

DBU-Forschungsprojekt

ENTfrachtEN

Entwicklung eines integralen Mess-, Steuerungs- und Regelungstechnik-(MSR-) Konzepts zur frachtbasierten Echtzeit-Steuerung der Abwasserableitung in Kanalnetzen zur Entlastung der Gewässer

Schlussbericht

Förderkennzeichen: DBU-AZ: 37408/01

Projektlaufzeit: 01.10.2021 – 31.03.2025

Gefördert durch



Deutsche
Bundesstiftung Umwelt

DBU Forschungsprojekt

ENTfrachtEN

Entwicklung eines integralen Mess-,
Steuerungs- und Regelungstechnik-(MSR-)
Konzepts zur frachtbasierten Echtzeit-Steuerung
der Abwasserableitung in Kanalnetzen
zur Entlastung der Gewässer

Schlussbericht

DBU-AZ: 37408/01

IMPRESSUM

Antragsteller



NIVUS GmbH
Im Täle 2
75031 Eppingen
Thorsten Schmitz, M. Eng.

Gefördert durch



Deutsche
Bundesstiftung Umwelt

Projektpartner



**Forschungsinstitut für Wasser-
wirtschaft und Klimazukunft
an der RWTH Aachen (FiW) e. V.**
An der Ölmühle 4
52074 Aachen
Sebastian Kerger, M. Sc.
Yu-Jin Schröer, B. Sc.
Leon Trojan, B. Sc.
Dr.-Ing. Kristoffer Ooms



**Stadtentwässerungsbetriebe
Köln, AöR**
Ostmerheimer Straße 555
51109 Köln
Dipl.-Ing. Frank Rüsing
Dipl.-Ing. Gregor Bergrath
Timo Hendschke, B. Eng
Dipl.-Ing. Thomas Kurtz

Zitierhinweis

Kerger, S.; Schmitz, T.; Rüsing, F.; Schröer, Y.-J.; Trojan, L.; Ooms, K.; Bergrath, G.; Hendschke, T.; Kurtz, T. (2025): Entwicklung eines integralen Mess-, Steuerungs- und Regelungstechnik-(MSR-) Konzepts zur frachtbasierten Echtzeit-Steuerung der Abwasserableitung in Kanalnetzen zur Entlastung der Gewässer (ENTfrachtEN). Abschlussbericht im DBU-Förderprojekt, Förderkennzeichen DBU-AZ: 37408/01, FiW e. V., Aachen.

Förderkennzeichen:

Das diesem Bericht zugrundeliegende Vorhaben wurde mit Mitteln der Deutsche Bundesstiftung Umwelt (DBU) unter dem Förderkennzeichen DBU-AZ: 37408/01 gefördert. Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt bei den Autoren.

www.fiw.rwth-aachen.de/referenzen/entfrachten

Aachen, Mai 2025

Projektkennblatt
der
Deutschen Bundesstiftung Umwelt

Az **37408/01**Referat **Wasser, Boden,
Infrastruktur**Fördersumme **299.798,00 €**

Antragstitel **Entwicklung eines integralen Mess-, Steuerungs- und Regelungstechnik-(MSR-)Konzepts zur frachtbasierten Echtzeit-Steuerung der Abwasserableitung in Kanalnetzen zur Entlastung der Gewässer**

Stichworte Ressourcenschonung, Umwelttechnik

Laufzeit

3,4a

Projektbeginn

18.10.2021

Projektende

31.03.2025

Projektphase(n)

1

Zwischenberichte

Bewilligungsempfänger NIVUS GmbH
Im Täle 2
75031 Eppingen
<https://www.nivus.de/de/>

Tel 0762 9191 0

Fax 0762 9191 999

Projektleitung

Thorsten Schmitz

Bearbeiter

Thorsten Schmitz

Kooperationspartner Forschungsinstitut für Wasserwirtschaft und Klimazukunft an der RWTH Aachen e. V.
An der Ölmühle 4
52074 Aachen
<https://www.fiw.rwth-aachen.de/>

Stadtentwässerungsbetriebe Köln, Anstalt des öffentlichen Rechts (StEB Köln)
Ostmerheimer Straße 555
51109 Köln
<https://steb-koeln.de/>

Zielsetzung und Anlass des Vorhabens

Stoffeinträge aus der Siedlungsentwässerung haben vielfältige negative Einflüsse auf die Gewässer. So gelangen beispielsweise Schwermetalle maßgeblich über die Siedlungsentwässerung in die Gewässer. Diese Schwermetalle, aber auch andere Schadstoffe liegen häufig gebunden an feinen Feststoffpartikeln vor. Feststoffeinträge in Gewässer haben darüber hinaus direkte Auswirkungen auf die Wasserqualität, da bspw. durch organische Anteile die Sauerstoffzehrung verstärkt wird. Des Weiteren werden durch Kolmation der Gewässersohle und des damit verbundenen verminderten Austauschs zwischen fließender Welle und dem Interstitial die Gewässerbiozönosen negativ beeinflusst. Besonders kleinere Gewässer können so durch Einleitungen aus Kanalnetzen erheblichen Feststofffrachten ausgesetzt sein und infolgedessen signifikant beeinflusst werden. Leiten Kläranlagen gereinigtes Abwasser in einen Vorfluter mit geringer Wasserführung ein, so sinkt der Verdünnungsfaktor. Das hat eine signifikante Annäherung der Substanzkonzentration an die Ablaufkonzentration der Kläranlage zur Folge. Bei einem solchen Sachverhalt kann es vor allem in Dürreperioden dazu kommen, dass insbesondere kleinere Gewässer zu fast 100 % aus gereinigtem Abwasser bestehen. Der Feststofffrachtanteil kann zur Abschätzung auftretender Umweltbelastungen in den Gewässern herangezogen werden.

Durch die Umsetzung einer frachtbasierten Kanalnetzsteuerung kann und soll sichergestellt werden, dass bei der Einleitung in Gewässer zu keiner Zeit Feststofffrachten eingeleitet werden, die zu einer kritischen Konzentration mit den entsprechenden Folgen im Gewässer führen würden.

Anhand eines Pilotgebietes in **Köln-Rodenkirchen** untersuchen die **NIVUS GmbH, das Forschungsinstitut für Wasserwirtschaft und Klimazukunft an der RWTH Aachen e. V.** und die **Stadtentwässerungsbetriebe Köln** die Möglichkeiten der qualitätsabhängigen Steuerung mit dem Ziel, die Gesamtemissionen zu reduzieren. Das Projektgebiet ist besonders geeignet, da es bereits über eine ausgeprägte technische Kanalinfrastruktur mit Steuermöglichkeiten, wie Pumpanlagen und Hubwehren, sowie über Online-Steuer- und Messvorrichtungen verfügt. Das Gebiet lag als realitätsnahes und validiertes

Berechnungsmodell mit Berücksichtigung der stofflichen Emittenten vor. Das Vorhaben konnte daher, ohne signifikante Investitionskosten und mit geringem technischem Aufwand verwirklicht werden. Die Gebietsstruktur und die Größe der Kennwerte, wie angeschlossene Einwohner, Fläche und Verschmutzungsgrad entsprechen vielen mittelgroßen Kläranlagen in Deutschland. Eine Übertragbarkeit der Methodik und der Ergebnisse ist somit gegeben.

Bereits während des Projekts sollte der Einsatz der geplanten Steuerung rechnerisch auf ein Modellgebiet mit einem kleineren und sensibleren Vorfluter übertragen werden. Anhand der im Projekt erarbeiteten Ergebnisse hinsichtlich des Einflusses auf die Feststofffrachten können so Potenzialabschätzungen zur Reduzierung von Frachteinträgen aus Entlastungsbauwerken in empfindliche Vorfluter durch eine frachtbezogene Kanalnetzsteuerung abgeleitet und in Folgeprojekten umgesetzt werden.

Diese sollten anschließend mit den Umweltentlastungspotenzialen einer ungesteuerten Einleitung und einer volumenbezogenen Steuerung verglichen. Von den Ergebnissen des Forschungsvorhabens werden neue Erkenntnisse zum Zusammenwirken von Abfluss und Schmutzfrachtverlauf in Mischwasserkanälen erwartet. Des Weiteren sollte eine umsetzbare und übertragbare Lösung für die Online-Frachtdatenerfassung im Kanal gefunden und beschrieben werden.

Im Rahmen des Vorhabens sollte eine frachtbasierte Bewirtschaftung zur Entlastung der Gewässer und Verstetigung der Frachten im Zulauf der Kläranlagen konzipiert werden, woraus ein wesentlicher Beitrag zur Umweltentlastung erwartet wurde. Dies sollte beispielhaft an der Kläranlage Köln-Rodenkirchen untersucht werden. Das Kanalnetz im Pilotgebiet zeichnet sich durch seine Repräsentativität im Hinblick auf die enthaltenen Sonderbauwerke und Steuerungselemente sowie die Bebauungs- und Nutzungsformen (Wohngebiete, Gewerbegebiete) in einem typischen Mischkanalsystem aus. In Kombination mit dem innovativen Messansatz zur frachtbasierten Bewirtschaftung des Kanalnetzes mittels Multifrequenz-Ultraschallverfahren wird der Modellcharakter des Vorhabens begründet. Die Ergebnisse sollten am Ende hinsichtlich der Übertragbarkeit bewertet und in die Breite getragen werden.

Darstellung der Arbeitsschritte und der angewandten Methoden

Gesamtziel des Vorhabens war die Optimierung des Stoffstrommanagements bei der Siedlungsentwässerung im Mischsystem. Dieses Ziel sollte mit dem Instrument der gesteuerten Abwasserableitung im Kanalnetz realisiert werden.

Im Rahmen des Vorhabens wurde hierzu eine frachtbasierte Steuerung zur Entlastung der Gewässer und Verstetigung der Frachten im Zulauf der Kläranlagen betrachtet. Dies wurde anhand der Randbedingungen in einem Pileteinzugsgebiet untersucht. Folgende Schwerpunkte wurden hierbei behandelt:

1. Aufnahme und Messung von Äquivalenzen der abfiltrierbaren Stoffe (AFS_{aq}) mittels Online Messung (Sonden) an verschiedenen steuerungsrelevanten Stellen im Kanal, an den Entlastungsbauwerken und im Zulauf der Kläranlage in möglichst hoher zeitlicher Auflösung zur Abbildung von Ganglinien nach unterschiedlichen Entwässerungszuständen (Trockenwetterabfluss sowie nach Intensitäten und Häufigkeiten abgestufte Mischwasserabflüsse) und innerhalb einzelner Niederschlagsereignisse. Es werden Daten, sowohl aus dem Kanalnetz als auch aus dem Zulauf der Kläranlage sowie im Falle von Entlastungsereignissen aus den Entlastungsbauwerken aufgenommen.
2. Korrelation der Messdaten für die Abwasserparameter mit Referenzmessungen der Stoffparameter über Probennehmer. Untersuchung von Messdatendrift und Anpassung der Sondenpositionen gemäß einer Evaluierung der Einbauorte.
3. Aktualisierung eines hydrodynamischen Modells zur Entwicklung von Steuerungen. Entwicklung eines deterministischen Schmutzfrachtmodells auf Basis des hydrodynamischen Modells und automatisierte Kalibrierung mit den Daten der Online Messung. Ziel ist hierbei das Stoffstrommodell vom Kanal hinreichend genau abzubilden, um die Stofftransport- und Remobilisierungsprozesse im Kanal nachzubilden.
4. Entwicklung von volumenbasierten und frachtbasierten Steuerungsmöglichkeiten für das Kanalnetz zur Reduzierung der abgeschlagenen Frachten im Entlastungsfall und automatisierte Optimierung der Drosseleinstellungen.

