene Partikelverteilung hervorrufen. Damit wird jedoch klar, dass permanent ein gewisser Bodensatz im Rohr existiert, dessen Masse konstant bleibt, sich demnach in ständigem Austausch befindet.

Auffällig ist auch das Regenereignis am 11.08.2015 (in Abbildung 19 als violette Ganglinie, siehe auch Abbildung 8). Durch den plötzlichen Anstieg des Durchflusses wird das Geschiebmaterial vom Boden gelöst und von der Sonde erfasst. Es stellt sich ein vergrößerter Austrag an Feststoffen ein, der bei Trockenwetter nicht verzeichnet wird.

5. Sedimenttransport in Druckwasserleitungen

5.1 Vorüberlegungen

Wir betrachten eine Rohrleitung von $l=4500$ m Länge und $d=0.6$ m Durchmesser, durch welche zu unregelmäßig verteilten Zeiten mechanisch vorbehandeltes Abwasser (Rechen) mit Geschwindigkeiten von 0,2 bis 0.6 m/s gepumpt wird. Dies entspricht einem Durchfluss von etwa 200 m³/h bei minimalem Pumpenbetrieb, oder ca. 4.800 m³/d bei Dauerbetrieb der Pumpe. Diese Tagesfördermenge überstiege das tatsächliche Aufkommen um ein Vielfaches, da Abwassersysteme für Spitzenbelastungen ausgelegt werden und nicht für die mittlere Zulaufgeschwindigkeit.

Das Fassungsvermögen eines typischen Pumpensumpfes ist im Allgemeinen so klein, dass ein kontinuierlicher Pumpenbetrieb ganztägig nicht möglich ist. Während tagsüber Pumpenlaufzeiten von mehreren Stunden bei kleiner Drehzahl möglich sind, kann die Pumpe insbesondere in den Morgenstunden aufgrund des geringen Abwasseraufkommens nur für wenige Minuten am Stück betrieben werden. Demgegenüber entstehen hier Stillstandszeiten, die um eine Größenordnung höher liegen und rechtsseitig schief verteilt sind.

Angesichts der sehr geringen dynamischen Viskosität und großen Dichte von Wasser beträgt die kinematische Viskosität ν nur $\approx 10^{-6}$ m²/s. Im betrachteten Bereich von Fließgeschwindigkeiten und Rohrdurchmessern ergeben sich gewaltige Reynoldszahlen, die auf eine starke Dominanz dynamischer gegenüber viskoser Kräfte hindeuten. Bei einer Rohrleitung wie oben beschrieben ergibt sich bereits bei einer Fließgeschwindigkeit von 0,3 m/s eine Reynoldszahl von 135.000. Somit kann der Fluss als turbulent erachtet werden, Laminarität wäre erst unterhalb einer Reynoldszahl von 2.320 bzw. einer Fließgeschwindigkeit von etwa 0,005 m/s zu erwarten. Der Beitrag von etwa 0,5 kg/m³ Sediment mag die Viskosität geringfügig erhöhen, ändert aber nichts an der Tatsache, dass die Reynoldszahl weit über dem Übergangsbereich von laminarer zu turbulenter Rohrströmung liegt, [Bol13].

Die völlige Entleerung des Pumpensumpfes bedeutet bei der angenommenen Rohrgeometrie – welche etwa den Gegebenheiten in Rostock Schmarl entspricht – einem Vorschub der Wassersäule um 136 m. Dies entspricht etwa 33 Zyklen, bevor ein Wasserteilchen den gesamten Lauf der Leitung passiert hat, bzw. bis die Menge von etwa 1.300 Kubikmetern Wasser völlig ausgetauscht ist.

In Stillstandphasen ist eine Dominanz von Sedimentationsvorgängen zu erwarten. Aus entsprechenden Laborexperimenten wurden Ausfallraten in stehenden Wassersäulen anhand von Originalabwasserproben ermittelt. Dieser Prozess kann mittels der Lösung einer gewöhnlichen Differentialgleichung gut modelliert und berechnet werden.

Genauer betrachtet sind die Beobachtungen (siehe Kapitel 4) eine Superposition von Senken eines ganzen Spektrums von Sedimentbestandteilen. Schwere grobkörnige Partikel setzen sich schnell ab, feinere und leichtere Fraktionen sinken gemächlich. Bei Gleichverteilung in einem Probezylinder ergeben sich entsprechende partikelabhängige mittlere Ausfallzeiten bei linearem Verlauf vom Anfangszeitpunkt bis zur vollständigen Sedimentierung. Die beobachteten Zuwächse spiegeln daher die Verteilung der Anteile der Partikel unterschiedlicher Sinkgeschwindigkeiten wieder.

Theoretisch kann die Sinkgeschwindigkeit für sphärische Körper mit der Stokesschen Gleichung bestimmt werden. Dabei wird unterstellt, dass die Gewichtskraft des Körpers der Summe von Auftriebs- und Reibungskraft entspricht. Die Sinkgeschwindigkeit lautet dann

$$v_s = \frac{gd_p^2(\rho_P - \rho_F)}{18\eta},$$

wobei d_p den Durchmesser des Partikels, g die Erdbeschleunigung, ρ_P die Dichte des Partikels, ρ_F die Dichte des Fluids und η die dynamische Viskosität des Fluids beschreibt.

Jedes Partikel hat eine von seiner Größe und Masse gegebene Sinkgeschwindigkeit v_s . Zu v_s gehört eine maximale Sinkdauer – wenn ein Partikel zu Beginn ganz oben war. Die Ankunfts- menge pro Zeit ist von Beginn bis zur Maximalzeit $t(v_s)=d/v_s$ konstant, dann Null.

In Abbildung 20 ist die Sinkgeschwindigkeit v_s in Abhängigkeit von der Korngröße zu sehen. Hier wurde eine Partikeldichte von 1.500 kg/m^3 unterstellt und eine Viskosität des Fluids von $0,001 \text{ kg/ms}$.

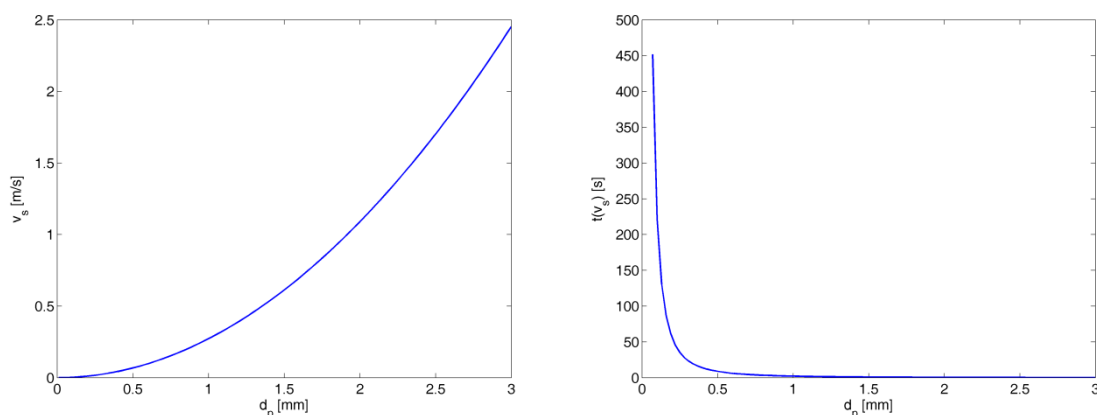


Abbildung 20: Sinkgeschwindigkeit und maximale Sinkdauer in Abhängigkeit von der Partikelgröße

Während der Pumpphasen wird wegen der Turbulenzen einerseits die Sedimentation massiv gestört, andererseits das schon abgesetzte Sediment nach und nach vom Grund wieder heraufgewirbelt und für den Weitertransport aktiviert. Dieser Vorgang ist weit komplizierter – es werden daher phänomenologische Annahmen getroffen, mittels derer die reaktivierte Menge im Zeitverlauf abgeschätzt werden soll.

Typisch für turbulente Strömungen sind Verwirbelungen, so dass lokal Teilchen auch transversal zur Fließrichtung bewegt werden. Trajektorien von Sedimentteilchen können also spiralartig verlaufen und Höhenverluste durch Absinken wiederholt ausgleichen und so länger in der Schwebelage bleiben und somit erst weiter stromabwärts ausfallen. Es ist vernünftig anzunehmen, dass schnell fallende Teilchen hiervon weniger stark betroffen sind, während feineres Material erheblich stärker von der Turbulenz am endgültigen Ausfallen gehindert wird.

Wir nehmen an, dass die Schichtung aus dem Laborversuch im Fall einer positiven Fließgeschwindigkeit keinen Bestand hat, während bei homogenen Partikeln über einer Sprungschicht in von der Zeit abhängiger Höhe kein einziges Partikel mehr vorhanden ist – alle sind unter diese Front abgesunken, unter der Front ist die Anfangsdichte erhalten. Im turbulenten Fall bleibt die Durchmischung, bzw. wird ständig reproduziert, nur die Konzentration sinkt. Damit wird die Ausfallrate eine Funktion der homogenen Konzentration, im einfachsten Fall eines Proportionalitätsgesetzes folgt exponentieller Abfall.

Bei Sedimentationsversuchen im Labor wurde die Masse sedimentierter Partikel für verschiedene Abwasserproben über einen Zeitraum von 24 Stunden zu acht verschiedenen Zeitpunkten gemessen. In Abbildung 21 (links) ist die kumulierte sedimentierte Trockenmasse zu sehen. Dabei zeigt sich, dass die in der Abwasserprobe enthaltene Trockenmasse erst nach 24 Stunden vollständig sedimentiert ist. Zudem halbiert sich die Trockenmasse in der Abwasserprobe jeweils nach ca. 35 Minuten.

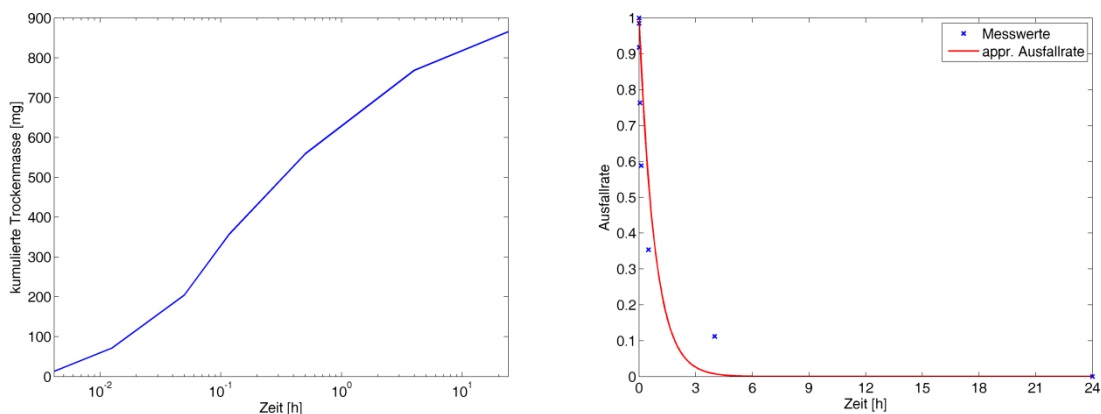


Abbildung 21: Kumulierte Trockenmasse und Ausfallrate

Es wird häufig angenommen, dass die Reaktivierung von Sedimentpartikeln, die schon im Bodensatz zum Liegen gekommen sind, von der Schubspannung abhängt, mit welcher die strömende Flüssigkeit auf die Rohrwand – und im von Sediment bedeckten Teil auf ebendieses – einwirkt. Ferner wird angenommen, dass erst ab einer gewissen minimalen oder kritischen

Schubspannung eine Aktivierung erfolgen kann. Dieser Schwellwert dürfte ebenfalls von der Kornklasse abhängen: feinste Partikel sind leichter mitzureißen als große. Es wird später ausgeführt, dass – für jede Partikelklasse separat – ein Aktivierungsprozess angenommen wird, dessen Intensität von der Extraschubspannung (tatsächliche minus kritische Schwellspannung) und der vorhandenen Partikelmenge der gegebenen Klasse abhängt.

Der Tagesverlauf der Feststoffkonzentration für die Pumpstation in Rostock/Schmarl zeigt eine Abhängigkeit von der Zuflussmenge (siehe Abbildung 22). Wird die Tatsache berücksichtigt, dass die abgebildete Konzentration am Ende der Druckleitung gemessen wird und ein in die Leitung geführtes Teilchen bis zu 10 Stunden benötigt, um das Ende der Leitung zu erreichen, so ist ersichtlich, dass die Konzentration während eines Pumpzyklusses mit dem Abwasseraufkommen steigt. Dies ist auf die Tatsache zurückzuführen, dass aufgewirbelte Partikel von der Sonde besser erfasst werden als die Geschiebefracht. Bei wenig Zulauf werden die Pumpen weniger seltener betrieben, was weniger Durchfluss und damit höhere Sedimentation nach sich zieht.

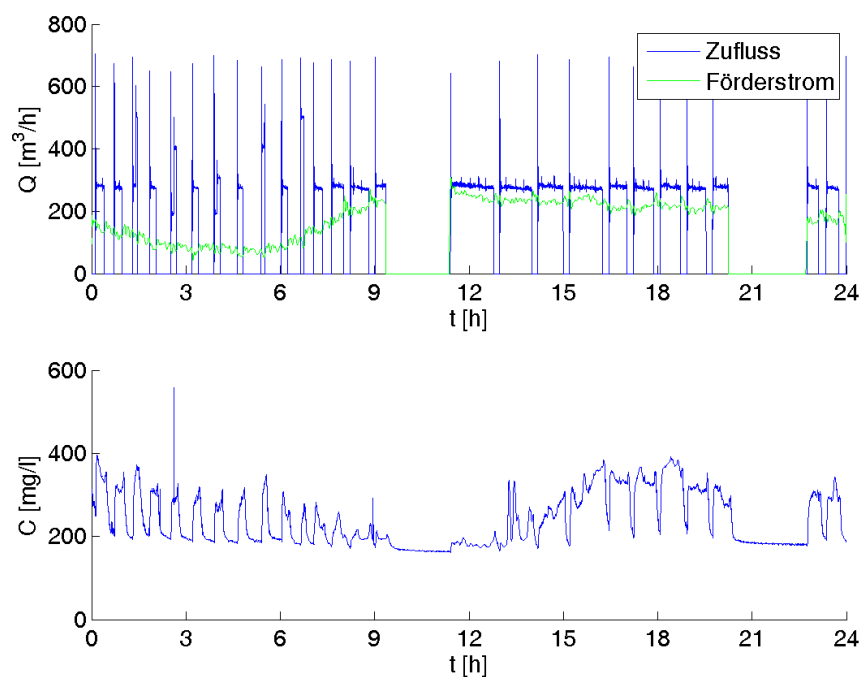


Abbildung 22: Förderströme und Feststoffkonzentration bei optimaler Steuerung der Pumpen in Rostock/Schmarl

Während eines Pumpzyklusses ist keine signifikante Abhängigkeit der Konzentration von der Fließgeschwindigkeit oder der Stillstandszeit festzustellen. Bei gleicher Zuflussmenge ist sowohl bei der Mindestfließgeschwindigkeit von 0,2 m/s als auch bei einer Geschwindigkeit von 0,6 m/s, die sich bei Nenndrehzahl einstellt, eine vergleichbare Konzentration zu erkennen.

Der funktionale Zusammenhang zwischen Zufluss und Konzentration während eines Pumpzyklusses wird durch Abbildung 23 verdeutlicht. Bei hohem Zulauf steigt die Konzentration im Durchschnitt auf bis zu 390 mg/l.

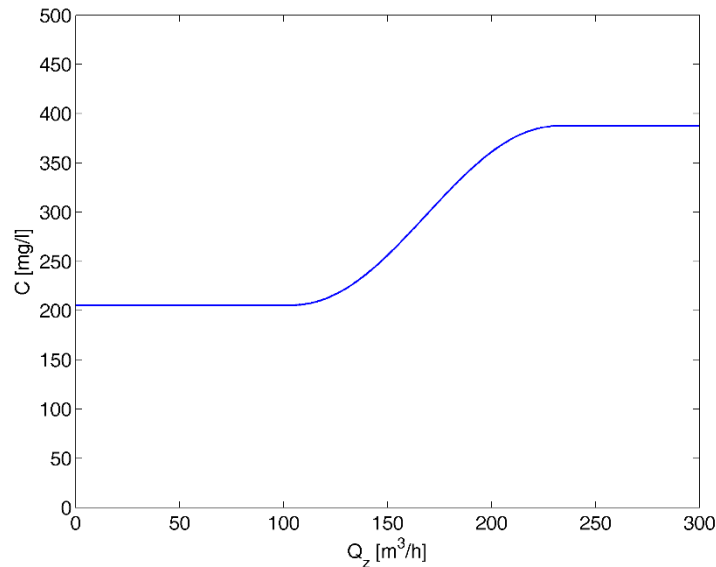


Abbildung 23: Feststoffkonzentration in Abhängigkeit vom Abwasserzulauf während eines Pumpzyklusses

Nach dem Abschalten der Pumpe sinkt die Konzentration exponentiell in Abhängigkeit von der Länge der Stillstandszeit auf bis zu 150 mg/l. Sinkt der Wert von einem Zeitpunkt t_0 von C_{max} auf C_{min} , so kann der Verlauf durch $C_S(t) = C_{min} + (C_{max} - C_{min})e^{-0,005(t-t_0)}$ dargestellt werden. Der Anstieg der Konzentration nach dem Anfahren der Pumpe zum Zeitpunkt t_0 kann durch $C_E(t) = C_{max} - (C_{max} - C_{min})e^{-0,025(t-t_0)}$ beschrieben werden. Vom Betreiber EU-RAWASSER Nord GmbH wurde vorgegeben, dass die Pumpen zunächst stets auf Nenndrehzahl hochgefahren werden muss, um eine Verstopfung des Pumpenlaufrades zu vermeiden. Erst nach 30 Sekunden darf die Drehzahl entsprechend des Abwasseraufkommens gesteuert werden.

Offensichtlich sind die Teilmodelle – Sedimentation und Reaktivierung – abhängig von Partikelklassen. Eine große Vereinfachung ergibt sich aus der Annahme, dass die Transportvorgänge für die einzelnen Klassen direkt überlagert werden können und sich gegenseitig nicht beeinflussen. Insbesondere wird unterstellt, dass etwa die feine Phase reaktiviert werden kann – ohne dass etwa vorher eine darüber liegende Schicht größeren Materials abgetragen werden muss – was erst bei höherem Schub ermöglicht würde. Bei der Sedimentation werden keinerlei Kollisionen zwischen Teilchen verschiedener Klassen betrachtet. Reaktiviertes Material gilt als über den Rohrquerschnitt sofort gleichmäßig verteilt – sedimentiert also wieder genau wie frisch eingepumptes Abwasser, obwohl – bei laminarem Denken die reaktivierten Teilchen eher in Bodennähe schwimmen sollten. Somit umfasst das Modell eine Teilchenmassendichte je Längeneinheit, jeweils für die flüssige Phase wie für die Satzphase, und das für jede Größenklasse.

5.2 Statistische Daten

In dem Projekt mit dem Titel „Untersuchung der Möglichkeiten eines energieeffizienten Betriebsmanagements von Abwasserfördersystemen“ wurde eine Steuerung für drehzahlregelbare Abwasserpumpen entwickelt, die durch eine Reduzierung der Drehzahl signifikante Energieeinsparungen ermöglicht, [Eck13] und [Tra14]. Gegenüber der derzeit vorwiegend verwendeten Zweipunktsteuerung ohne Frequenzumrichter sinken die Förderströme, was eine längere Pumpenlaufzeit zur Folge hat. Während ein Pumpzyklus bei der Zweipunktsteuerung stets weniger als eine Stunde dauerte, steigt die Laufzeit bei energetisch optimaler Betriebsweise auf bis zu neun Stunden. Durch die Reduzierung der Drehzahl und damit auch der Förderströme steigt damit die Laufzeit, was die Anzahl der Schaltvorgänge reduziert. Die Verteilungen der Pump- und Stillstandszeiten sind nachfolgend für die Zweipunktsteuerung (siehe Abbildung 24) auch für die energieoptimale Steuerung (siehe Abbildung 25) zu sehen.

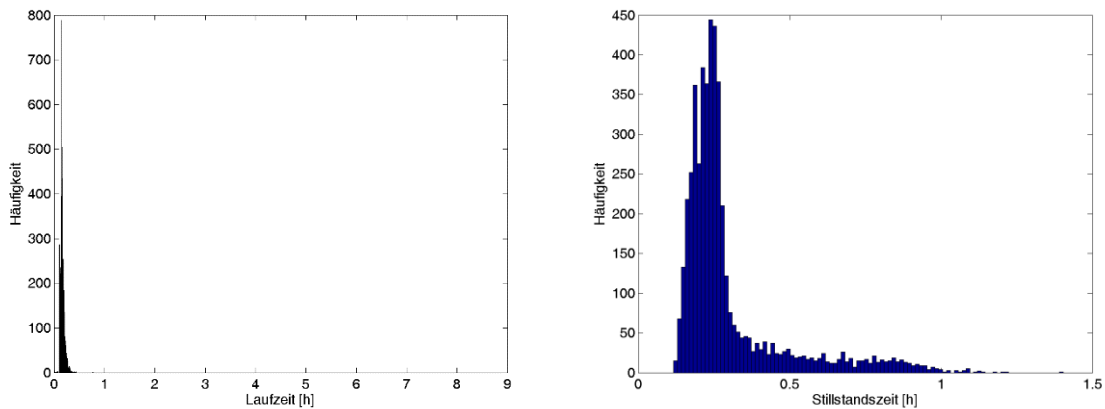


Abbildung 24: Histogramm über Lauf- und Stillstandszeiten bei Zweipunktsteuerung

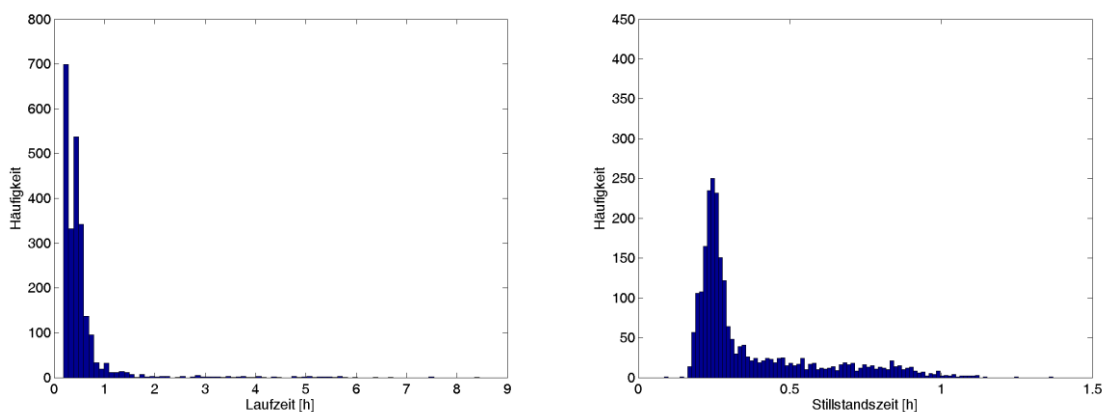


Abbildung 25: Histogramm über Lauf- und Stillstandszeiten bei energieoptimaler Steuerung

5.3 Die Teilmodelle

Sedimentation

Die Modellierung der Sedimentation basiert auf der Annahme, dass die Feststoffkonzentration exponentiell sinkt, wenn der Durchfluss in der Rohrleitung zum Stillstand kommt. Eine detaillierte Analyse des Sedimentationsverhaltens ist in Kapitel 3.1 zu finden. Die Konzentration C_S genügt damit einer gewöhnlichen Differentialgleichung der Form: $C_S'(t) = \alpha C_S(t)$. Je höher die Konzentration ist, desto mehr kann absinken. Zur Vereinfachung wird angenommen, dass das Rohr rechteckig ist und sich die Feststoffe gleichmäßig am Boden absetzen.