Ergebnisse und Diskussion

Die Erprobung der Messtechnik im Mischsystem hat gezeigt, dass die Anordnung der Sonden wesentlich für eine zuverlässige Messung ist. Daher sollten Sonden anders als hier im Projekt in Zukunft nach den Empfehlungen platziert werden. Ein Einbau an Wehrschwellen zeigt sich dabei als unproblematisch. Insbesondere an Hubwehren und in Drosselleitungen kommt das Messprinzip schnell an seine Grenzen. Ebenfalls stellt der Einbauort auf der Sohle bei Sedimentationen sich als nicht geeignet dar.

Im Projekt konnte gezeigt werden, dass der Schmutzfrachtverlauf gut abgebildet werden kann. Das Messprinzip zeigte zudem im Dauerbetrieb eine geringe Anfälligkeit für Messdatendrift. Optimierungspotenzial besteht allerdings in der Messgenauigkeit. In Ex-situ Feldtests konnten zwar in Schmutzwasser Regressionen zwischen Sensordaten und Laboranalysen mit $R^2=0,976$ und $p<0,000$ nachgewiesen werden. Eine Bestätigung der Ergebnisse im Kanal war jedoch noch nicht möglich und steht noch aus.

Die volumenbasierten Steuerungen zeigen, dass durch einfache lokale und verteilte Steuerungen die Entlastungsmengen reduziert werden können. So können modelltechnische Reduzierungen der Entlastungsvolumina von 11 bis 51% in der Theorie erreicht werden. Die besten Ergebnisse konnten durch eine verteilte Steuerung mit einer Optimierung der Hubwehreinrichtungen erreicht werden. Insgesamt kann so die Anzahl der Entlastungen reduziert werden. Bei einem Vergleich der Regen zeigte sich, dass die größten Einsparungen für mäßige bis starke Regen erreichbar sind. Vor einer Implementierung sollten weitere Optimierungsschritte durchgeführt werden, welche durch die Rechenzeit des Modells limitiert waren. Lösungswege zur Reduzierung der Rechenzeit könnte eine Vereinfachung des Modells sein, eine Eingrenzung der Optimierungsparameter, deren Bereiche oder die Möglichkeit einer weiteren Parallelisierung von Simulationsläufen. Die volumenbasierte Steuerung stellt so eine gute Basis und Referenz für frachtbasierte Steuerungen dar.

Das entwickelte deterministische Wasserqualitätsmodell bietet keine ausreichende Genauigkeit (Median NSE = 0,00) zur Entwicklung von Steuerungen. Das Modell wurde allerdings verwendet, um eine Methodik zur Erfassung des Potenzials von lokalen frachtbasierten Steuerungen zu entwickeln. Die Potenzialanalyse ist noch für mehrere verschiedene Wasserqualitätsmodelle und unter Berücksichtigung von Volumensteuerungen ausstehend. Ebenfalls sollten die Empfehlungen verifiziert werden durch die genaue Simulation der lokalen Steuerungen.

Mit Hilfe der verfügbaren Sensordaten von den optimierten Einbaupositionen konnten einige implizite Frachtsteuerungen untersucht werden. Dazu wurden die Sensordaten genutzt um ein Verhalten des Systems zu verstehen und diese Informationen in einer Volumensteuerung zu nutzen, um beispielsweise den Zeitpunkt des Einstaus der Hubwehre zu optimieren. Zur frachtbasierten Steuerungsentwicklung sollte in Zukunft der Blick stärker auf messdatengetriebene Modelle gelegt werden. Hier sollte untersucht werden, wie ein Zusammenspiel aus messdatengetriebenen Frachtsteuerungen mit volumenbasierten Steuerungen in Eintracht gebracht werden kann, da die Abdeckung eines gesamten Systems mit Sonden unrealistisch ist. Somit wird das größte Potenzial für eine übertragbare Steuerung aus einer Synergie zwischen zentralen volumenbasierten und lokalen Frachtbasierten Konzepten gesehen.

Öffentlichkeitsarbeit und Präsentation

Beiträge:

- Frachtbasierte Kanalnetzbewirtschaftung zur Reduzierung der Gewässerbelastung, JAHRESBERICHT 2022/2023 Forschungsinstitut für Wasserwirtschaft und Klimazukunft an der RWTH Aachen (FiW) e. V., Seite 66-67
- Frachtbasierte Kanalnetzbewirtschaftung zur Reduzierung der Gewässerbelastung, acwa Newsletter, Ausgabe 27, März 2024, Seite 6-7
- Projekt „ENTfrachtEN“: Erfahrungen mit Ultraschallsensoren zur frachtbasierten Kanalnetzsteuerung in Köln-Rodenkirchen, Sebastian Kerger, Thorsten Schmitz, Frank Rüsing, Korrespondenz Abwasser (eingereicht)

Vorträge:

- Entwicklung einer frachtbasierten Echtzeitsteuerung in Köln-Rodenkirchen, Frank Rüsing, 21. Kölner Kanal und Kläranlagen Kolloquium, 12. und 13. Juni 2023, Köln
- Frachtbasierte Kanalnetzbewirtschaftung in Köln, Entwicklung einer frachtbasierten Echtzeit-Steuerung mit dem Ziel der Gewässerentlastung, Frank Rüsing & Sebastian Kerger, Workshop zur Energieeffizienz & Digitalisierung in der Wasserwirtschaft, Design Office Karlsruhe, 1. März 2023
- Investigating ultrasound online sensors to measure TSS for quality-based real time control of combined sewer systems, Sebastian Kerger, EJSW 2024 - 26th European Junior Scientists Workshop on Monitoring Urban Drainage Systems and Rivers, 30.05.2024, Saint Maurice en Valgaudemar (France)
- Pitch "ENTfrachtEN", Thorsten Schmitz und Sebastian Kerger, Expertenforum Kanalnetzsteuerung 2024, 04.07.2024, Freiburg

- Untersuchung von Online-Ultraschallsensoren zur Messung von AFS für die qualitätsbasierte Echtzeitkontrolle von Mischwasserkanalisationen, Sebastian Kerger, 22. Kölner Kanal und Kläranlagen Kolloquium, 17. September 2024, Köln
- „ENTfrachtEN“: Ziele und Stand der Umsetzung, Sebastian Kerger, DWA Gewässerschutzbeauftragten Tagung am 19./20. November 2024 in Kassel: Forschungsvorhaben
- Entwicklung eines integralen MSR-Konzeptes zur frachtbasierten Echtzeit-Steuerung der Abwasserableitung mit dem Ziel der Gewässerentlastung, Sebastian Kerger, RIWWER Projekttreffen 05.12.2024
- Entlastungsfrachten reduzieren durch frachtbasierte Kanalnetzsteuerung- Erfahrungen aus dem Projekt ENTfrachtEN, Thorsten Schmitz, Sebastian Kerger, Frank Rüsing, Kanalmanagement Wien, 24.04.2025
- ENTfrachtEN – Kanalnetzsteuerung neu gedacht, Frank Rüsing, IFWW-Mitgliederkolloquium 29.04.2025
- ENTfrachtEN – Chancen einer frachtbasierten Kanalnetzsteuerung zur Reduzierung der Schadstoffeinträge in die Gewässer, Aqua Urbanica 23.09.2025 (eingereicht)
- ENTfrachtEN – Frachtbasierte Steuerungskonzepte zur Reduzierung der Stoffeinträge in die Gewässer, Thorsten Schmitz, Sebastian Kerger, Frank Rüsing, NIVUS Wasserfachtag, Eppingen, 25.06.2025 (geplant)
- Towards the assessment of pollution-based real-time control potential of sewer systems, Sebastian Kerger, Thomas Wintgens, 13th Urban Drainage Modelling Conference, September 15.-19. 2025, Innsbruck (Österreich)
- Challenges in data collection for load-based real time control and the validation of pollution load models with acoustic multifrequency backscattering sensors - experiences from the ENTfrachten project, Thorsten Schmitz, Sebastian Kerger, Frank Rüsing, 13th Urban Drainage Modelling Conference, September 15.-19. 2025, Innsbruck (Österreich)

Workshops:

1. ENTfrachtEN Workshop, 20.10.2022 / StEB Köln / Ostmerheimer Strasse 555, 51109 Köln
2. ENTfrachtEN Workshop, 12./13.09.2023 / NIVUS GmbH / im Täle 2, 75031 Eppingen
3. ENTfrachtEN Workshop, 26./27.11.2024 / FiW / An der Ölmühle 4, 52074 Aachen

Repository:

https://git-ce.rwth-aachen.de/sebastiankerger/mikepluspy_scripts

Fazit

Die erprobte multifrequenzbasierte Ultraschallmesstechnik zeigte eine gute Abbildung der Schmutzfrachtcharakteristik in der Mischwasserkanalisation unter Beachtung der Einbauempfehlungen. Defizite in der Messgenauigkeit können durch weitere Untersuchungen hinsichtlich des Einflusses beispielsweise der Saisonalität, Spülstoßausprägung oder Verdünnung verbessert werden. Die Untersuchungen zeigten, dass die Messtechnik wartungsarm in der Kanalisation eingesetzt werden kann und somit Limitationen anderer Sonden überwindet. Eine bisher nicht durchgeführte Untersuchung ist die Fragestellung, inwiefern die Unsicherheiten in der Messtechnik bei parallelen Messungen einen Abgleich von Konzentrationen zur Steuerung erlauben.

Deterministische Modelle sind derzeit nicht in der Lage die Schmutzfrachtcharakteristik aller Niederschlagsereignisse abzubilden. Für eine schmutzfrachtbasierte Steuerung sollten daher datengetriebene Modelle angestrebt werden, für die die Sonden gute Daten liefern können. Das Potenzial konnte im Projekt beispielsweise durch implizite Steuerungen gezeigt werden. In Zukunft können diese bei Beachtung der Empfehlungen zum Sondereinbau entwickelt werden, wenn qualitativ hochwertige Daten generiert werden. Das größte Potenzial wird dabei bei einem Einsatz für eine lokale Steuerung gesehen, die mit einer zentralen volumenbasierten Steuerung gekoppelt wird.

Inhaltsverzeichnis

1	Zusammenfassung	1
2	Einleitung	2
3	Projektaktivitäten	3
3.1	Messprogramm	4
3.2	Modellaufbau	6
3.2.1	Hydraulische Kalibrierung	6
3.2.2	Schmutzfrachtmodellierung	7
3.3	Etablierung der Messungen im Realbetrieb	10
3.3.1	Sondenpositionen und -verfügbarkeit	10
3.3.2	Wartungsaufwand und Robustheit	12
3.3.3	Genauigkeit des Messsystems	13
3.3.4	Empfehlungen zum Sondereinsatz	17
3.3.5	Eignung der Sonden für den Einsatz in der Kanalnetzsteuerung	17
3.4	Entwicklung von Steuerungskonzepten	19
3.4.1	Volumenbasierte Steuerung	19
3.4.2	Frachtbasierte Steuerung	24
3.4.2.1	Datenauswertung	24
3.4.2.2	Steuerungskonzepte	26
3.4.2.3	Potenzialanalyse	30
3.5	Übertragbarkeit	31
3.6	Ausblick	32
4	Fazit	33
5	Literaturverzeichnis	35