Zu jeder Sinkgeschwindigkeit v_s gehört ein Anteil $a(v_s)$, das Integral $A := \int_0^\infty a(v_s) dv_s$ ist gleich der Gesamtmasse der Sedimente im Probezylinder – und sollte dem Grenzwert von $M(t)$ bei $t \rightarrow \infty$ entsprechen.

Nach Analyse der Laborversuche kann die Feststoffkonzentration im Wasser während des Sedimentationsprozesses durch folgende Exponentialfunktion beschrieben werden: $C_S(t) = c_0 e^{-0.0003t}$. Die Anfangskonzentration c_0 halbiert sich damit nach jeweils 35 Minuten.

Erosion

Die Reaktivierung von Sediment wird von folgenden Faktoren bestimmt. Einerseits muss die Fließgeschwindigkeit berücksichtigt werden. Je schneller die Strömung in der Druckleitung ist, desto mehr kinetische Energie liegt vor. Damit herrschen auch größere Schubspannungen, mehr Turbulenz und Druckfluktuationen, sodass Partikel eher gelöst werden können.

Im Labor wurden für Abwasser der Pumpstation in Rostock/Schmarl Erosionsversuche nach verschiedenen Sedimentationszeiten durchgeführt. Dabei zeigte sich, dass die kritische Schubspannung unabhängig von der Sedimentationszeit ist. Hier wurde die Drehzahl nach jeweils 60 Sekunden um 10 Umdrehungen zur Lösung der Ablagerungen erhöht. Die Erosion setzte dabei bei einer Schubspannung von 0,12 N/m² ein. Nach Erreichen einer Schubspannung von 0,54 N/m² waren sämtliche Ablagerungen gelöst.

Mit wachsender Schubspannung steigt auch die Konzentration der Feststoffe im Abwasser. Die in Abhängigkeit von der gewählten Drehzahl bzw. Schubspannung erreichbare Konzentration kann durch folgende Funktion dargestellt werden: $c_E(\tau) = \max(c_{min}, c_{max} - (c_{max} - c_{min})e^{-5.855(\tau - \tau_{krit})})$.

Dabei beschreibt c_{min} die kleinste erreichbare Konzentration und c_{max} die maximale erreichbare Konzentration (bei größtmöglicher Schubspannung).

In Abbildung 26 wird die Wandschubspannung in Abhängigkeit von der Fließgeschwindigkeit dargestellt. Dabei wurde die Druckrohrleitung zwischen der Pumpstation in Rostock/Schmarl und der Kläranlage in Rostock unterstellt. Bis zu einer Fließgeschwindigkeit von 0,17 m/s bzw.

etwa 70% der Nenndrehzahl wird eine Wandschubspannung von 1 N/m^2 unterschritten. Dies ist der kritische Wert zur Vermeidung von Ablagerungen in Freispiegelleitungen, [ATV01].

Darüber hinaus ist die Ablagerungsmenge entscheidend. Je mehr Ablagerungen bereits vorhanden sind, desto länger muss die kritische Fließgeschwindigkeit andauern, um die Ablagerungen zu lösen.

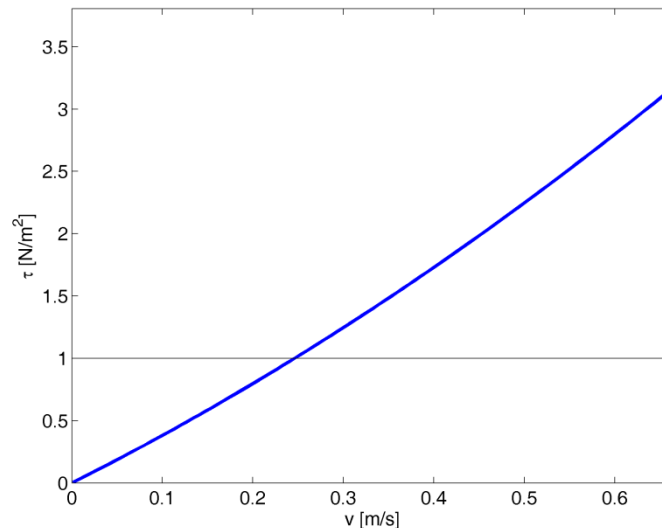


Abbildung 26: Wandschubspannung in Abhängigkeit von der Fließgeschwindigkeit in der Druckrohrleitung Rostock/Schmarl

5.4 Gesamtbilanz als Partielle Differentialgleichung

Nach diesen Vorüberlegungen können wir nun die Differentialgleichung für die Gesamtbilanzen von gelösten wie abgelagerten Feststoffen aufstellen. Die entsprechenden Dichten bezeichnen wir mit u bzw. w .

Die Bilanzgleichungen für gelöste und abgesetzte Phase lauten:

$$\begin{aligned} u_t + v u_x &= a(w, v)/A - s(u) \\ w_t &= A s(u) - a(w, v) \end{aligned}$$

Im Anwendungsfall beträgt die Rohrlänge $l = 4500 \text{ [m]}$, die Geschwindigkeit $v \cong 0.5 \left[\frac{\text{m}}{\text{s}} \right]$.

Bei einer Einteilung in Segmente (Zellen) von $\Delta l = 5 \text{ [m]}$ benötigt ein Partikel also etwa

$$\Delta t = \frac{\Delta l}{v} = 10 \text{ [s]} \text{ um eine Gitterzelle zu passieren.}$$

Nach Courant, Friedrich und Levy stellt dies für die Zeitschrittweite bei expliziten Verfahren die Stabilitätsgrenze dar.

Für eine Rechnung über einen Tag werden also minimal $m = \frac{24 \cdot 3600}{\Delta t} = 8640$ Zeitschritte benötigt, von denen jeder die Aktualisierung der Zustandsgrößen in $n = \frac{L}{\Delta l} = 900$ Zellen erfordert.

Bei Verdoppelung der Zellenlänge verringert sich die Anzahl der Zellen wie die der nötigen Zeitschritte auf die Hälfte, während die Stabilitätsgrenze sich verdoppelt.

Die Abnahme der Konzentration u in der Flüssigkeit, die in $\left[\frac{kg}{m^3}\right]$ angegeben sei, durch Sedimentation erfolgt etwa mit einer Rate von $c = \frac{1}{3000} \left[\frac{1}{s}\right]$, der Term $s(u)$ in den Bilanzen beträgt also in erster Näherung $s(u) = \frac{u}{3000} \left[\frac{kg}{m^3 s}\right]$.

Um den gleichen Beitrag erhöht sich die Menge der Ablagerung w , die jedoch in $\left[\frac{kg}{m}\right]$ entlang der Rohrlänge gemessen wird, und daher mit dem Flüssigkeitsvolumen pro Meter zu multiplizieren ist. Bei einem Durchmesser von $d = 0,6$ [m] beträgt der Faktor $A = 0,2826$ [m²].

Für die Reaktivierung a in $\left[\frac{kg}{ms}\right]$, das heißt die Masse pro Rohrlängeneinheit, die je Zeiteinheit aus der Ablagerung in die Schwebephase zurückgewonnen wird, geht man von einem Gesetz der Form

$$a(w, v) = b(\tau(v) - \tau_{krit}(w))$$

aus. Hierbei ist $\tau(v)$ die tatsächliche Sohlenschubspannung, die von der mit Geschwindigkeit v fließenden Strömung auf die Rohrwand – und ebenso auf die Ablagerungen – ausgeübt wird. Dabei wird eine Schwelle $\tau_{krit}(w)$ angenommen, unterhalb derer die Adhäsionskräfte nicht überwunden werden können. Ab diesem Wert erfolgt proportionales Wachstum mit einer Rate b . Diese Rate wurde unter Verwendung der Laborergebnisse bestimmt. Hierbei ergab sich ein Wert von $b = 0,0362$.

5.5 Numerische Ergebnisse

Am Anfang wird ein auf der gesamten Länge sedimentfreies Rohr unterstellt. In diesem befindet sich Wasser mit einer konstanten Konzentration u_0 .

Als Gesamtmodell wird eine an realistischen Tagesabläufen orientierte Sequenz von Standphasen mit Sedimentierung und Pumpphasen mit Reaktivierung simuliert und dabei der Sedimenthaushalt entlang des Leitungstraktes bilanziert. In den Pausen fällt jeweils an jeder Stelle eine von der Standzeit abhängige Sedimentmenge aus und vergrößert die Schichtbreite und –tiefe, die Konzentration im Wasser sinkt. In den Pumpphasen wird an jeder Stelle aufgewirbelt, so die Schichtbreite – und höhe wieder reduziert, die Konzentration im Wasser erhöht. Hierbei wird die Wassermasse mit der von der Pumpe vorgegebenen Geschwindigkeit v weitergeschoben. Dazu werden die an der Pumpstation Schmarl gemessenen Werte bzgl. Durchfluss und

Feststoffkonzentration als Eingangsgrößen verwendet. Das System der Konvektions-Produktions-Gleichungen aus Abschnitt 5.4 wird mittels eines expliziten Differenzenverfahrens numerisch gelöst.

Exemplarisch wird zunächst die Simulation für den 02.02.2016 mit den experimentell bestimmten Parametern $c = 0,00033$, $b = 0,0362$ und $\tau_{krit} = 0,12 \text{ N/m}^2$ durchgeführt. In Abbildung 27 werden die gemessenen und simulierten Feststoffkonzentrationen am Ausgang der Druckleitung an der Kläranlage in Rostock verglichen (rote und grüne Kurve). Das Rohr war zu Simulationsbeginn ablagerungsfrei und mit klarem Wasser gefüllt. Da es mehrere Stunden dauert bis das in die Rohrleitung gegebene Abwasser die Kläranlage erreicht, werden die simulierten Messwerte erst nach 12 Uhr abgebildet. Die Konzentration in der Druckleitung fällt zudem nie unter 150 mg/l . Daher wurde dies auch für die Simulation auch als minimale Konzentration definiert.