Verzeichnis der Bilder

Abbildung 3.1:	Übersicht Einzugsgebiet Kläranlage Rodenkirchen und Einbauorte der NIVUS Sensoren.....	4
Abbildung 3.2:	Exemplarischer Einbau der Sonden (links: horizontal eingebaute PKM Sonde an der Entlastung SKU 0133, mitte: auf der Sohle eingebaute POA Sonde am RKB 0337, rechts: Katamaran in der Kläranlage) ©NIVUS	5
Abbildung 3.3:	Automatische Probennehmer (links) und Führung des Probenahmeschlauches über Leerrohre (rechts) ©StEB Köln.....	5
Abbildung 3.4:	Beispiel Kalibrierungsergebnis eines Niederschlages am HUB 0201 (SKU 0228).....	7
Abbildung 3.5:	Ergebnisse der Optimierung mit dem Modul ST für ein Regen links mit ausgeprägten first-flush und rechts mit einem flush später im Ereignis	9
Abbildung 3.6:	Wandschubspannung und Sedimentationsbewegungen im Kanal (Sonde auf der Sohle im RÜB 0901)	10
Abbildung 3.7:	Ganglinien der Sonden am Beispiel SKU 0133 Sohle über Messkampagne 1: oben, 1b: mitte und 2: unten.....	12
Abbildung 3.8:	Abweichung der Sensorkonzentrationen vom Ereignismittelwert für links: alle Einstauereignisse im SKU 0148 zwischen 08/24 und 02/25 (n=25), rechts: Niederschlagsereignisse am RUB 0901 zwischen 09/24 und 02/25 (n=43)	14
Abbildung 3.9:	Korrelation zwischen AFS_{eq} Sensordaten und Labordaten mit verschiedenen Farben für unterschiedliche Ereignisse. Oben links: Zulauf Kläranlage, oben rechts: Wehrschwelle am SKU 0148, unten: Kanalsohle am RUB0901	15
Abbildung 3.10:	Abgleich der Ergebnisse der PKM-Sonde und einer spectro::lyser UV-Vis Sonde an der Schwelle am SKU 0148	16
Abbildung 3.11:	Korrelation von Stickstoff und CSB mit AFS Konzentrationen aus dem Labor vom RUB 0901.....	18
Abbildung 3.12:	Einzugsgebiet mit Stauraumbauwerken in Maßstab des durchschnittlichen ungenutzten Volumens und Entlastungen im Maßstab der jährlichen Entlastungsmenge	21
Abbildung 3.13:	Prozentuale Verbesserungen gegenüber dem Status-Quo der Volumen-basierten Ansätze	22
Abbildung 3.14:	Verteilung des Entlastungsvolumen für verschiedene Volumen-basierte Ansätze.....	22
Abbildung 3.15:	Änderung des Entlastungsvolumens der einzelnen Ereignisse für verschiedene Regenintensitäten nach DWD (2023)	23
Abbildung 3.16:	Konzentrationen an den Entlastungsschwellen an den SKU 0133 und 0148. Links als Violinplot und rechts als Median der Differenz der Konzentrationen für 50 Entlastungsereignisse	25
Abbildung 3.17:	Spülungen des HUB 0301.....	25
Abbildung 3.18:	Regenereignis am HUB 0301 mit Spülstößen am Anfang und Ende	26

Abbildung 3.19: Entlastungsvolumen und Entlastungsfracht der 12 Optimierungsereignisse mit statischer Volumen- und Fracht-Optimierung	28
Abbildung 3.20: Rechnerische Entlastungsfrachten der volumenbasierten Steuerungen....	28
Abbildung 3.21: Auswirkungen des gezielten Rückhalts der ersten Abflusswelle.....	30

Verzeichnis der Tabellen

Tabelle 3.1: Kennzahlen zum Einzugsgebiet der Kläranlage Köln-Rodenkirchen	3
Tabelle 3.2: Ergebnisse der Niederschlagsabflusskalibrierung als Volumenabweichung	7
Tabelle 3.3: Ergebnisse der Schmutzfrachtmodellierung	8
Tabelle 3.4: Sondenverfügbarkeit während der Messkampagnen 1, 1b und 2.....	11
Tabelle 3.5: Laboranalyseverfahren	13
Tabelle 3.6: Vergleich der Drosselabflüsse der Volumenoptimierungen in l/s	20
Tabelle 3.7: Anzahl der vermiedenen und neuen Entlastungen	24
Tabelle 3.8: AFS-Konzentrationen der Entlastungsbauwerke gemäß Mischungsrechnung	27
Tabelle 3.9: Abfluss/Zufluss-Verhältnis der AFS-Fracht mit Steuerung am RKB 0337..	29
Tabelle 3.10: Theoretische lokale und globale Frachtreduktionspotenziale für eine lokale Frachtsteuerung im Vergleich zum Status-quo.....	31
Tabelle 3.11: Bewertung der Umweltqualitätsnormen und Änderung der Konzentrationen in Erft und Rhein anhand eines Beispielerignisses	32

Abkürzungsverzeichnis

Kürzel	Erläuterung	Einheit
AFS	Abfiltrierbare Stoffe	mg/l
AFS63	Abfiltrierbare Stoffe kleiner 63 µm	mg/l
PKM	Partikelkonzentrationsmessung	
E	Einwohner	
EW	Einwohnerwerte	
RRK	Regenrückhaltekanal	
SKU	Stauraumkanal mit untenliegender Entlastung	
RUE	Regenüberlauf	
RKB	Regenklärbecken	
RÜB	Regenüberlaufbecken	
RRB	Regenrückhaltebecken	
StEB	Stadtentwässerungsbetriebe	
CSB	Chemischer Sauerstoffbedarf	mg/l
DWD	Deutscher Wetterdienst	
ADWP	vorangegangene Trockenwettertage	d
MAPE	mittlerer absoluter prozentualer Fehler	
NSE	Nash–Sutcliffe model efficiency coefficient	
WQ-Modul	Wasserqualitätsmodul	
ST-Modul	Sedimentationsmodul	
TNb	total bound nitrogen (gesamt gebundener Stickstoff)	mg/l
UV-Vis	ultraviolettes und sichtbares Licht	
EQF	equal filling degree (Gleichmäßiger Füllgrad)	
RWP	Regenwasserpumpwerk	

1 Zusammenfassung

Das Forschungsprojekt ENTfrachtEN liefert wertvolle Erkenntnisse für die zukünftige Implementierung von frachtbasierten Steuerungssystemen von Mischwasserkanalisationen und stellt eine Grundlage für weiterführende Forschung sowie praktische Anwendungen bei Kanalnetzbetreibern dar. Ein zentraler Aspekt des Projekts war die Nutzung eines alternativen Messsystems zur Echtzeit-Erfassung von Schmutzfracht. Hierbei wurde das NivuParQ-Messsystem der Firma NIVUS mit einer akustisch arbeitenden Partikelkonzentrations-Sonde (PKM-Sonde) im Kanalsystem der Stadtentwässerungsbetriebe (StEB) Köln im Einzugsgebiet des Klärwerks Köln-Rodenkirchen getestet. Dieses Messsystem sollte aufgrund seiner physikalischen Messmethode eine geringere Wartungsanforderung aufweisen als herkömmliche optische Sensoren und gleichzeitig präzise Daten zur Schmutzfracht der abfiltrierbaren Stoffe (AFS) liefern. Die Untersuchungen zeigten, dass die Sensorplatzierung entscheidend für zuverlässige Messwerte ist. Es wurde nachgewiesen, dass das System den Schmutzfrachtverlauf gut abbildet, jedoch Verbesserungspotenzial bei der Messgenauigkeit, insbesondere bei Übergängen zwischen Schmutzwasser- und Mischwasserereignissen, besteht.

Parallel dazu wurde ein bestehendes hydrodynamisches Modell des Kanalnetzes in der Modellierungssoftware MIKE+ aktualisiert und für die Entwicklung und Bewertung verschiedener Steuerungsstrategien verwendet. Dabei wurden sowohl volumenbasierte als auch frachtbasierte Konzepte entwickelt und miteinander verglichen. Die Ergebnisse zeigten, dass volumenbasierte Steuerungen eine deutliche Reduzierung von Emissionen in Gewässer ermöglichen, insbesondere bei schwachen bis moderaten Regenereignissen. Zentrale frachtbasierte Steuerungsansätze sind aktuell noch schwierig umzusetzen. Mit Hilfe von impliziten lokalen Konzepten konnte das Potenzial einer kombinierten Steuerung aus zentralen volumenbasierten und lokalen frachtbasierten Konzepten verdeutlicht werden. Diese hybride Herangehensweise könnte langfristig die beste Übertragbarkeit und Effizienz in der Praxis bieten. Gleichzeitig wurde herausgestellt, dass weitere Forschung notwendig ist, um die Unsicherheiten in der Messtechnik zu reduzieren und die Modellierung der Steuerungen weiter zu verbessern.

Die entwickelte Methodik zur Potenzialanalyse und die gewonnenen Erkenntnisse zur Messtechnik können dazu beitragen, die Steuerung von Mischwasserkanalisationen in der Praxis weiter zu optimieren und Umweltbelastungen nachhaltig zu reduzieren.

Alle im Projekt aufgebauten Skripte zur Modellkalibrierung und zur Entwicklung von Steuerungsstrategien in MIKE+ sind unter https://git-ce.rwth-aachen.de/sebastiankerger/mikepluspy_scripts verfügbar.

2 Einleitung

Angesichts des fortschreitenden Klimawandels und der damit verbundenen Veränderungen im Niederschlags- und Abflussverhalten sowie demografischer Entwicklungen gewinnt der 'Kombinierte Ansatz' der Wasserrahmenrichtlinie zunehmend an Bedeutung. Durch eine gezielte Abflusssteuerung in Kanalnetzen lassen sich diese Herausforderungen besser bewältigen, indem sowohl die Belastung der Gewässer verringert als auch der Betrieb des Kanalnetzes effizienter gestaltet wird.

Bisherige Vorhaben basieren bisher auf Volumensteuerung, was insbesondere auf fehlende Messsysteme zurückzuführen ist (Campisano et al. 2013). Umsetzungen für volumenbasierte Steuerungen sind in Deutschland immer noch selten. Erfolgreiche Umsetzungsbeispiele sind Dresden (Männig 2015) oder Rheine (Eggert et al. 2014). Etablierte schmutzfrachtbasierte Steuerungen sind selten. Das bekannteste Beispiel ist die Steuerung in Wuppertal, die sich allerdings primär im Trennsystem befindet (Raith et al. 2017). Die meisten Studien zu schmutzfrachtbasierten Steuerungen basieren nur auf Modelldaten und nutzen keine echten Schmutzfrachtdaten oder 24 h-Mischproben im Kläranlagenzulauf (Cembellín et al. 2020; Beier et al. 2012; Mahmoodian et al. 2017; Risholt et al. 2002; Fuchs et al. 2006). Dies ist aber meistens unzureichend, da dies die tatsächlichen Frachtverläufe nicht abbilden kann oder besondere Herausforderungen vorliegen, die schlecht abgebildet werden können. Folglich ist die Steuerungsentwicklung aus diesen Modellen kritisch zu hinterfragen (Bachmann et al. 2016).

In den meisten Steuerungen werden Spektrometersonden verwendet (Raith et al. 2017; Bachmann-Machnik 2020; Graner et al. 2012; Hochedlinger et al. 2006). Die Anwendung dieser Sensoren haben sich in der Praxis im Mischsystem nicht durchsetzen können, da der Wartungsaufwand im Betrieb zu hoch ist (Bachmann-Machnik 2020). Es wurden auch andere Sonden wie Trübungssensoren (Ly et al. 2019), Ionen selektive Sensoren (Graner et al. 2012) oder Leitfähigkeitssensoren (Schilperoort et al. 2006) genutzt. Alle diese Sensoren teilen dieselbe Problematik mit einem hohen Wartungsaufwand oder einer zu geringen Korrelation zu Verschmutzungen.

Das Ziel im Projekt ENTfrachtEN war es daher ein anderes Messsystem zur Echtzeit-Steuerung von Mischwasserkanalisationen zu verwenden, welches eine realitätsnahe Lösung ermöglichen soll. Dafür wurde das NivuParQ Messsystem der Firma NIVUS eingesetzt. Die im Messsystem verwendete Partikelkonzentrations-Sonde (PKM-Sonde) arbeitet nicht im optischen Wellenlängenbereich, sondern im akustischen. Durch die Nutzung von Ultraschallwellen sollen so einige Vorteile genutzt und im Projekt im Kontext der Kanalnetzsteuerung überprüft werden. Akustische Wellen werden nur wenig durch Beschichtungen wie Biofilme gedämpft, wodurch kein signifikanter Drift der Messdaten erwartet wird. Das Resultat ist ein geringer Wartungsaufwand. Der Wartungsaufwand soll im Projekt zusammen mit der Robustheit des Sensors gegenüber den Bedingungen in der

Mischwasserkanalisation überprüft werden. Zusätzlich kann die Sonde eine Abschätzung der Größenverteilung durch die Nutzung verschiedener Frequenzen ermöglichen. Dahingehend soll im Projekt die Genauigkeit der Sonde gegenüber den abfiltrierbaren Stoffen (AFS) überprüft werden. Das Ziel ist es so eine praxisnahe und übertragbare Lösung für die online-Frachtdatenerfassung im Kanal zu finden, welche es ermöglicht bereits entwickelte Steuerungen mit neuer Messtechnik in die Praxis zu bringen.

Parallel wird im Projekt ein bestehendes MIKE+ (DHI 2023) Modell des Kanalnetzes aktualisiert und zur Steuerungsentwicklung verwendet. Dazu werden zunächst volumenbasierte Konzepte entwickelt. Anschließend werden darauf aufbauend frachtbasierte Konzepte entwickelt und miteinander verglichen. Ziel soll es sein so die Gesamtemissionen des Verbundes Kläranlage und Kanalisation ins Gewässer zu verringern. Dabei wird die Fokussierung auf mittlere bis starke Regen gelegt. Starkregen brauchen teilweise andere Steuerungen, da dann häufig der Überflutungsschutz in den Fokus gerät. Daher werden Starkregen in der Steuerungsentwicklung zwar mitbetrachtet, aber nicht spezifisch optimiert. Dies geschieht parallel in anderen Projekten der StEB Köln. Weiterhin wird im Projekt ein Fokus auf simple Steuerungskonzepte gelegt, welche eine einfache Übertragbarkeit ermöglichen. Ausgeschlossen sind dabei andere Optimierungskonzepte wie bauliche Maßnahmen zur Anpassung von Wehrhöhen.

3 Projektaktivitäten

Im Projekt wird das Einzugsgebiet der Kläranlage Köln-Rodenkirchen betrachtet. Das Kanalnetz wurde auf der Grundlage der Anzahl der Aktoren und der Größe des Netzes ausgewählt, um ein übertragbares Netz zu untersuchen. Kennzahlen zum Einzugsgebiet können Tabelle 3.1 entnommen werden.

Tabelle 3.1: Kennzahlen zum Einzugsgebiet der Kläranlage Köln-Rodenkirchen

Parameter [Einheit]	Wert
Kanalisiertes Einzugsgebiet [ha]	1.376,77
Davon im Mischverfahren entwässert [ha]	1.248,88
Befestigungsgrad (Mischsystem) [%]	42,5
Einwohner [E]	61.088
Mittlere Jahresniederschlagshöhe [mm]	734
Bemessungszufluss Kläranlage [l/s]	580
Entlastungsvolumen (ohne Trennsystem) [m³/a]	269.727
Ausbaugrad Kläranlage [EW]	88.000
Anzahl Entlastungsbauwerke	12
Anzahl Schächte	5.106
Anzahl Kanäle	5.104

3.1 Messprogramm

Für die Identifizierung der Einbauorte der Sonden wurde ein auf Expertenwissen basierender Ansatz in Kombination mit einem explorativen Ansatz verwendet. Für das System wurde eine Vorauswahl der relevantesten Punkte durchgeführt. Dafür wurden aus dem vorhandenen hydrodynamischen Modell (MIKE Urban) einem Schmutzfrachtmodell (KOSMO (SCHMITT 1994)) und auf Basis von Messwerten eine Prioritätenliste der Entlastungsbauwerke erstellt. Die Listen setzen sich zusammen aus: Anzahl der Entlastungen, dem Entlastungsvolumen, der Entlastungsfracht und den vorhandenen Steuerungsmöglichkeiten. Nach diesem Ansatz wurden sechs Segmente für die Installation von Sensoren ermittelt. An diesen Segmenten wurden anschließend bei einer Bauwerksbegehung die genauen Einbauorte auf Grund örtlicher Restriktionen (Elektrizität, Möglichkeit der Probenahme, etc.) festgelegt. Der Einbau der Sensorik erfolgte zwischen Mai und Juni 2022. Insgesamt wurden 8 NIVUS PKM Sensoren und 6 NIVUS POA Sensoren zur parallelen Durchflussmessung verbaut. Die Datenübertragung wurde über LTE-Mobilfunk-Modems in das NIVUS Webportal vorgenommen. Aus Gründen der Cybersicherheit wurde auf einen parallelen Anschluss an die Fernübertragung der StEB Köln verzichtet. Eine Übersicht der Einbauorte ist in Abbildung 3.1 gegeben. Eine Besonderheit des Netzes ist, dass der Ablauf des RRK 0301 und des SKU 0228 über Hubwehre gesteuert wird.

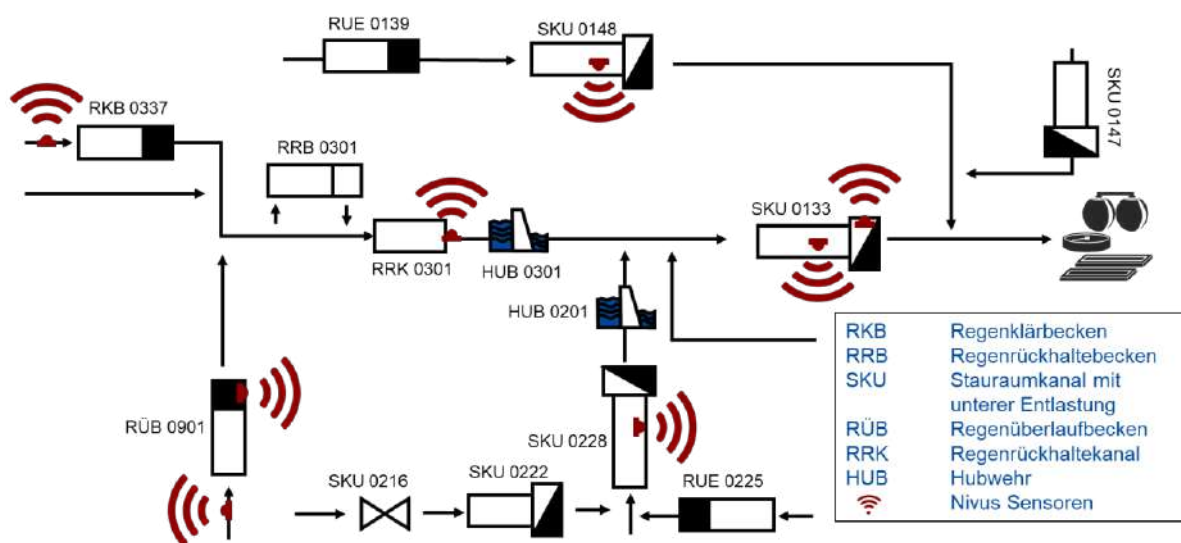


Abbildung 3.1: Übersicht Einzugsgebiet Kläranlage Rodenkirchen und Einbauorte der NIVUS Sensoren

Der Einbauort der Sonden wurde primär mittig auf der Kanalsohle gewählt. Zwei Sonden wurden zusätzlich an Entlastungen montiert. Dies sind die Sonden, die nicht zusammen mit einer POA Sonde für den Durchfluss verbaut wurden. Dies betrifft das RÜB 0901, in dessen Entlastungskanal eine Sonde verbaut wurde, und das SKU 0133, in dem eine Sonde horizontal an der Entlastungsschwelle verbaut wurde. An den Hubwehren wurden die Sonden wenige Meter vor diesen eingebaut. Trockenwettermessungen waren auf Grund der Mindesteinstauhöhe der PKM Sonde von 15 cm, welche an den meisten Messpunkten im

System nicht gegeben ist, nicht möglich. In Abbildung 3.2 sind beispielhaft drei Einbauorte der Sonden dargestellt. Eine zusätzliche PKM-Sonde wurde ab Januar 2024 hinter dem Rechen im Klärwerk Köln-Rodenkirchen eingebaut. Hier wurde eine Sonde am Boden eines Katamarans installiert, um auch Messungen im Trockenwetter durchführen zu können.



Abbildung 3.2: Exemplarischer Einbau der Sonden (links: horizontal eingebaute PKM Sonde an der Entlastung SKU 0133, mitte: auf der Sohle eingebaute POA Sonde am RKB 0337, rechts: Katamaran in der Kläranlage) ©NIVUS

Zur Verifizierung der eingesetzten Sonden wurden ebenfalls automatische Probenehmer eingesetzt. Dazu wurden drei verschiedene Stellen im System beprobt: SKU 0148, RRB 0301 und RÜB 0901. Zur Probenahme wurden im ersten Schritt die Ori Basic Ex 1 eingesetzt. Diese erwiesen sich aufgrund der Steuerungsmöglichkeiten für dieses Projekt als nicht geeignet. Als Folge­lösung wurde der Ori Nemo 1 Probenehmer verwendet, hiermit wurden deutlich bessere Ergebnisse erzielt. Die Probenahmeschläuche mit einem Durchmesser von 6 mm wurden über Leerrohre (siehe Abbildung 3.3) möglichst nah an die Sensorik geführt. Der Trigger wurde über eine Ex-Geschützte Verbindung mit den NIVUS Messsystem eingestellt.



Abbildung 3.3: Automatische Probenehmer (links) und Führung des Probenahmeschlauches über Leerrohre (rechts) ©StEB Köln

Die Analytik der Proben erfolgte im Abwasserlabor der StEB Köln. Der Umfang der Parameter variierte über den Beprobungszeitraum. Der Fokus lag auf der Beprobung von AFS und

AFS63. Es wurden zusätzliche Analysen für chemischen Sauerstoffbedarf (CSB) und Ammonium (NH_4) durchgeführt, um eine Korrelation zu weiteren relevanten Schadstofffrachten zu ermitteln. Die ersten Tests mit den Probenehmern wurden ab November 2022 durchgeführt. Insgesamt sollten so Probenahmen sowohl auf der Kanalsole als auch an Entlastungen durchgeführt werden. Weitere Analysen an anderen Messstellen waren zu Beginn des Projektes geplant, konnten aber auf Grund von Steuerungsproblemen bei den Probenehmern, rechtlichen Fragestellungen bei der Absicherung von Probenahmestellen im öffentlichen Straßenraum, Umbaumaßnahmen in der Kanalisation sowie technischen Ausfällen der PKM Sonden und Ausfällen der LTE-Mobilfunk-Modems nicht realisiert werden.

3.2 Modellaufbau

Das vorhandene Kanalnetzmodell des Kanalnetzes lag in der Software MIKE Urban 2019 (DHI 2021) vor und wurde auf die Software MIKE+ durch die DHI Österreich GmbH migriert. Zunächst musste das Modell aktualisiert werden und systembedingte Migrationsfehler behoben werden. Auf die Modellierung der hochwasserrelevanten Bauwerke wurde verzichtet und Hochwasserfälle wurden nicht in die Modellierung aufgenommen.

Während der Überprüfung wurde festgestellt, dass die genutzten Berechnungen des Überlaufes über das Hubwehr am RRK 0301 - im Folgenden HUB 0301 genannt – von den POA-Sonden stark abweichen. Daher wurden für vier Wochen Überprüfungsmessungen im Ablauf der Hubwehre durchgeführt, welche die Messungen der POA-Sonden bestätigten. Alle vorhandenen Steuerungen der Hubwehre im Status-quo wurden unter Berücksichtigung der Abweichungen angepasst.