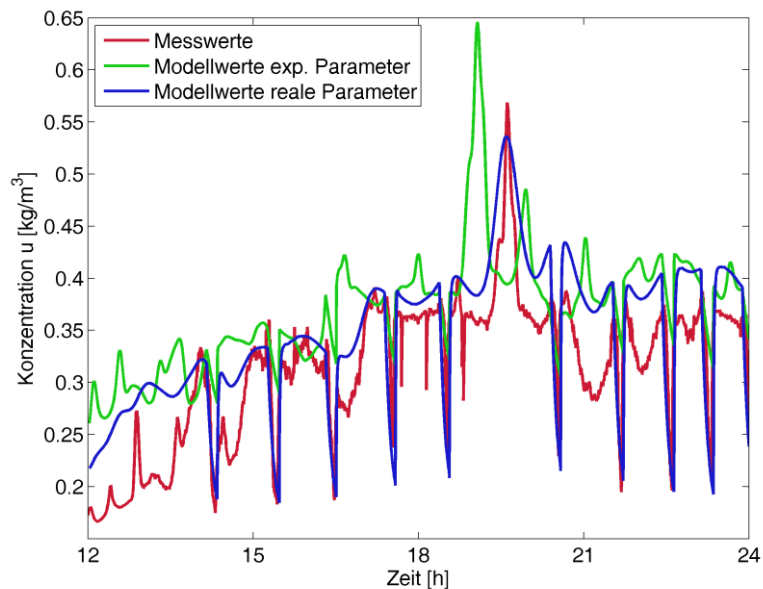


Abbildung 27: Vergleich von simulierten und gemessenen Feststoffkonzentrationen an Rohrausgang

Darüber hinaus ist zu erkennen, dass die reale Sedimentationsrate größer und die Erosionsrate kleiner ist als angenommen. Feststoffe fallen schneller auf den Rohrboden und werden auch schlechter gelöst. Die Parameter $c = 0,0015$ und $b = 0,008$ beschreiben die Vorgänge in der Druckleitung besser. Der Konzentrationsverlauf für diese Parameter, wobei die kritische Schubspannung bei $\tau_{krit} = 0,12 \text{ N/m}^2$ belassen wurde, ist ebenfalls in Abbildung 27 (blaue Kurve) zu sehen. Der Verlauf der Konzentration u und der Masse w nach einer kurzen Sedimentationsphase entlang der Rohrleitung ist exemplarisch in Abbildung 28 zu sehen. Während die Konzentration bis auf ca. $0,2 \text{ kg/m}^3$ abgesunken ist, stieg die Ablagerungsmenge auf bis zu $0,11 \text{ kg/m}$. Im Schnitt beträgt die mittlere Ablagerungsmenge entlang der Rohrleitung $0,065 \text{ kg/m}$.

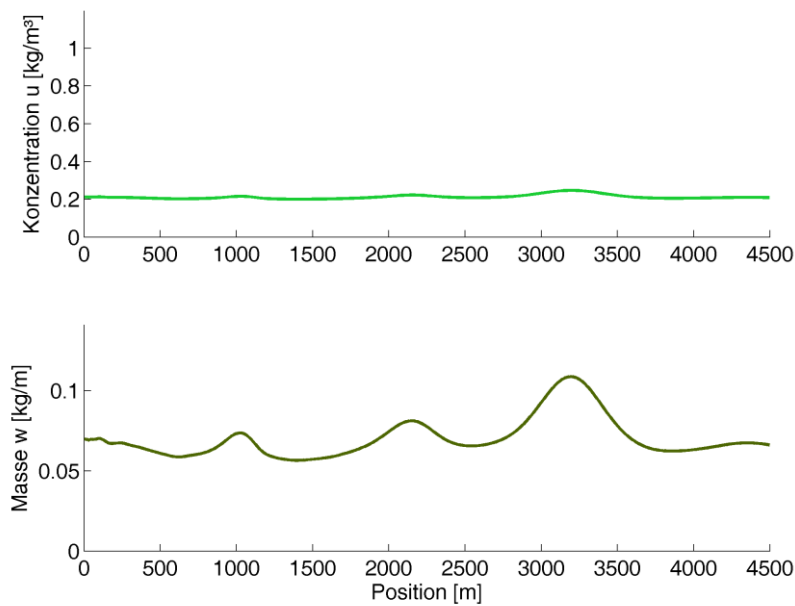


Abbildung 28: Verlauf von Konzentration und Masse entlang der Druckleitung

Unter Verwendung dieser Parameter ist keine dauerhafte Bildung von Ablagerungen zu erwarten, solange die Fließgeschwindigkeit bei Pumpenbetrieb stets größer als 0,034 m/s ist. Erst bei geringeren Geschwindigkeiten wird auch die kritische Schubspannung unterschritten, sodass Ablagerungen nicht mehr gelöst werden können. Eine solch geringe Fließgeschwindigkeit wird aber in der Druckleitung nur kurzzeitig beim Starten und Stoppen der Pumpen erreicht. Dauerhaft kann diese Fließgeschwindigkeit nicht realisiert werden, dass die Rückschlagklappen schließen bzw. nicht öffnen. Für die Pumpstation in Rostock/Schmarl beträgt der kleinste Förderstrom 190 m³/h. Dies ist mit einer Fließgeschwindigkeit von ca. 0,2 m/s verbunden. Selbst für den Fall, dass über die gesamte Länge der Druckleitung eine Ablagerungsmenge von 5 kg/m verteilt wäre, würden diese Ablagerungen bei normaler Pumpenschaltung und einer Fließgeschwindigkeit von 0,2 m/s bei Pumpenbetrieb nach weniger als 10 Stunden aus der Druckleitung geschoben. Dies ist gerade die Zeitspanne, um den kompletten Leitungsinhalt auszutauschen.

Die Berechnung der transportierten Partikelmassen, über den hier beispielhaft ausgewählten Zeitraum (01.02.2016), zeigt ebenfalls eine gute Anpassung an der Modellwerte. In Abbildung 29 sind die kumulierten Massen unter Verwendung der Ausgangsparameter $c = 0,0015$ und $b = 0,008$ dargestellt. Im betrachteten Zeitraum liegen die modellierten Werte stets deutlich unterhalb einer Abweichung von 10 %.

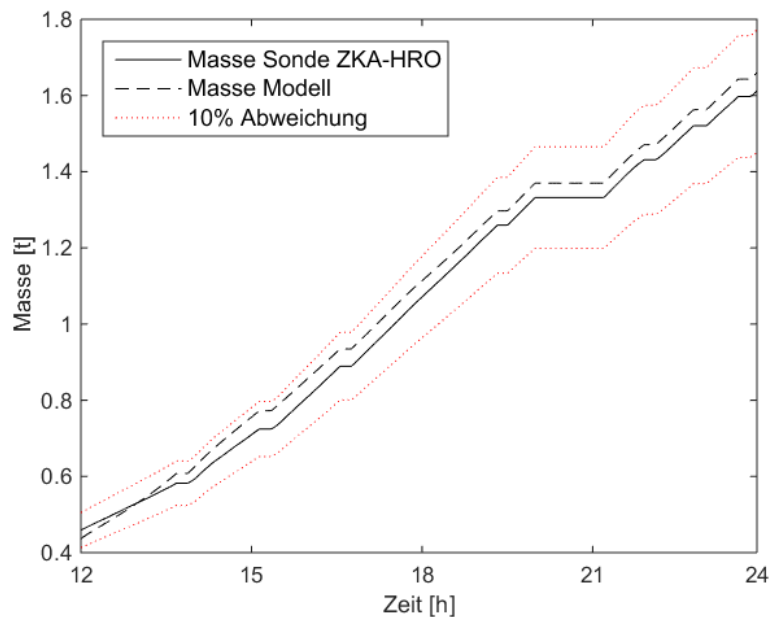


Abbildung 29: Transportierte kumulative Masse für den 01.02.2016, Sondenwerte & Modellwerte

Im Folgenden soll untersucht werden, ob die Ablagerungsmasse in der Druckleitung bei einer drastischen Variation der Parameter c , b und τ_{krit} langfristig zunimmt oder auf einem konstanten Niveau verharrt. Um die Bildung von Ablagerung zu forcieren, kann der Parameter b reduziert werden. Werden die übrigen Parameter nicht verändert und b auf ein Viertel reduziert, d.h. $b = 0,002$, so steigt die mittlere Ablagerungsmenge von $0,065 \text{ kg/m}^3$ auf $0,102 \text{ kg/m}^3$ und verbleibt dann nach jedem Sedimentationsprozess etwa auf diesem Niveau. Wird der Parameter c erhöht, so sinken Feststoffe schneller zu Boden, was die Bildung von Ablagerungen begünstigt. Wird nun c zusätzlich von $0,0012$ auf $0,0075$ erhöht, steigt die mittlere Ablagerungsmenge auf $0,274 \text{ kg/m}^3$. Aber auch hier stellt sich nach etwa einem Tag ein Gleichgewicht ein. Ein Zusetzen der Druckleitung ist auch hier nicht zu erwarten. Schließlich wird nun noch die kritische Schubspannung auf $\tau_{krit} = 0,36 \text{ N/m}^2$ erhöht. Es sind also höhere Fließgeschwindigkeiten nötig, um Ablagerungen zu lösen. Aber auch hier erhöht sich zwar die Ablagerungsmenge weiter auf $0,333 \text{ kg/m}^3$. Es stellt sich aber auch hier ein Gleichgewicht ein.

Aus dem Modell ergibt sich die Möglichkeit, Untersuchungen an differenzierten Rohrsystemen durchzuführen. Dass eine Variation physikalischer Parameter keine Betriebsausfälle oder bleibende Ablagerungen generiert, wurde im betrachteten Rohr (DN600 vom APW Schmarl zur ZKA Rostock) modelltechnisch nachgewiesen. In Abbildung 30 sind die im Labor ermittelten Schubspannungen $0,12 \text{ N/m}^2$ (kritisch) und $0,54 \text{ N/m}^2$ zur vollständigen Erosion, inklusive der in [ATV01] beschriebenen Schubspannungsgrenze von 1 N/m^2 zusammen mit den anliegenden Schubspannungen differenzierter Rohrdurchmesser zu unterschiedlichen Geschwindigkeiten dargestellt. Es zeigt sich, dass bereits bei sehr geringen Fließgeschwindigkeiten auftreten, die eine längerfristige, schädigende Sedimentation ausschließen. Selbst der Grenzwert der Schubspannung aus [ATV01] = 1 N/m^2 wird auch bei großen Leitungsdurchmessern von DN1000 recht früh erreicht $< 0,4 \text{ m/s}$.

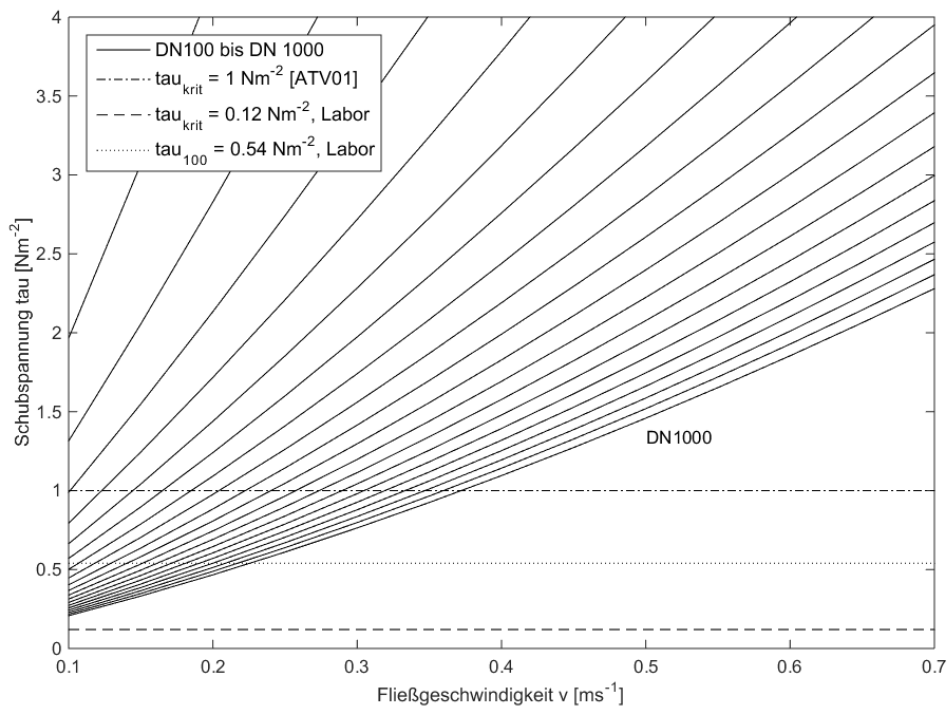


Abbildung 30 Schubspannungen differenzierter DN gegen die Fließgeschwindigkeit

5.6 Diskussion weiterer Effekte

Geometrische Besonderheiten, wie etwa Krümmungen und Knicke, Änderungen der Steigung – beziehungsweise zwischenzeitliches Gefälle, wie auch Schwankungen in der Oberflächenbeschaffenheit, wurden bislang außenvorgelassen. Sicherlich werden diese für die zeitliche Entwicklung räumlicher Variabilität in der Sedimentstärke ebenfalls Beiträge liefern. Im Rahmen der gegenwärtigen Studie konnte dies nicht berücksichtigt werden – mangels Daten und Möglichkeiten zur Parameterbestimmung.

5.7 Abschließende Bemerkungen

Experimente mit multipel markiertem Sand, etwas farblich kodiert, der in seiner Konsistenz dem natürlichen Sediment ansonsten perfekt nachempfunden sein sollte, und kamerabestückten Tauchdrohnen könnten wertvolle Einblicke in den Ablauf des Ablaufs liefern. Der Einfluss von Diffusion wie auch die Effektivgeschwindigkeit des Sedimenttransportes könnten mit derartigen innovativen Beobachtungsmethoden präzise kalibriert werden.

6. Optimale und betriebssichere Steuerung von Abwasserpumpstationen

6.1 Berechnung von Förderströmen

Der Abwassertransport von einer Pumpstation zu einer weiteren, zu einem Druckunterbrecher-schacht oder direkt zur Kläranlage erfolgt im Allgemeinen über eine Druckrohrleitung. Die Druckverluste in der Rohrleitung werden in Abhängigkeit vom Volumenstrom durch die Anlagenkennlinie dargestellt. Diese Reibungsverluste hängen darüber hinaus von der Rohrlängung, dem Rohrdurchmesser, der Rohrrauigkeit, Verlusten durch Armaturen und Formstücken sowie der Temperatur, Viskosität und Fließgeschwindigkeit des zu fördernden Mediums ab. Verändern sich die Reibungsverluste bei identischem Förderstrom und gleichbleibenden Pumpeneigenschaften über die Zeit, so ist dies ein Beleg für eine Änderung des Rohrzustandes. Da sich die Eigenschaften des Mediums und der Einbauten im Allgemeinen nicht signifikant verändern und die Rohrlänge nicht veränderbar ist, ist ein Anstieg der Reibungsverluste mit einer Verkleinerung des Rohrdurchmessers oder einer Zunahme der Rohrrauigkeit zu begründen. Die Rauigkeit verändert sich jedoch nur sehr langsam, sodass eine Änderung der Reibungsverluste über einen kurzen Zeitraum im Allgemeinen auf eine Änderung des Rohrdurchmessers und damit auf die Bildung bzw. Beseitigung von Ablagerungen oder Lufteinschlüssen zurückzuführen ist.

Zur Bestimmung der Rohrkenlinie und damit zur Überwachung der Anlage wird die Pumpe bei verschiedenen Drehzahlen bzw. Frequenzen betrieben und die Förderhöhe unter Verwendung der sich dabei einstellenden Förderströme und des Pumpenkennfeldes berechnet. Die Messpunkte werden schließlich durch ein quadratisches Polynom, die Anlagenkennlinie, approximiert (siehe Abschlussbericht zum Projekt AZ29356_2). Eine möglichst exakte Kenntnis der Förderströme ist dabei immens wichtig. Bei steilen Pumpenkennlinien haben kleine Abweichungen im Förderstrom große Auswirkungen auf die Förderhöhe und damit auf die berechnete Anlagenkennlinie.

Im Fall des Hauptpumpwerks Prerow liegen zwar Durchflussmessungen vor. In vielen anderen Pumpwerken ist dies jedoch nicht der Fall, sodass die Förderströme auf einem anderen Weg ermittelt werden müssen. Werden etwa Messwerte bezüglich der Leistungsaufnahme für verschiedenen Drehzahlen vom Pumpenhersteller bereitgestellt, so können diese interpoliert und daraus ein Leistungskennfeld $P(Q, n)$ bestimmt

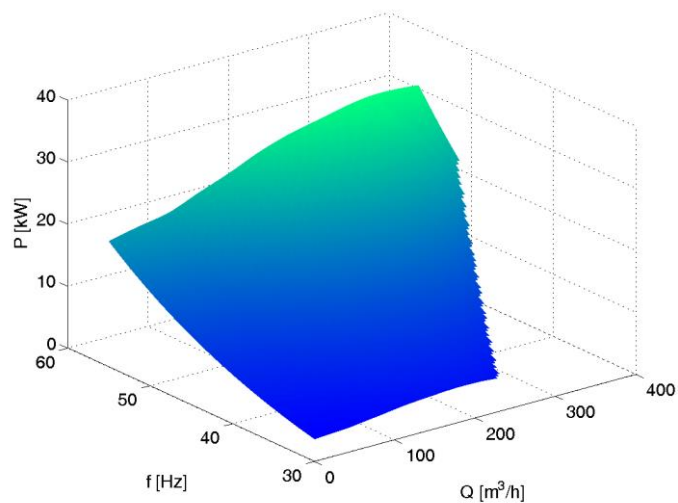


Abbildung 31: Leistungsaufnahmekennfeld der Pumpe in Prerow

werden (siehe Abbildung 31). Wird die Pumpe mit einem Frequenzumrichter betrieben, aus dem die aktuelle Leistungsaufnahme und die Drehzahl (oder Frequenz) ausgelesen werden können, kann daraus der Förderstrom bestimmt werden. Es kann jedoch nicht sichergestellt werden, dass der so ermittelte Förderstrom dem gemessenen Wert entspricht. In Prerow fiel der berechnete Wert um 7-8 % zu niedrig aus. Aus diesem Grund ist eine geeignete Anpassung notwendig.

Auf Basis der ermittelten Förderströme \bar{Q} und des gemessenen Pegels in der Pumpenvorlage kann der Zulauf \bar{Q}^Z berechnet werden (siehe Abschlussbericht zum Projekt AZ29356_2).

6.2 Berechnung der Ablagerungshöhe

Die Förderhöhe einer Anlage setzt sich aus der geodätischen Höhe H_{geo} (in [m]) und den Reibungsverlusten ΔH in einer Druckrohrleitung zusammen. Letzte können nach Darcy-Weisbach durch

$$\Delta H := \lambda \frac{l}{d} \frac{v^2}{2g},$$

wobei

λ	Rohrreibungsbeiwert	[-]
l	Rohrleitungslänge	[m]
d	Rohrleitungsdurchmesser	[m]
v	Fließgeschwindigkeit	[m/s]
g	Erdbeschleunigung,	[m/s ²]

berechnet werden. Wird die Fließgeschwindigkeit v durch den Förderstrom Q (in [m³/h]) ausgedrückt, d.h. $Q = 3600v\bar{A}$, wobei \bar{A} die Querschnittsfläche der Druckleitung ist, so ergibt sich die Förderhöhe der Anlage durch

$$H^A = H_{geo} + \lambda \frac{l}{d} \frac{Q^2}{2g3600^2 \bar{A}^2}.$$

Für laminare Strömungen kann der Rohrreibungsbeiwert mittels der Reynoldszahl $Re = \frac{64}{\nu}$, wobei ν die kinematische Viskosität (in [m²/s]) ist, durch $\lambda = \frac{64}{Re}$ angegeben werden. Eine Strömung ist laminar, wenn die Reynoldszahl kleiner als 2.320 ist. Für größere Reynoldszahlen wird die Strömung als turbulent bezeichnet. Der Rohrreibungsbeiwert ist dann die Lösung der Prandtl-Colebrook-Gleichung

$$\frac{1}{\sqrt{\lambda}} = -2 \log \left(\frac{2.51}{Re\sqrt{\lambda}} + \frac{k}{3.71d} \right),$$

wobei k die absolute Rohrrauigkeit (in [m]) beschreibt.

Falls die Rohrleitung Ablagerungen enthält, verkleinert sich die Rohrquerschnittsfläche \bar{A} . Darüber hinaus wird zur Berechnung der Förderhöhe statt des Durchmessers d der hydraulische Durchmesser d_h verwendet. Dieser ergibt sich wie folgt, [Aig03]:

$$\bar{A} = \frac{\pi d^2}{4} - \frac{d}{4} \left(d \arccos \left(1 - \frac{2h_s}{d} \right) - 2\sqrt{h_s(d-h_s)} \left(1 - \frac{2h_s}{d} \right) \right),$$

$$s = 2\sqrt{h_s(d-h_s)},$$

$$b = d \arccos \left(1 - \frac{2h_s}{d} \right),$$

$$U = \pi d - b + s,$$

$$d_h = \frac{4\bar{A}}{U}.$$

Dabei wird unterstellt, dass sich die Ablagerungen gleichmäßig gemäß Abbildung 32 über die Rohrlänge l verteilen.