3.2.1 Hydraulische Kalibrierung

Zunächst wurde eine Kalibrierung des Trockenwetterabflusses durchgeführt. Dafür wurden vorhandene Trockenwettertageauswertungen der StEB Köln verwendet. Mit Hilfe der neuen Sondendaten durch die POA-Sensoren wurden Messdaten aus dem zweiten Halbjahr 2022 zur Kalibrierung verwendet. Zusätzlich wurden Höhenstandsdaten der Hubwehre und wenn vorhanden MID-Daten von Pumpen verwendet. Als Gütekriterium wurde die Abwassermenge eines durchschnittlichen Trockenwettertages verwendet. Die Abweichungen lagen an den sieben untersuchten Stellen bei im Mittel $-2,2 \pm 6,6$ % bzw. $-0,12 \pm 1,62$ l/s.

Für die Kalibrierung des Niederschlagsabflusses wurden Daten von drei Regenschreibern im Einzugsgebiet genutzt. Zur Niederschlagserkennung wurde mit einer Mindestzeit zwischen den Ereignissen von acht Stunden und einer Mindestintensität von 0,5 mm/h oder 0,1 mm pro 5 min gerechnet. Für die Kalibrierung wurden für den Zeitraum 01.07.2022 bis 31.12.2022 Dauerniederschläge genutzt mit maximaler Abweichung von 15 % zwischen Stationen und Mindestniederschlagshöhen von 5 mm. Daraus blieben neun mögliche

Niederschlagsereignisse zur Kalibrierung und zur Verifizierung übrig. Es wurden davon zufällig drei Ereignisse für Verifizierung und sechs für die Kalibrierung ausgewählt.

Die Kalibrierung im System erfolgte separat für jedes Einzugsgebiet mit einer vorhandenen Messung. Dazu wurde das „Time-Area“ Oberflächenabflussmodell verwendet. Für die notwendigen Parameter wurden Schätzungen des Anfangsverlust über kleine Regenereignisse bestimmt und eine Wasserbilanz zur Abschätzung des Reduktionsfaktors angelehnt an Sedki et al. (2023) aufgestellt. Danach erfolgte eine iterative händische Kalibrierung. Als Gütemaß wurde das summierte Abflussvolumen und eine Ganglinienbetrachtung nach Augenmaß verwendet. Zur Wichtung der Niederschläge wurde eine Bewertungsmatrix angelehnt an Sitzmann et al. (2023) hinzugezogen. Entlastungs- und Abflussmengen im Kanal wurden dabei separat betrachtet. Auf Grund der höheren Genauigkeit wurde die Kalibrierung primär anhand der Messungen im Kanal durchgeführt. Das Ergebnis der Niederschlagsabflusskalibrierung über die sechs Bauwerke sind in Tabelle 3.2 dargestellt.

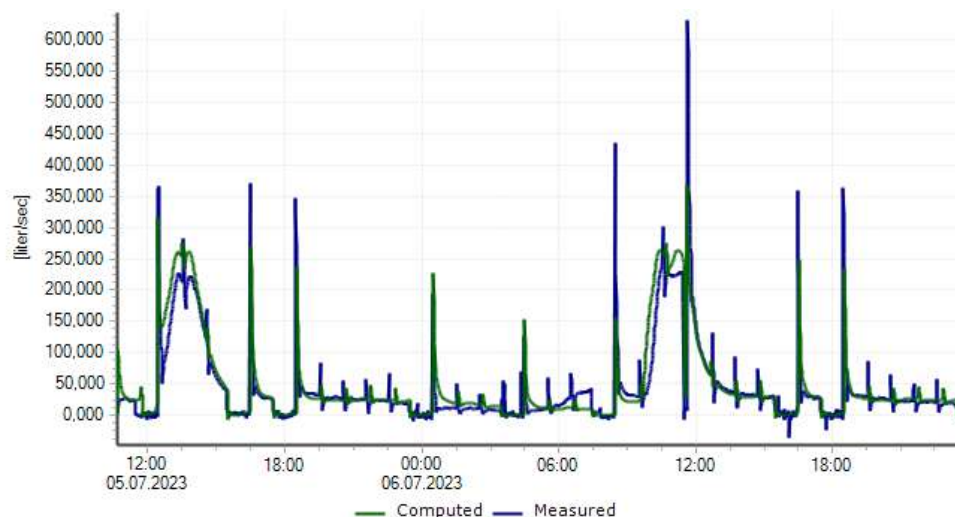


Abbildung 3.4: Beispiel Kalibrierungsergebnis eines Niederschlages am HUB 0201 (SKU 0228)

Tabelle 3.2: Ergebnisse der Niederschlagsabflusskalibrierung als Volumenabweichung

	Kanalmessungen	Entlastungen
Alle Niederschlagsereignisse	0,1±7,9%	-34,8±42,2%
Verifizierungsniederschläge	0,2±5,7%	10±0,0%

3.2.2 Schmutzfrachtmodellierung

Für die Schmutzfrachtmodellierung wurde ebenfalls die Software MIKE+ verwendet. Dafür wurde als repräsentatives Teileinzugsgebiet das Einzugsgebiet des RÜB 0901 verwendet. Die Modellierung wurde am Ende des Projektes mit den neuen Sensorpositionen in Messkampagne 2 wiederholt. Dafür stand der Zeitraum 13.09.2025 bis 31.12.2025 zur Verfügung (46 Regenereignisse, nur leichte und mäßige Regen gemäß Definition nach DWD (2023)). Für die Kalibrierung wurden neun Ereignisse ausgesucht mit dem Ziel möglichst

unterschiedliche vorangegangene Trockenwettertage (ADWP), Regenintensitäten nach DWD und Verschmutzungsdynamiken mit aufzunehmen. Die Daten der PKM-Sonde wurden aufbereitet mit Tests nach Clemens-Meyer et al. (2021). Daten die als ungeeignet bewertet wurden, wurden entfernt und über Vorwärtsbefüllung imputiert. Hier ergaben Tests, dass es zu einem mittleren absoluten prozentualen Fehler (MAPE) $< 5\%$ kommt. Trotzdem kam es weiterhin zu vereinzelt starken Spitzen in den Messdaten. Um den Einfluss von einzelnen höheren Werten in der Kalibrierung zu mindern, wurden die Daten für die Modellkalibrierung im nächsten Schritt durch einen Gaußscher Filter geglättet. Als letzter Schritt wurde cross-correlation als Methode verwendet, um die zeitliche Abweichung des rein hydrodynamischen Modells von den Messdaten aus der Kalibrierung herauszurechnen. Als Simulationszeitraum wurden die kompletten Regenereignisse bis zum Anfang der Trockenwetterperiode vor dem vorherigen Niederschlag mit aufgenommen, um einen Schmutzfrachtaufbau zu ermöglichen.

Als Optimierungsalgorithmus wurde die Bayesian Optimierung ausgewählt. Der Suchbereich wurde über eine Sensitivitätsanalyse eingeschränkt. Auf Grund der langen Rechenzeiten wurde dieser Algorithmus z.B. evolutionären Algorithmen vorgezogen. Zudem wurden in einem Benchmarking für die Optimierung von drei Regenereignissen mit fünf Algorithmen die besten Ergebnisse mit der Bayesian Optimierung erzielt. Für die Auswertung wurden nur die Regenereignisse ausgewählt, wenn die PKM-Sonde mit 15 cm überstaut ist. Zur Bewertung der Optimierung wurde der negierte begrenzte NSE (Mathevet et al. 2006) genutzt.

Als Schmutzfrachtparameter wurde AFS als konservativer Parameter ohne Abbau gewählt. Der Trockenwetterverlauf wurde auf Basis von Messwerten vom SKU 0133 hinterlegt. Anschließend wurden Optimierungen mit dem Wasserqualitätsmodul (WQ-Modul) und dem Sedimentationsmodul (ST-Modul) in MIKE+ durchgeführt. Dafür wurde jeweils Parametergrenzwerte durch eine Sensitivitätsanalyse für alle wesentlichen Eingangsparameter bestimmt. Dies umfasst sechs Parameter für das WQ-Modul und neun Parameter für das ST-Modul. Die Ergebnisse sind in Tabelle 3.3 dargestellt.

Tabelle 3.3: Ergebnisse der Schmutzfrachtmodellierung

	Median NSE (Optimierung über 9 Events)	Maximal NSE (Optimierung über 9 Events)	Maximal NSE für Einzelevent Optimierung
WQ-Modul	-0,21	0,19	0,20
ST-Modul	0,00	0,57	0,63

Die Ergebnisse zeigen für beide Module unbefriedigende Ergebnisse für eine Optimierung über alle Events. Für einzelne Ereignisse können bessere Ergebnisse erzielt werden. Bei der Analyse der einzelnen Ereignisse ist festzustellen, dass Ereignisse mit eindeutigem first-flush am besten abgebildet werden. Probleme hat das Modell bei ausgeprägtem last-flush und bei Events mit gleichmäßigen Frachtverhalten. Ebenfalls werden Spülstöße bei ausgeprägten zweiten Spülstößen im selben Ereignis nicht gut abgebildet. Hier liegen oft weiterhin trotz der genutzten zeitlichen Verschiebung zeitliche Unterschiede vor, weshalb das Modell die Spitzen

gegen einen minimalen Wert kalibriert, da in diesem Fall der NSE insgesamt besser wird. Weiterhin ist festzustellen, dass die Sondendaten höhere Spitzen zeigen und einen schnelleren Abfall der Konzentration nach Spülstoßen. Beides kann vom Modell nicht dargestellt werden. Diese Beobachtungen können anhand zweier Ergebnisse des Moduls ST in Abbildung 3.5 gezeigt werden. Im linken Bild ist ein ausgeprägter first-flush zu sehen, der gut abgebildet werden kann. Im rechten Ereignis liegt der first-flush erst später im Ereignis vor und dieser kann nicht gut abgebildet werden.

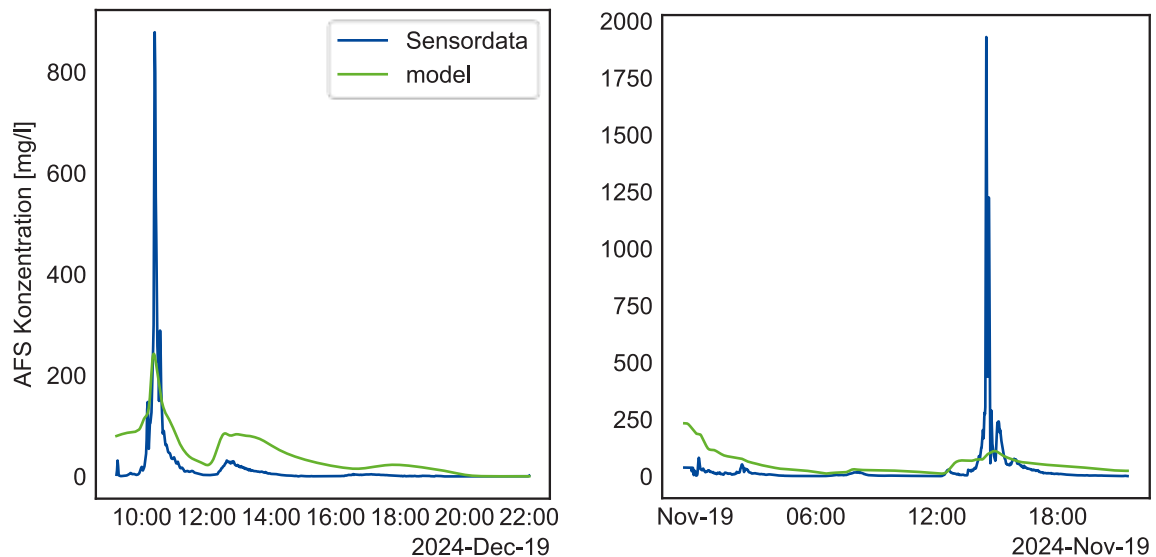


Abbildung 3.5: Ergebnisse der Optimierung mit dem Modul ST für ein Regen links mit ausgeprägten first-flush und rechts mit einem flush später im Ereignis

Die hier erzielten Ergebnisse spiegeln die Ergebnisse von beispielsweise Al Ali et al. (2016) wider, dass die Simulationen nur für einzelne Ereignisse gut funktionieren und nicht für alle auftretenden Ereignisse. Für alle weiteren Ereignisse ist das Modell nicht gut geeignet. In der Literatur werden häufig nur einzelne Straßen modelliert, weshalb große Unsicherheiten in der Modellierung vorliegen. Für diese Modellierung bestand daher die Hypothese, dass sich kleinräumige Unsicherheiten ausgleichen und die Variabilität der Schmutzstoffeinträge bei größeren Einzugsgebieten geglättet wird. Diese Hypothese wird auch von Sage et al. (2015) aufgestellt. Diese Hypothese konnte hier nicht bestätigt werden. Insgesamt ist das Modell somit nicht geeignet Steuerungen für alle relevanten Regenereignisse zu entwickeln. Allerdings können insbesondere first-flush Ereignisse gut abgebildet werden und für diese können auch Strategien im Modell entwickelt werden. So kann beispielsweise die Beschickung von Becken im Nebenschluss optimiert werden. Für eine Steuerungsentwicklung für alle möglichen Regen sind aktuell datenbasierte Ansätze notwendig.

3.3 Etablierung der Messungen im Realbetrieb

Für die Etablierung der Messungen im Realbetrieb wurden verschiedenen Sondenpositionen evaluiert, die Rohdaten der Sensorik ausgewertet und es erfolgte ein Vergleich zu Labormessungen.

3.3.1 Sondenpositionen und -verfügbarkeit

Beim Einbau der Sonden auf der Sohle wurde festgestellt, dass es zu Ausfällen in der Messtechnik kommt. Dies passiert sowohl im Trockenwetter als auch im Regenwetter. Im untersuchten Netz sind die Trockenwetterstände an vier von sieben Messstellen zu gering, um diese zu messen. Zusätzlich und insbesondere vor den Hubwehren, wurden regelmäßige Messwerte von null beobachtet. Dazu ist ein beispielhafter Niederschlag in Abbildung 3.6 dargestellt.

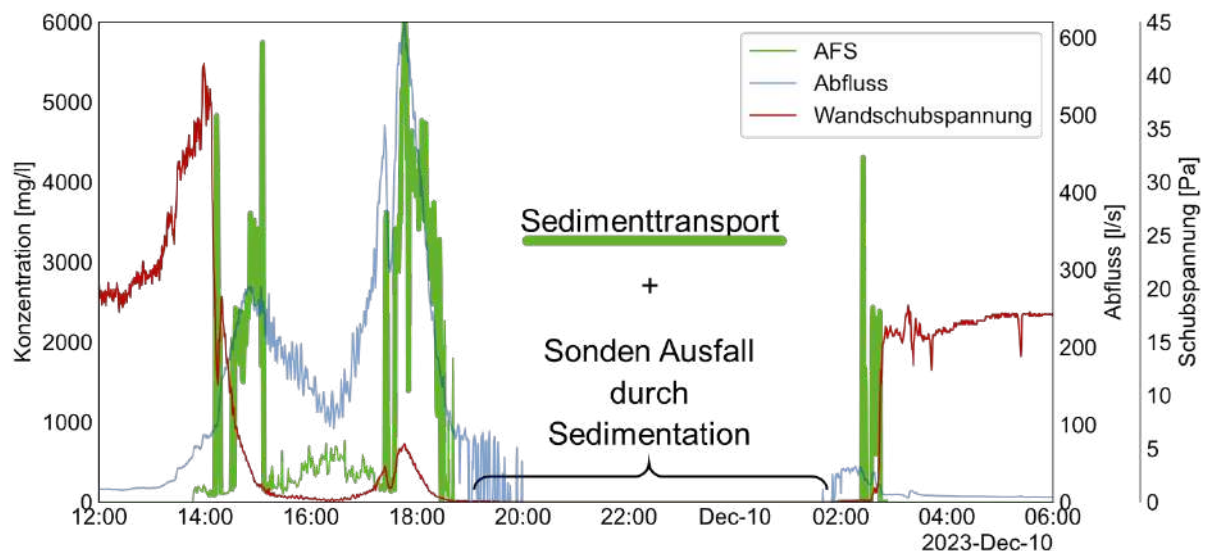


Abbildung 3.6: Wandschubspannung und Sedimentationsbewegungen im Kanal (Sonde auf der Sohle im RÜB 0901)

Erklärt werden kann dieser Zusammenhang durch Sedimentationen im Kanal. Kommt es zu einer starken Abnahme oder Zunahme der Wandschubspannung, sind Konzentrationsspitzen zu sehen. Zu diesen Zeiten kommt es zu Sedimentation oder Sedimentbewegungen etwas oberhalb der Sonde, wodurch es zu sehr hohen Rückstrahlungen kommt und somit zu einer Überschätzung der Konzentration. Liegt genug Sediment vor und die Schubspannung ist gering genug, versandet die Sonde und der Messwert fällt auf null. In diesem Fall ist die Dämpfung des Signals so groß, dass eine Auswertung der Rückstreuung nicht möglich ist. Dadurch kann kein Konzentrationsmesswert ausgegeben werden.

Dieses Phänomen tritt insbesondere an den Hubwehren häufig auf, weshalb ein Einbau im Zulauf der Hubwehre deutlich komplexer ist. Das Problem kann durch eine Anhebung der Sonde in die Schräge des Rohres gelöst werden. Die Sonden wurden so an allen Stellen im Sohlverbau angehoben. Dabei wurden Schritte von ~ 5 und ~ 10 cm Höhe genutzt. Die

Schritte wurden dabei an örtlichen Gegebenheiten angepasst und bei viel Schlammauftreten höher gesetzt und bei kleinen Querschnitten eher niedriger gehalten. Als Gütemaß kann hier die Sondenverfügbarkeit dienen. Damit ist die Verfügbarkeit von Messwerten in % dargestellt, wenn der Höhenstand eine Messung zulassen sollte. Die Sondenverfügbarkeit ist für die Messkampagnen zusammen mit den Positionen der Sonden in Tabelle 3.4 dargestellt. Messkampagne 1, ist der ursprüngliche Einbau, 1b ein vorsorglicher Umbau und 2 der letzte primäre Umbau, in dem alle Sonden angehoben wurden. Dabei zeigt sich, dass die Verfügbarkeit über den Umbau bei den Meisten Sonden gesteigert werden kann. Zudem ist zu sehen, dass die Probleme an den Entlastungen deutlich geringer sind, ein Einbau auf der Sohle eines Entlastungskanals ist hingegen schwierig, auf Grund von Lufteintrag und der notwendigen Mindesteinstauhöhe. Auch bleibt bei einem Umbau an den Hubwehren die Verfügbarkeit gering und sinkt sogar mit der Einbauhöhe. Folglich kann von einem Einbau direkt vor Hubwehren abgeraten werden. Zudem liefert die Sonde am RKB 0337 die geringsten Verfügbarkeiten. Dies kann auf die Positionierung in der Drossel (DN 800) hinter dem RKB und vor einem Pumpwerk zurückgeführt werden. In dieser Leitung kann auch nach jedem Regenereignis eine hohe Schlammschicht aufgefunden werden.

Tabelle 3.4: Sondenverfügbarkeit während der Messkampagnen 1, 1b und 2

Sonde	Position			Sondenverfügbarkeit [%]		
	1	1b	2	1	1b	2
RKB 0337	Sohle	-	5 cm	34,21	-	32,76
RRB 0301 (Hubwehr)	Sohle	Sohle, 5m vor Wehr	45 m hinter Wehr	78,99	74,94	98,76
RUB 0901 Zulauf	Sohle	5 cm	10 cm	75,48	82,23	81,28
RUB 0901 Entlastung	Sohle	-	-	12,06	-	-
SKU 0133 Entlastung	Horizontal an Schwelle			92,24		
SKU 0133 Zulauf	Sohle	5,5 cm	13 cm	72,47	98,99	98,82
SKU 0148	Sohle	-	Ausbau	89,16	-	-
SKU 0148 Entlastung	-	-	Horizontal	-	-	81,7
SKU 0228 (Hubwehr)	Sohle	-	10 cm	75,95	-	75,79

Die geringe Verfügbarkeit an der Entlastung SKU 0148 und SKU 0133 kann über die Berechnung erklärt werden. Am SKU 0133 wurde eine feste Einstauhöhe eingestellt, damit die Sonden auch bei weniger als 15 cm Überstau misst, dies führt allerdings zu Messfehlern, wenn die Sonde nur leicht im Wasser eingetaucht ist. Zusätzlich wurde am SKU 0148 eine automatisierte Anpassung des Höhenstands ausprobiert, wodurch im Nachhinein eine genaue Angabe der Verfügbarkeit nicht möglich ist. In Zukunft sollte daher als Mesttrigger an der Schwelle mit einer konstant notwendigen Überstauhöhe der Sonde gearbeitet werden. Die Einbauhöhe der Sonde sollte dementsprechend unterhalb der Schwelle angepasst werden.

Um die Unterschiede zu betrachten, können die Ganglinien der Sonde auf der Sohle im SKU 0133 zwischen den drei Messkampagnen betrachtet werden. Diese sind in Abbildung 3.7 dargestellt. Es ist deutlich zu sehen, dass die Messausfälle, während erhöhtem Abfluss abnehmen und sehr hohe Spitzen (Konzentration > 1.000 mg/l) ausbleiben.

Mit der Sonde auf dem Katamaran hinter dem Rechen im Zulauf der Kläranlage konnten keine stabilen Messwerte erzeugt werden. Hier kommt es durch die Rechenbewegung, Einleitung

von Sandwaschwasser und Rechenwaschwasser zu ständigen Spülstößen im Abwasserstrom, welche in den Daten messbar sind. Durch den zusätzlichen regelmäßigen Eintrag von Luftblasen durch die genannten Aggregate, sind die Daten allerdings nicht brauchbar. Hier ist darauf zu achten, dass eine ausreichende Beruhigungsstrecke vor der Sonde eingerichtet wird.