Zur Berechnung der realen Ablagerungshöhe h_s können die bei verschiedenen Frequenzen ermittelten Förderströme Q_i und Förderhöhen H_i , $i = 1, \dots, n$, verwendet werden. Dazu ist das folgende nichtlineare Ausgleichsproblem zu lösen, [Fri15]:

$$\min_{h_s, H_{geo}} \sum_{i=1}^n \left(H_{geo} + \lambda \frac{l}{d_h} \frac{Q_i^2}{2g3600^2 \bar{A}^2} - H_i \right)^2$$

$$\text{unter } \bar{A} = \frac{\pi d^2}{4} - \frac{d}{4} \left(d \arccos \left(1 - \frac{2h_s}{d} \right) - 2\sqrt{h_s(d-h_s)} \left(1 - \frac{2h_s}{d} \right) \right),$$

$$d_h = \frac{4\bar{A}}{\pi d - d \arccos \left(1 - \frac{2h_s}{d} \right) + 2\sqrt{h_s(d-h_s)}}$$

$$\lambda = \frac{64 \cdot 3600 \bar{A} v}{Q_i d_h} \quad \forall i \in \{1, \dots, n\} \text{ mit } \frac{Q_i d_h}{\bar{A} v} \leq 2320,$$

$$\frac{1}{\sqrt{\lambda}} = -2 \log \left(\frac{2.51 \cdot 3600 \bar{A} v}{Q_i d_h \sqrt{\lambda}} + \frac{k}{3.71 d_h} \right) \quad \forall i \in \{1, \dots, n\} \text{ mit } \frac{Q_i d_h}{\bar{A} v} > 2320.$$

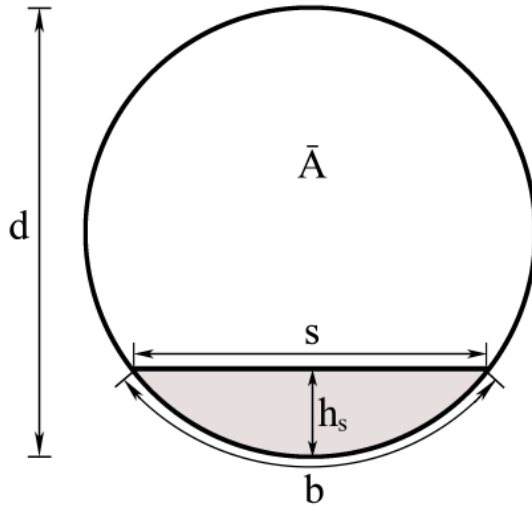


Abbildung 32: Rohrquerschnitt bei Ablagerungen

Der Vorteil dieser Art der Bestimmung des Rohrleitungszustandes ist, dass dazu keine Einbauten notwendig sind. Es wird lediglich der Frequenzumformer zum Betrieb der Pumpe bei verschiedenen Frequenzen und zur Messung der Leistungsaufnahme benötigt. Mit dem oben beschriebenen Verfahren werden daraus die Förderströme und Förderhöhen berechnet, welche schließlich zur Bestimmung der Ablagerungshöhe verwendet werden.

6.3 Auswertung der Ablagerungshöhe

Für die Pumpstation in Prerow konnten durch den Einsatz einer Drehzahlregelung zur effizienten Betriebsweise keine negativen Auswirkungen auf den Zustand der Druckrohrleitung festgestellt werden (siehe Abschlussbericht zum Projekt AZ29356_2).

Auch im Pumpwerk in Rostock hatte die Art der Steuerung keinen signifikanten Einfluss auf das Verhalten der Anlagenkennlinie bzw. die Höhe der Ablagerungen in der Druckleitung. Während des ersten Testzeitraumes zwischen Ende Mai 2015 und Mitte September 2015 wurden verschiedene Strategien umgesetzt. Neben der herkömmlichen Zweipunktsteuerung, die bis zum Beginn der täglichen Vermessung des Anlagenkennfeldes am 25.05.2015 durchgeführt wurde, wurde auch die regelbasierte Steuerstrategie umgesetzt. Dabei wurde eine energetisch optimale Frequenz von ca. 41 Hz errechnet. Außerhalb des Prozesses zur Vermessung des Anlagenkennfeldes stellte dies die einzustellende Mindestfrequenz dar. Diese Art der Steuerung erfolgte zwischen dem 25.05.2015 und dem 05.08.2015. Zwischenzeitlich wurde für zwei Tage eine Zweipunktsteuerung im Parallelbetrieb getestet. Im Gegensatz zur herkömmlichen Zweipunktsteuerung wurden hier zwei Pumpen parallel bei Nenndrehzahl betrieben, um die Förderströme und damit die Fließgeschwindigkeit zu erhöhen und auf diese Weise Ablagerungen in der Druckrohrleitung lösen zu können. Zwischen dem 05.08.2015 und dem 25.08.2015 wurde die regelbasierte Strategie bei reduzierter Mindestfrequenz umgesetzt (hier 38 Hz), um die Auswirkungen einer weiteren Absenkung der Fließgeschwindigkeit auf den Zustand der Druckrohrleitung zu testen. Da auch hier keinerlei Änderungen festzustellen waren, wurde die Frequenz im Anschluss auf 37 Hz reduziert. Auch hier konnte keine Veränderung festgestellt werden. In Abbildung 33 (links) ist der Verlauf der täglich berechneten Ablagerungshöhen zwischen dem 25.05.2015 und dem 08.09.2015 zu sehen.

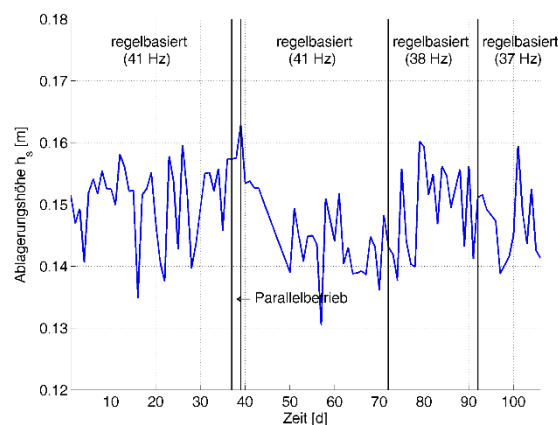


Abbildung 33: Verlauf der Ablagerungshöhe in Druckleitung Rostock/Schmarl

Zu Beginn der Vermessung der Anlagenkennlinien lag die Ablagerungshöhe bei $h_s = 0,1527\text{m}$. Zu beachten ist, dass Ablagerungshöhen unter Verwendung der gegebenen übrigen Rohrparameter und des Pumpenkennfeldes berechnet wurden. Sind die Annahmen aufgrund von Abnutzungserscheinungen am Pumpenlaufrad und in der Druckleitung nicht mehr korrekt, so hat dies auch Auswirkungen auf die berechnete Ablagerungshöhe, sodass diese tatsächlich

deutlich geringer ausfallen kann. Für die Pumpen in Schmarl konnte festgestellt werden, dass die gemessene Leistungsaufnahme deutlich geringer als angenommen ist. Es ist daher anzunehmen, dass auch die gegebene Pumpenkennlinie zu hohe Werte liefert. Die tatsächliche Anlagengröße scheint daher geringer als berechnet zu sein.

Der Mittelwert der berechneten Sedimenthöhen über den gesamten Zeitraum beträgt $\mu = 0,154$ m. Die Standardabweichung liegt bei $\sigma = 0,0066$ m. Auch bei separater Betrachtung der mittleren Sedimenthöhen für die verschiedenen Steuerungsphasen sind keine großen Abweichungen festzustellen. Die Mittelwerte der einzelnen Perioden, in denen die regelbasierte Steuerstrategie zweimal bei 41 Hz und im Anschluss bei 38 Hz und 37 Hz umgesetzt wurde, betragen $\mu_1^{41 Hz} = 0,1533$ m, $\mu_2^{41 Hz} = 0,1523$ m, $\mu^{38 Hz} = 0,1548$ m und $\mu^{37 Hz} = 0,1525$ m und unterscheiden sich nur geringfügig voneinander. Während des Parallelbetriebs lag die Ablagerungshöhe sogar etwas höher als im Mittel. Die Werte lagen jedoch auch noch innerhalb der zweifachen Standardabweichung. Es kann festgestellt werden, dass durch diese Betriebsweise keine Erosion von Ablagerungen erfolgte. Darüber hinaus hat auch hier eine Reduzierung der Fließgeschwindigkeit keine negativen Auswirkungen auf den Rohrleitungszustand. Eine Ursache dafür liegt darin, dass die Pumpstation über einen Bogenrechen verfügt, der grobe Verschmutzungen aus dem Abwasser filtert, bevor diese in den Pumpensumpf gelangen. Das Risiko einer Verstopfung des Pumpenlaufrades und der Bildung von Ablagerungen in der Druckrohrleitung wird dadurch deutlich gesenkt.

Nach dem 08.09.2015 wurde zunächst wieder auf die herkömmliche Steuerung der EURAWASSER Nord GmbH umgestellt. Die energieeffiziente Steuerung wurde genau zwei Monate später wieder aufgenommen. Die energetisch optimale Frequenz stellte sich hier erneut bei 41 Hz ein. Im Folgenden wurde an der Steuerung keine Änderung vorgenommen. Der Verlauf der Ablagerungshöhen bis zum 18.03.2016 ist in Abbildung 33 (rechts) zu sehen. Auffällig ist hierbei, dass die Ablagerungshöhe zunächst steigt und im Anschluss wieder auf 0,153 m sinkt. Zwischen dem 24.12.2015 und dem 31.12.2015 kommt es dann zu einem sukzessiven Anstieg der Sedimentationshöhe auf 0,164 m. Danach verharrt diese auf diesem Niveau. Das Sinken und Ansteigen der Ablagerungshöhe kann nicht abschließend geklärt werden. Die Messungen der Feststoffkonzentration am Ein- und Ausgang der Druckleitung sowie die Differenz der gemessenen Tagesfeststoffmasse am Ein- und Ausgang zeigten keine Auffälligkeiten.

Für die Druckleitung der Pumpstation in Regensburg konnte festgestellt werden, dass selbst eine dauerhafte Reduzierung der Frequenz auf 30 Hz (entspricht energetisch optimaler Frequenz) keine Verschlechterung des Rohrzustandes zur Folge hat. Die Ablagerungshöhen schwanken hier unabhängig von der Steuerstrategie zwischen 0 und 0,03 m.

6.4 Steuerung

Die Pumpstation in Schmarl wurde zwischen dem 25.05.2015 und dem 31.03.2016 mit kurzen Unterbrechungen energieeffizient betrieben. Dies bedeutet, dass die Pumpen bei 41 Hz betrieben wurden, wenn das Abwasseraufkommen dies zuließ. Zusätzlich wurde einmal täglich die

Anlagenkennlinie vermessen, um den Zustand des Systems zu überwachen. Gegenüber der herkömmlichen Zweipunktsteuerung konnte so eine Energieeinsparung von 11 % erreicht werden. Dies entspricht einer jährlichen Reduzierung des Verbrauchs um 16.000 kWh.

Zum Test der Steuerstrategien in Mischsystemen wurde im Oktober 2015 die Steuerung der Pumpstation in Regensburg angepasst. Hier wurden die Pumpen bereits drehzahl geregelt betrieben. Jedoch wurde die Drehzahlregelung zur Vergleichmäßigung der Förderströme bei Trockenwetter eingesetzt. Hier wurde die Frequenz auf 37 Hz reduziert. Dies entspricht aber nicht der energieoptimalen Frequenz. Diese liegt bei 30 Hz und damit nahe der Mindestfrequenz, welche zur Öffnung der Rückschlagklappen notwendig ist. In Abhängigkeit vom Abwasserzufluss kann eine Energieeinsparung von bis zu 47 % (bei Trockenwetter) erreicht werden. Dies ist mit einer jährlichen Verbrauchseinsparung von 31.400 kWh gleichzusetzen.