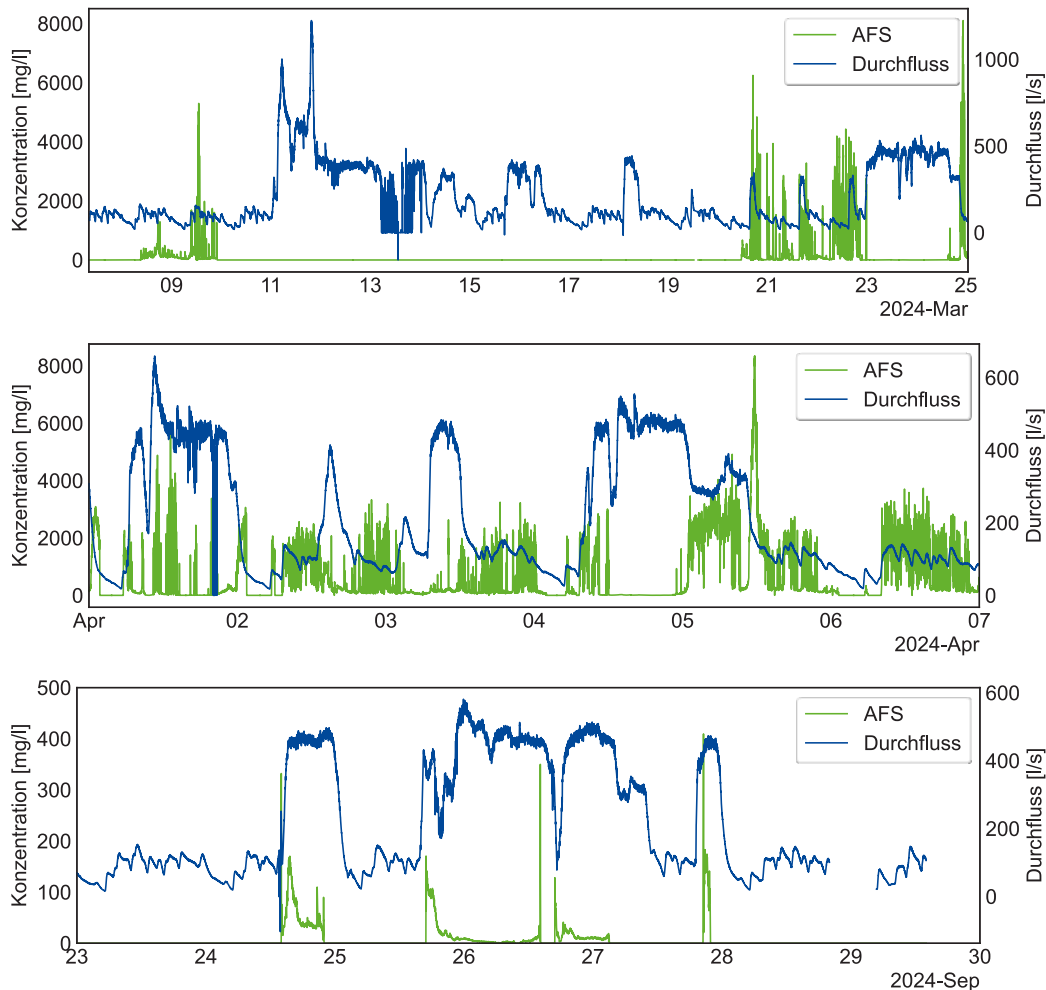


Abbildung 3.7: Ganglinien der Sonden am Beispiel SKU 0133 Sohle über Messkampagne 1: oben, 1b: mitte und 2: unten

3.3.2 Wartungsaufwand und Robustheit

Der Wartungsaufwand der Sonde kann bei richtigem Einbau insgesamt als gering angegeben werden. Der Drift wurde in der Hintergrundkonzentration der Daten (Bereich 0-10 mg/l) überprüft. Dafür wurde zur Überprüfung des Einflusses eines Biofilmes ein linearer Trend in die Daten gefittet. Insgesamt kann so ein leichter linearer Trend von $-1,208e-05$ mg/l ($p < 0,000$, $R^2 = 0,016$) in der ersten Messkampagne, eine Zunahme nach einer Reinigung von $1,8559e-04$ mg/l ($p < 0,000$, $R^2 = 0,072$) und eine Abnahme in Messkampagne 2 von $-2.647e-06$ mg/l ($p < 0,000$, $R^2 = 0,001$) beobachtet werden. Somit stellt der Drift nur einen sehr geringen Anteil der Variation dar und es liegt damit kein relevanter Drift in den Daten vor, welcher einer regelmäßigen Reinigung bedarf. Weiterhin konnte durch die Reinigung an und

rund um die Sonde keine erhöhte Sondenverfügbarkeit festgestellt werden, da Sediment in Regenereignisse weit genug transportiert wird und so die Sonde verlegen kann. Insgesamt kann eine jährliche Wartung der Sonde empfohlen werden, sofern die Messdaten keinen früheren Bedarf erkennen lassen.

Während der Projektdurchführung kam es zum Ausfall von einzelnen Messsystemen. Daraufhin wurde eine detaillierte Fehlersuche durchgeführt, die gezeigt hat, dass bei der verbauten Charge ein Hardwarefehler vorhanden war, welcher zu einem Defekt des Messsystems führen kann. In der Konsequenz wurden alle in dem Projekt eingesetzten Sensoren durch NIVUS ausgetauscht, um so für den weiteren Messzeitraum und mögliche Folgeprojekte eine hohe Datenverfügbarkeit sicherzustellen.

3.3.3 Genauigkeit des Messsystems

Zur Bestimmung der Genauigkeit des Messsystems wurden wie in Kapitel 3.1 beschrieben Labormessungen durchgeführt. Dafür wurden insgesamt 459 Proben im Kanal gezogen und 2.117 Analysen durchgeführt. Zusätzlich wurden im Zulauf der Kläranlage hinter dem Rechen 44 Proben gezogen und 186 Analysen durchgeführt, um Kenntnisse zur Sonde im reinen Schmutzwasser zu gewinnen. Der Fokus in der Analytik lag auf den AFS. Es wurden aber auch TNb, NH₄ und CSB analysiert. Die Analysen wurden im Abwasserlabor der StEB Köln durchgeführt. Die genutzten Analyseverfahren sind in Tabelle 3.5 dargestellt.

Tabelle 3.5: Laboranalyseverfahren

Parameter	Analyseverfahren
AFS	DIN 38409 – T2
AFS63	DIN 38409 – T2 (mit vorgeschalteter Filtration der Probe)
CSB	DIN ISO 15705 (Küvette)
TNb	DIN EN 12260
NH ₄	DIN ISO 15923-1

Zur Betrachtung der Variationen der Sensordaten zwischen und während Abflussereignissen zeigt Abbildung 3.8 die Abweichungen der Messdaten vom Mittelwert eines Ereignisses. Dabei ist zu sehen, dass die Konzentrationen im Kanal deutlich stärker schwanken als an den Entlastungsschwellen. Zudem zeigt sich, dass Konzentrationen im Kanal deutlich höhere Spitzen aufweisen. Dies ist wie vorher beschrieben von den Einflüssen von Sedimenten bestimmt. Der Mittelwert der Konzentration variiert zwischen Ereignissen um mehr als zwei Größenordnungen am Wehr SKU 0148 und um mehr als drei am RUB 0901. Dabei zeigen einige Ereignisse sehr starke intra-Event Variationen während andere eher stabil sind. Insgesamt überwiegt die Intraeventvariation über der Intereventvariation für beide Fälle. Dies zeigt die große Relevanz für Steuerungen die Varianz in den Daten zu berücksichtigen und dass eine reine statische Betrachtung oft nicht ausreicht.

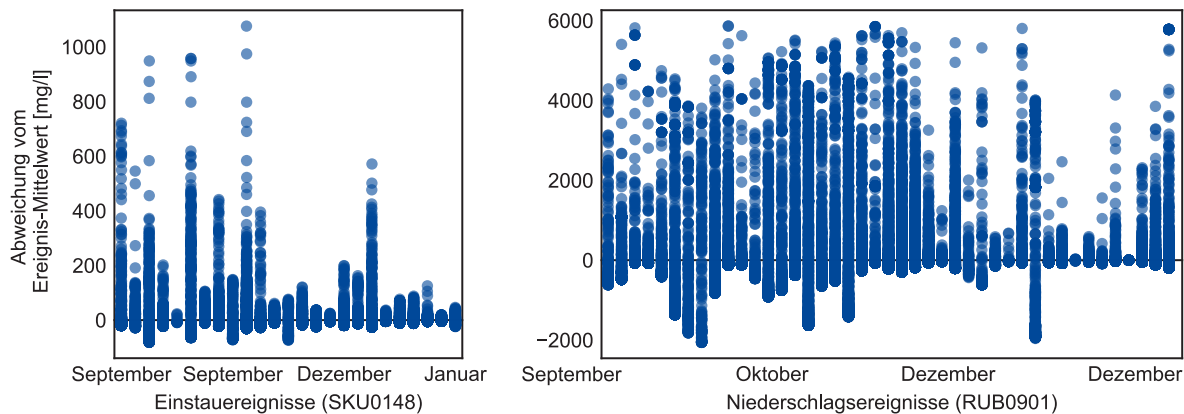


Abbildung 3.8: Abweichung der Sensorkonzentrationen vom Ereignismittelwert für links: alle Einstauereignisse im SKU 0148 zwischen 08/24 und 02/25 (n=25), rechts: Niederschlagsereignisse am RUB 0901 zwischen 09/24 und 02/25 (n=43)

Die Proben im Zulauf der Kläranlage konnten zu einem großen Teil auf Grund der Einwirkungen von Lufteintrag durch Rechen und Spülungen nicht verwendet werden. Daher wurden zusätzliche Versuche mit Schmutzwasser aus dem Zulauf der Kläranlage zu verschiedenen Tageszeitpunkten und verschiedenen Verdünnungen durchgeführt. Die Ergebnisse sind in Abbildung 3.9 dargestellt. Im Schmutzwasser kann demnach eine gute Korrelation zwischen Sensor und Labordaten hergestellt werden.

Die Korrelation in der Kanalisation ist generell als schwierig einzustufen, da die Begleitanalytik für den AFS sehr hohe Unsicherheiten beinhaltet. Unsicherheiten sind dabei in der Probenahme und der Analytik zu unterscheiden. Beispielsweise zeigen Literaturwerte, dass nur durch die Auswahl des Punktes der Probenahme Analysen im Regenwetter um 5-10 % variieren (Larrarte 2008). Der Analytik kann insgesamt die geringe Unsicherheit zugeschrieben werden. Diese Unsicherheit wird insbesondere in den Ergebnissen der Schwelle in Abbildung 3.9 deutlich. Hier liegt nur ein Ergebnis vor. Durch die hohen Unsicherheiten sind keine Schlüsse zur Genauigkeit aus der Analyse zu ziehen.

Bei einem Blick auf die Messungen an der Kanalsohle sind die Unsicherheiten als noch größer einzustufen, da hier mehr Sedimente vorliegen, welche nicht durch den Probenehmer erfasst werden können. Dies wird auch deutlich in den in Abbildung 3.9 dargestellten Daten vom RUB 0901, welche immer wieder ausreißende Punkte enthält. Hier zeigen die unterschiedlichen Farben unterschiedliche Regenereignisse. Dabei zeigen sich stark eventspezifisch Zusammenhänge. Lineare Regressionen zeigen Steigungen von 0,27 bis 1,31 mit R^2 von -3,52 bis 0,46. Dabei kann ebenfalls festgestellt werden, dass der Abschnitt im Abflussereignis (Frachtspitze, Abklingen und gleichmäßige Ereignisse) einen starken Einfluss auf die Abweichung hat.