Die Auswertung der Ablagerungshöhen sowie die Untersuchungen zu Sedimentation und Erosion zeigen, dass Ablagerungen bereits bei sehr kleinen Fließgeschwindigkeiten gelöst werden. Am Beispiel der Pumpstation in Rostock beträgt diese 0,034 m/s. In Prerow liegt die Mindestfließgeschwindigkeit zum Erreichen der kritischen Schubspannung bei 0,08 m/s. Dies entspricht einer Frequenz von 29 Hz. Die Rückschlagklappe öffnet sich aber erst bei 30 Hz. Für die Pumpstation in Regensburg beträgt die Mindestfließgeschwindigkeit 0,17 m/s. Diese wird bei einer Frequenz von 27,5 Hz erreicht. Da eine Mindestfrequenz von 29 Hz vorgegeben wurde, werden Ablagerungen bei Pumpenbetrieb auch hier stets gelöst.

Zum sicheren Betrieb der Anlage ist lediglich darauf zu achten, dass die kritische Schubspannung erreicht wird. Da dies jedoch bereits bei sehr kleinen Geschwindigkeiten erreicht wird, ist eine Spülung der Rohrleitung mit Abwasser bei erhöhter Drehzahl oder mit Druckluft in vielen Fällen nicht nötig – hängt jedoch von der Abwasserzusammensetzung und den Parametern bezüglich Sedimentation und Erosion ab.

7. Ökologische, technische und ökonomische Bewertung der Ergebnisse

7.1 Ökologische Bewertung

Durch den energieeffizienten Einsatz der Drehzahlregelung in der Abwassertechnik können signifikante Energieeinsparungen erzielt werden. Während im Pumpwerk Rostock/Schmarl eine Energieeinsparung von 16.000 kWh erzielt werden konnte, beträgt die Einsparung im Pumpwerk Regensburg sogar bis zu 31.400 kWh.

Laut einem Bericht des Umweltbundesamtes betrug die Kohlenstoffemission bei der Stromerzeugung in Deutschland im Jahr 2014 308 Mio. t. Durch den Strommix in der Stromerzeugung ergibt sich für das Jahr 2014 ein CO₂-Emissionsfaktor von 569 g/kWh [Umw15]. Für die drei Stationen bedeutete dies eine Minderung der CO₂-Emission von ca. 29.702 kg in einem Jahr.

Bundesweit gibt es schätzungsweise 100.000 Pumpstationen. Überträgt man die mittlere jährliche Einsparung der drei Pumpstationen auf nur 20.000 Pumpwerke ergibt sich eine Gesamteinsparung von 348 GWh, was einer Reduzierung der CO₂-Emissionen um 198.000 t entspricht. Dies ist mit der jährlichen CO₂-Emission von 74.576 Pkw mit einer Fahrstrecke von 15.000 km pro Jahr gleichzusetzen.

7.2 Technische Bewertung

Die Differenzganglinien der Sonden zeigen, dass sich zwar Material am Boden des Rohres sammelt, allerdings nicht absetzt. Es kommt zu einer inhomogenen Feststoffverteilung, mit einer steigenden Konzentration zur Rohrsohle. Die Auswertungen der Ablagerungshöhen zeigen ebenfalls konstant bleibende Ablagerungen in verschiedenen Frequenzbereichen. Damit bestätigen die Messungen der Feststoffkonzentrationen mittels der TS-Sonden die Ergebnisse der Auswertung der Ablagerungshöhen. Diese wurde nicht-invasiv bestimmt, sodass bei der Überwachung der Betriebssicherheit auf die Installation zusätzlicher Messtechnik verzichtet werden kann.

7.3 Ökonomische Bewertung

Die jährliche Energieeinsparung in Rostock/Schmarl beträgt gegenüber der herkömmlichen Zweipunktsteuerung ca. 11 %, was einer Verbrauchseinsparung von 16.000 kWh entspricht. Bei einem Strompreis von 0,15 €/kWh können somit jährlich ca. 2.400 € eingespart werden. Die Kosten für die Installation eines zur Pumpe passenden Frequenzumrichters und eines Sinusfilters betragen mindestens 4.000 €, sodass sich die Umrüstung nach etwa 1,7 Jahren amortisiert.

In der Pumpstation Regensburg liegt die Einsparung sogar bei bis zu 47 % bzw. 31.400 kWh. Dies ist mit einer jährlichen Kostenersparnis von 4.710 € gleichzusetzen. Auch hier lägen die Kosten für einen Frequenzumrichter bei ca. 4.000 €. Damit beträgt die Amortisationszeit hier weniger als 1 Jahr.

In dem Projekt zeigte sich, dass keine negativen Auswirkungen durch den Einsatz der Drehzahlregelung festzustellen waren. Damit entstehen auch keine weiteren Kosten für die Beseitigung etwaiger Verstopfungen oder für die Anschaffung zusätzlicher Messtechnik zur Überwachung des Systems.

Wird außerdem berücksichtigt, dass die Lebensdauer der Pumpe durch den Einsatz eines Frequenzumrichters erhöht werden kann, hat dies einen weiteren positiven Effekt auf die Lebenszykluskosten. Zudem ist mit einer weiteren Steigung der Strompreise zu rechnen, wodurch die Umstellung auf drehzahlregelbare Pumpen und die Umsetzung der in diesem Projekt entwickelten Steuerstrategien noch attraktiver wird.

Durch die Reduzierung der Drehzahl und damit der Fließgeschwindigkeit sind Pumpen länger bei weniger Leistung aktiv. Damit werden die Förderströme gleichmäßiger. Ein gleichmäßiger Zulauf zur Kläranlage kann die in einer Kläranlage anfallenden Kosten zur Abwasserbehandlung zusätzlich reduzieren.

8. Maßnahmen zur Verbreitung der Ergebnisse

Es sind Veröffentlichungen der in der Praxis ermittelten Untersuchungsergebnisse und Steuerstrategien zum energieeffizienten Einsatz der drehzahlregelbaren Abwasserpumpe in einschlägigen nationalen und internationalen Fachzeitschriften (Korrespondenz Abwasser, gwf Wasser/Abwasser, Water Science & Technology, Water Research, oder World Pumps) geplant.

Auf der am 31.08.2016 bis zum 02.09.2016 in Rotterdam stattfindenden SPN8 (8th International Conference on Sewer Processes & Network) wird ein 10 minütiger Vortrag über die Laborarbeit (Sedimentationsversuche) gehalten. Ausgewählte Paper werden in Fachzeitschriften der IWA (international water association) veröffentlicht. Eine Veröffentlichung passend zum Vortrag ist angestrebt.

Darüber hinaus sind weitere Veröffentlichungen, hinsichtlich der Erosionsversuche, sowie des Transportmodells und dessen Validierung anhand der Feststoffsonden für das Jahr 2016 vorgesehen.

Veröffentlichung und Präsentation auf der internationalen Konferenz:

3rd International Rotating Equipment Conference (IREC)

Pumps, Compressors and Vacuum Technology

Düsseldorf, 14 – 15 September 2016

Dr. Edgar Große Westhoff, Dr. Martin Schwarz, Dr. Alexander Fricke (2016):

“Increasing system efficiency of sewage pump stations by speed control”

9. Fazit

In dem hier bearbeiteten Projekt konnte nachgewiesen werden, dass eine Reduzierung der Drehzahl und der Fließgeschwindigkeit zu keinen Beeinträchtigungen während des Abwasserförderbetriebs führt. Während die im Projekt mit dem Aktenzeichen 29356 entwickelten energieeffizienten Steuerstrategien zunächst nur für eine Pumpstation in Prerow mit besonderem Abwasser (geschnittenes Abwasser durch Hauspumpstationen) getestet wurden, wurden die Strategien in diesem Projekt unter deutlich schwierigeren Bedingungen getestet. Zum Pumpwerk in Rostock/Schmarl, welches sich in einem Trennsystem befindet, gelangt das Abwasser unbehandelt. Hier befindet sich jedoch ein Grobrechen vor der Pumpstation, sodass keine groben Verunreinigungen in den Pumpensumpf gelangen. Nichtsdestotrotz können die Partikel im Abwasser noch deutlich größer als bei der Pumpstation in Prerow sein. Zusätzlich wurde eine Pumpstation in Regensburg betrachtet. Das Abwasser, welches sich sowohl aus Schmutz- als auch aus Regenwasser (Straßenabläufe) zusammensetzt, gelangt hier mechanisch unbehandelt in den Pumpensumpf. Damit können auch grobe Verschmutzungen in das Pumpenlaufrad und die Druckleitung gelangen, was das Risiko zur Verstopfung des Pumpenlaufrades und zur vermehrten Bildung von Ablagerungen in der Druckrohrleitung erhöht. Solche Erscheinungen konnten aber trotz verschiedener Pumpenbetriebsweisen und dauerhaftem Betrieb bei kleiner Fließgeschwindigkeit bei keiner Pumpstation zu keinem Zeitpunkt beobachtet werden. Zwar konnten geringe Schwankungen der berechneten Ablagerungshöhen in der Druckleitung festgestellt werden. Diese ergaben sich aber unabhängig von der verwendeten Steuerstrategie. Dies bestätigt auch die Versuche im Labor. Hier wurde eine kritische Schubspannung zur Lösung von Ablagerungen von $0,12 \text{ N/m}^2$ festgestellt. Eine solche Schubspannung wird bereits bei sehr kleinen Fließgeschwindigkeiten ($v < 0,1 \text{ m/s}$) erreicht.

In diesem Projekt wurde zudem ein Sedimenttransportmodell entwickelt, das die Vorgänge in der Druckleitung, also den Transport der Feststoffe im Abwasser und der Ablagerungen entlang der Druckrohrleitung, beschreibt. Diverse numerische Tests zeigten eine sehr gute Übereinstimmung von simulierten und gemessenen Feststoffkonzentrationen. Die im Labor ermittelten Parameter bezüglich Sedimentation und Erosion wichen jedoch leicht von den Messdaten der TS-Sonden ab, die in der Druckleitung in Rostock/Schmarl und an der Kläranlage erfasst wurden. Es konnte aber festgestellt werden, dass selbst bei großer Variation der Parameter keine dauerhafte Bildung von Ablagerungen in der Rohrleitung einstellt.

Betreiber von Abwasserpumpstationen stehen der Drehzahlregelung ihrer Pumpen bisher noch skeptisch gegenüber, da sie die Betriebssicherheit gefährdet sehen. In diesem Projekt wurde jedoch gezeigt, dass signifikante Energieeinsparungen von bis zu 47 % gegenüber der herkömmlichen Zweipunktsteuerung erzielt werden können, wobei selbst unter schwierigen Bedingungen keine negativen Auswirkungen auf den Pumpen- und Rohrleitungszustand festgestellt werden konnten.

10. Literaturverzeichnis

- [ABD94] AMOS, C.; BRYLINSKY, C., H.; DABORN, G.: Seabed stability, liquefaction and the development of fluid mud during dredging and dumping at Miramichi Inner Bay, Acadia Centre for Estuarine Research (32), 1994
- [ABM96] ACKERS, J. C.; BUTLER, D.; MAY, R. W. P.: *Design of sewers to control sediment problems*. Construction Industry Research and Information Association. London, 1996.
- [Aig96] AIGUER, E. L., et al.: *Methods for determining the settling velocity profiles of solids in storm sewage*, Water Science and Technology (9), 33, 117–125, 1996.
- [Aig98] AIGUER, E. L., et al.: *Analysis of the methods for determining the settling characteristics of sewage and stormwater solids*, Water Science and Technology (1), 37, 53–60, 1998.
- [Aig03] AIGNER, D.: *Hydraulische Bemessung von Freigefälledruckleitungen zum Abwassertransport*, LfUG-Merkblatt: Freigefälledruckleitungen, 2003
- [Amo04] AMOS, C.: *The stability of tidal flats in Venice Lagoon. The results of in-situ measurements using two benthic, annular flumes*, Journal of Marine Systems (51), S. 211–241, 2004
- [ATV01] ATV-DVWK-A 110: *Hydraulische Dimensionierung und Leistungsnachweis von Abwasserkanälen und -leitungen*, Regelwerk, Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall, 2001
- [AWK] ABWASSERZWECKVERBAND DARSS, WASTRA-PLAN, KLÖCKNER MÖLLNER, JUNG PUMPEN: *Der Darß – Abwasserentsorgung mit Druckentwässerung*, Informationsbroschüre
- [Bau98] BAUR, H.: *Druckentwässerungsanlagen*, Universität Rostock, 1998
- [BCS98] BERTRAND-KRAJEWSKI, J.-L.; CHEBBO, G.; SAGET, A.: *Distribution of pollutant mass vs volume in stormwater discharges and the first flush phenomenon*, Water Research (8), 32, 2341–2356, 1998.
- [Ben15] BENEKE, K.: *APW Schmarl - angeschlossenes System.*, Mail vom 25.08.2015
- [Ber01] BERTRAND-KRAJEWSKI, J.-L.: *Détermination des vitesses de chute des polluants en phase particulaire des rejets urbains par ajustement numérique de la courbe M(t) pour le protocole VICTOR*. RTEsearch Rep. Prepared for Institut National des Sciences Appliquées. Lyon. 2001.
- [BL90] BENOIST, A. P.; LIJKLEMA, L.: *Distribution of sedimentation rates of suspended solids and heavy metals in combined sewer overflows*, Water Science and Technology (10-11), 22, 61–68, 1990.
- [BM01] BRASHEAR, R. W.; MAKSIMOVIC, C.: *Specialty Symposium on Urban Drainage Modeling at the World Water and Environmental Resources Congress 2001*.
- [Bol13] BOLLRICH, G.: *Technische Hydromechanik 1*, Beuth Verlag, Berlin, 2013

- [Bol89] BOLLRICH, G.: *Technische Hydromechanik 2*, Verlag für Bauwesen, Berlin, 1989
- [CCL98] CHANCELIER, J.; CHEBBO, G.; LUCAS-AIGUIER, E.: *Estimation of settling velocities*, Water Research (11), 32, 3461–3471, 1998.
- [CG09] CHEBBO, G.; GROMAIRE, M.-C.: *VICAS—An Operating Protocol to Measure the Distributions of Suspended Solid Settling Velocities within Urban Drainage Samples*, Journal of Environmental Engineering (9), 135, 768–775, 2009.
- [CGL03] CHEBBO, G.; GROMAIRE, M.-C.; LUCAS, E.: *Protocole VICAS: Mesure de la vitesse de chute des MES dans les effluents urbains*, Techniques - Sciences - Methodes (12), 39–49, 2003.
- [Che92] CHEBBO, G.: *Solides des rejets pluviaux urbains : caractérisation et traçabilité*. Dissertation. Paris. 1992.
- [Cra89] CRABTREE, R. W.: *Sediments in sewers*, Journal of Institution of Water and Environmental Management (6), 3, 569–578, 1989.
- [Dea09] DEUTSCHE ENERGIE-AGENTUR GmbH: *Initiative Energieeffizienz*, 2009, URL: <http://www.industrie-energieeffizienz.de/technologien/pumpensysteme.html>, Stand 24.02.2013
- [Deu87] DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG: *Bestimmung des Gesamttrockenrückstandes, des Filtrattrockenrückstandes und des Glührückstandes (H 1)*, DIN 38409-1, 1987.
- [Deu03] DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG: *Wasserbeschaffenheit - Bestimmung des chemischen Sauerstoffbedarfs (ST-CSB) - Kivettentest*, DIN ISO 15705:2003-01, 2003.
- [Doh04] DOHSE, C.: *Untersuchungen zur Dimensionierung und zum Betrieb von Druckentwässerungsanlagen*, Dissertation, Universität Rostock, 2004
- [Eck13] Eckstädt, H., Neymeyr, K., Krause, A. & Fricke, A.: *Untersuchung der Möglichkeiten eines energieeffizienten Betriebsmanagements von Abwasserfördersystemen*, Abschlussbericht DBU-Projektphase 1, 2013
- [Eng14] ENGELKE, P.: *Untersuchungen zur Modellierung des Feststofftransports in Abwasserkanälen*, Dissertation, Universität Rostock, 2014.
- [Fra07] Fraunhofer-Institut für System- und Innovationsforschung, *Das Motor Challenge Programm*, 2007, URL: <http://www.motor-challenge.de/module/brochures/technischer-de.pdf>
- [Fri15] FRICKE, A.: *Optimale Steuerung und ihre Anwendungen in der Abwassertechnik*, Dissertation, Universität Rostock, 2015
- [Geb09] GEBHARD, V.: *Interaktionen bei der Modellierung von Stofftransport, Sedimenthaushalt, und Abfluss in der Siedlungsentwässerung*. Dissertation. Technische Universität Dresden. 2009.
- [Gre12] GREENPEACE: *UN-Klimagipfel 2012, Zurück aus Doha – der Blick nach vorn*, 2012

- [Gro08] GROMAIRE, M. C., et al.: *Settling velocity of particulate pollutants from combined sewer wet weather discharges*, Water science and technology (12), 58, 2453–2465, 2008.
- [Guj02] GUJER, W.: *Siedlungswasserwirtschaft*, Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, 2002
- [GW02] GEIB, M.; WIELENBERG, M.: *Reinigung von Abwasserkanälen durch Hochdruckspülung*. Vulkan-Verl. Essen, 2002.
- [Has07] HASLER, M.: *Field and laboratory experiments on settling process in storm-water storage tanks*, Diplomarbeit, 2007.
- [HBS98] HEDGES, P. D.; BECKER, F. A.; SMISSON, R.: *The application of settling velocity as a parameter for characterising wastewater solids*, Water Science and Technology (1), 37, 45–52, 1998.
- [Her08] T. Herbers, *Magnetkupplungsmotoren in der Praxis - Energieeinsparpotenziale im Betrieb*, Chemie Ingenieur Technik, 2008, URL: <http://www3.interscience.wiley.com/cgi-bin/fulltext/117945154/PDFSTART>
- [Hoe15] HOEFT, S.: *In-Situ-Untersuchungen zum Erosionsverhalten von Sedimenten in Mischwasserkanalisationen*. Dissertation. Technische Universität Dresden. 2015.
- [Jun96] JUNG PUMPEN: *Prozessbeschreibung der Kommunalen Umweltschutzmaßnahme – Abwassertechnische Erschließung der Darß Gemeinden Born, Wieck und Prerow mit Abwasserüberleitung zur Kläranlage Wieck, Darß*, 1996
- [Lan13] LANGE, R.-L.: *Untersuchungen zum Ablagerungsverhalten in der Mischkanalisation als Grundlage der Optimierung von Reinigungsintervallen*. Dissertation, Ruhr-Universität Bochum, 2013.
- [LSK97] LIEM, R.; SPORK, V.; KÖNGETER, J.: *Investigations on erosional processes using an in-situ measuring device*, International journal of sediment research (3), 12, 139–147, 1997.
- [Mic95] MICHELBAACH, S.: *Origin, resuspension and settling characteristics of solids transported in combined sewage*, Water Science and Technology (7), 31, 69–76, 1995.
- [MW92] MICHELBAACH, S.; WÖHRLE, C.: *Settleable solids in a combined sewer system - Measurement, quantity, characteristics*, Water Science and Technology (8), 25, 181–188, 1992.
- [Rip14] Rippl, K.: *Untersuchung und Modellierung der Bildung partikulärer Ablagerungen in Trinkwasserverteilungsnetzen*, Dissertation, Technische Universität Dresden, 2014
- [Ris95] RISTENPART, E.: *Feststoffe in der Mischwasserkanalisation*. SuG-Verl.-Ges. Hannover, 1995.
- [SK91] SCHÜNEMANN, M.; KÜHL, H.: *A device for erosion-measurements on naturally formed, muddy sediments: the EROMES-system*. GKSS. Geesthacht, 1991.
- [Spo97] SPORK, V.: *Erosionsverhalten feiner Sedimente und ihre biogene Stabilisierung*. Mainz. Aachen, 1997.

- [Ste00] STERLING FLUID SYSTEM GRUPPE: *Grundlagen für die Planung von Kreiselpumpenanlagen*, Itzehoe, 2000
- [Sul97] Sulzer Pumpen: *Kreiselpumpenhandbuch*, Vulkan-Verlag Essen, 1997
- [TB12] THAMSEN, P. & BASHINSKIY, S.: *Abwehr von Verstopfungsereignissen – Forschung an der TU Berlin: Die Änderung der Drehzahlsequenz als Möglichkeit zur Beseitigung von Störungen in Abwasserpumpen*, wwt – Wasserwirtschaft Wassertechnik, Ausgabe 7-8, HUSS-MEDIEN GmbH, Berlin, 2012
- [THS96] TYACK, J. N.; HEDGES, P. D.; SMISSON, R.: *The relationship between settling velocity grading and the characteristics of the contributing catchment*, Water Science and Technology (9), 33, 135–142, 1996.
- [Tol00] TOLHURST, T. J., et al.: *A comparison and measurement standardisation of four in situ devices for determining the erosion shear stress of intertidal sediments*, Continental Shelf Research (10-11), 20, 1397–1418, 2000.
- [Tra14] Tränckner, J., Neymeyr, K., Knubbe, A. & Fricke, A.: *Untersuchung der Möglichkeiten eines energieeffizienten Betriebsmanagements von Abwasserfördersystemen*, Abschlussbericht DBU-Projektphase 2, 2014
- [Tud13] TECHNISCHE UNIVERSITÄT DARMSTADT: *BMBF-Projekt „Odysseus“*, URL: <http://www.odysseus.tu-darmstadt.de/>, Stand: 24.02.2013
- [Umw15] UMWELTBUNDESAMT, *Entwicklung der spezifischen Kohlendioxid-Emissionen des deutschen Strommix in den Jahren 1990-2014*, 2015
- [VAB94] VERBANCK, M. A.; ASHLEY, R. M.; BACHOC, A.: *International workshop on origin, occurrence and behaviour of sediments in sewer systems*, Water Research (1), 28, 187–194, 1994.
- [Vol10] VOLZ, G.: *Elektrische Motoren in Industrie und Gewerbe: Energieeffizienz und Ökodesign Richtlinie*, Hrsg.: Deutsche Energie-Agentur GmbH, Berlin, 2010
- [Wid06] WIDMANN, R. & MIETZEL, T.: *Übertragbare Bestimmung der Reinigungsleistung eines Wirbelabscheiders am Regenüberlaufbecken Bochum Dorneburger Mühlenbach – Phase II*, Abschlussbericht, Universität Duisburg-Essen, Siedlungswasser- und Abfallwirtschaft, Essen, 2006
- [Wil09] WILO SE: *Wilo-EMU FA... + FKT 27.1... Einbau- und Betriebsanleitung*, Hof, 2009
- [Wil13] WILO ÖSTERREICH: *Produkte und Preise 2013, Heizung, Klima, Kälte, Wasserversorgung und Abwasser*, Wiener Neudorf, Österreich, 2013