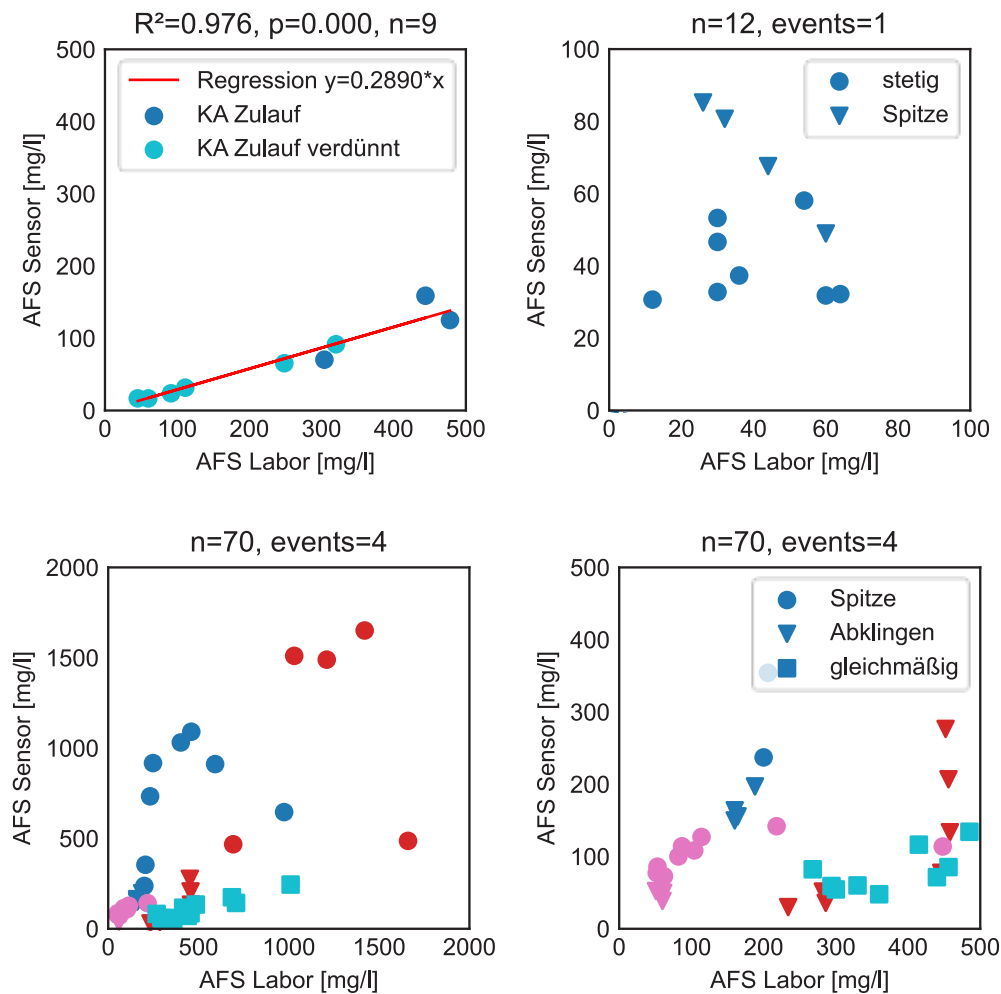


Abbildung 3.9: Korrelation zwischen AFS_{eq} Sensordaten und Labordaten mit verschiedenen Farben für unterschiedliche Ereignisse. Oben links: Zulauf Kläranlage, oben rechts: Wehrschwelle am SKU 0148, unten: Kanalsohle am RUB0901

Weiterhin wurde die PKM-Sonde an der Schwelle am SKU 0148 direkt neben eine s::can spectro::lyser UV-Vis Sonde eingebaut, mit dem Ziel die Ganglinien der Sonden miteinander zu vergleichen. Die Ergebnisse sind auszugsweise in Abbildung 3.10 dargestellt. Zur Darstellung wurden die s::can Daten – ähnlich zu den pkm-Daten - über einen Schwellenwert und Gradienten gefiltert und linear interpoliert. Die rechte Grafik zeigt ein Einstauereignis direkt nach einer Sondenreinigung. Daher startet die UV-Vis Sonde bei einem niedrigeren Wert und die beiden Sonden bilden den Schmutzfrachtverlauf ähnlich ab. Beide Sonden zeigen den first-flush an und zeigen auch beide ähnliche Ausschläge. In der linken Grafik ist das in Abbildung 3.9 dargestellte Ergebnis der Schwelle zusehen. Hier ist ein Vergleich der Sonden kaum möglich, da die UV-Vis Sonde vorher nicht gereinigt wurde. Im Mittel weichen die Ereignismediane der Sonden um $227,4 \pm 204,4$ mg/l voneinander ab.

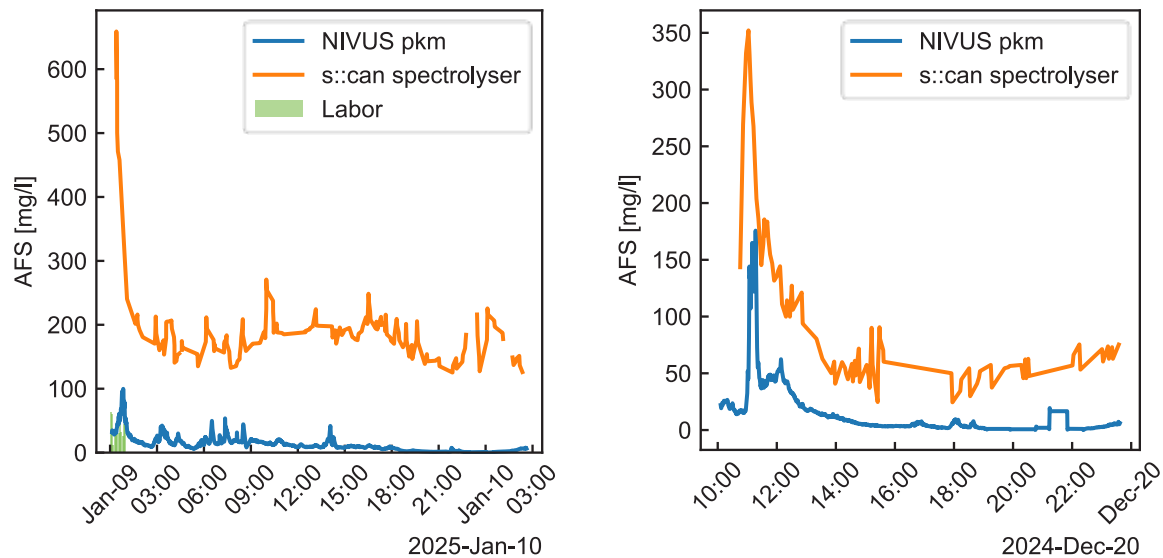


Abbildung 3.10: Abgleich der Ergebnisse der PKM-Sonde und einer spectro::lyser UV-Vis Sonde an der Schwelle am SKU 0148

Weiterhin bietet die Sonde durch die Multifrequenz die Möglichkeit verschiedene Größenklassen zu unterscheiden. Ebenfalls besteht so theoretisch die Möglichkeit, dass eine Unterscheidung zwischen AFS und AFS63 getroffen werden kann. Insbesondere im Trennsystem spielt dies zur Einhaltung des Standes der Technik eine wichtige Rolle (DWA-A 102-2/BWK-A 3-2). Die ersten Ergebnisse zeigten eine geringe Korrelation zwischen AFS63_{eq} und AFS63 als bei den AFS. Ein wesentlicher Grund für die geringe Vergleichbarkeit ist auch in der Bestimmungsmethode von AFS63 zu finden. Hierbei erfolgt im Labor eine Dispergierung und Homogenisierung der Probe, bei der zwangsläufig Primärteilchen erzeugt werden. Diese liegen in dieser Form aber nicht zwingend im Mischwasser vor. Im Mischwasser kommen die Partikel auch häufig als Agglomerate vor und werden daher auch als solche vom Messsystem erfasst. Gleichzeitig ist die messtechnische Erfassung der Korngrößenverteilung mit der PKM-Sonde eine Abschätzung, die auf der unterschiedlichen Rückstreuung verschiedener Korngrößen auf den eingesetzten Frequenzen basiert. Im Mischwasser kann diese Methode jedoch nur sehr eingeschränkt eingesetzt werden bzw. ist nur begrenzt valide. Im Mischsystem gibt es diese Anforderungen bisher nicht. Neue Gesetzgebungen wie die EU-Kommunalabwasserrichtlinie priorisieren hier die AFS als Parameter (EU-KARL, A9-0276/2023). Daher wurde eine Korrelation zum AFS63 im Projekt nicht weiter untersucht.

Die Auswertung der Rohdatenaufzeichnungen hat gezeigt, dass es einen signifikanten Unterschied des Rückstreuungsprofils gibt. Schon durch Sichtung der Rohdaten zwischen Regenwetterabfluss und Trockenwetter differenziert werden kann. Auffällig ist hierbei, dass im Regenwetter signifikant mehr Rückstreuung auf Frequenzen vorliegt, die für kleine Primärteilchen charakteristisch sind. Dieser Unterschied kann sowohl im Vergleich zwischen „Entlastungsschwelle im Regenwetter“ und „Messtelle auf der Sohle im Trockenwetter“, als auch zwischen „Messung im Trockenwetter auf der Sohle“ und „Messung im Regenwetter auf

der Sohle“ festgestellt werden. Die ersten Daten lassen vermuten, dass kaum Primärteilchen in der Größenordnung $< 40 \mu\text{m}$ im Trockenwetterabfluss transportiert werden und diese erst in maßgeblichen Mengen durch Oberflächenabflüsse in die Kanalisation eingetragen werden. Ein kausaler Zusammenhang kann hieraus jedoch noch nicht abgeleitet werden, ggf. stellt sich auch nur über Fließtiefe, zusätzlich zu einem Konzentrationsgradienten ein Größengradient ein, welche im Regenwetterfall durch Zunahme der Turbulenz/höhere Sohlschubspannungen nicht mehr gegeben ist.

3.3.4 Empfehlungen zum Sondeneinsatz

Einbauort	Gerinne	Überlaufschwelle	Entlastungsgerinne	Katamaran/Ponton
Bild				
Vorteile	+ Kontinuierliche Erfassung + Messung im Trockenwetter möglich	+ Einfache Installation + Stabile Messwerte	+ Einfache Installation + Einfache Wartung	+ Keine Problematik mit Verlegungen + Messung im Trockenwetter möglich
Nachteile	- Bohrungen notwendig - Verlegung durch Sedimente möglich	- Bohrungen notwendig - Keine kontinuierliche Erfassung	- Lufteintrag durch Wehrschwellen - Bohrungen notwendig - Keine kontinuierliche Erfassung	- Komplexe Installation
Empfehlung Ortswahl	• Auf der Sohle in stark Rückstau beeinflussten Kanälen nicht zu empfehlen • Nur in Schräglage einzubauen (seitlich von Haupt-sedimenttransport) • Keine Schächte vor der Sonde (Verminderung Lufteintrag) • Einbau in Drosseln sollte vermieden werden	• Unterhalb der Entlastungs-schwelle (Definition der Entlastungs-schwellenhöhe als "Mindestüberstau" im System zur Limitierung der Messdaten auf Entlastungsdaten)	• Deutliche Entfernung von Wehrschwellen • Gerinne sollte relativ klein sein und es sollten sich schnell hohe Wasserstände einstellen	• Nicht in voll eingestauten Bereichen möglich • Bereiche mit Lufteintrag sind zu vermeiden • Kläranlage: Mit Abstand zu Rechen und Wäschwassereinleitungen einzubauen

3.3.5 Eignung der Sonden für den Einsatz in der Kanalnetzsteuerung

Die Eignung der Sonde setzt voraus, dass der AFS als Indikator für die Schmutzfracht und auch für die negativen Einflüsse auf die Gewässer verwendet werden kann. Die Einflüsse auf Gewässer durch Mischwasserentlastungen können in verschiedene Wirkungen eingeteilt werden: Physisch, Sauerstoffentzug, Toxizität, Eutrophierung, Pathogene und persistente

Feststoffe. Die Messung setzt voraus, dass Stoffe partikulär vorliegen oder denselben Frachtverläufen unterliegen wie Feststoffe. Daher wurde im Labor auch Stickstoff und CSB mit analysiert. Die Korrelation zum im Labor bestimmten AFS im Gerinne am RUB 0901 ist in Abbildung 3.11 dargestellt. Zu sehen sind alle untersuchten Ereignisse in unterschiedlichen Farben. Ein Zusammenhang zum gesamten CSB kann hergestellt werden. Dabei stellt der partikuläre Anteil den größten Teil des CSB dar ($85,1 \pm 9,2 \%$). An der Entlastung zeigt sich ein ähnliches Bild mit einem partikulären Anteil von $76,8 \pm 12,8 \%$. Zum Ammonium liegt eine geringe Korrelation vor. Somit ist davon auszugehen, dass bezüglich des Sauerstoffentzuges ein guter Zusammenhang besteht, bezüglich der Ammonium-Toxizität und Eutrophierung aber eine geringere.

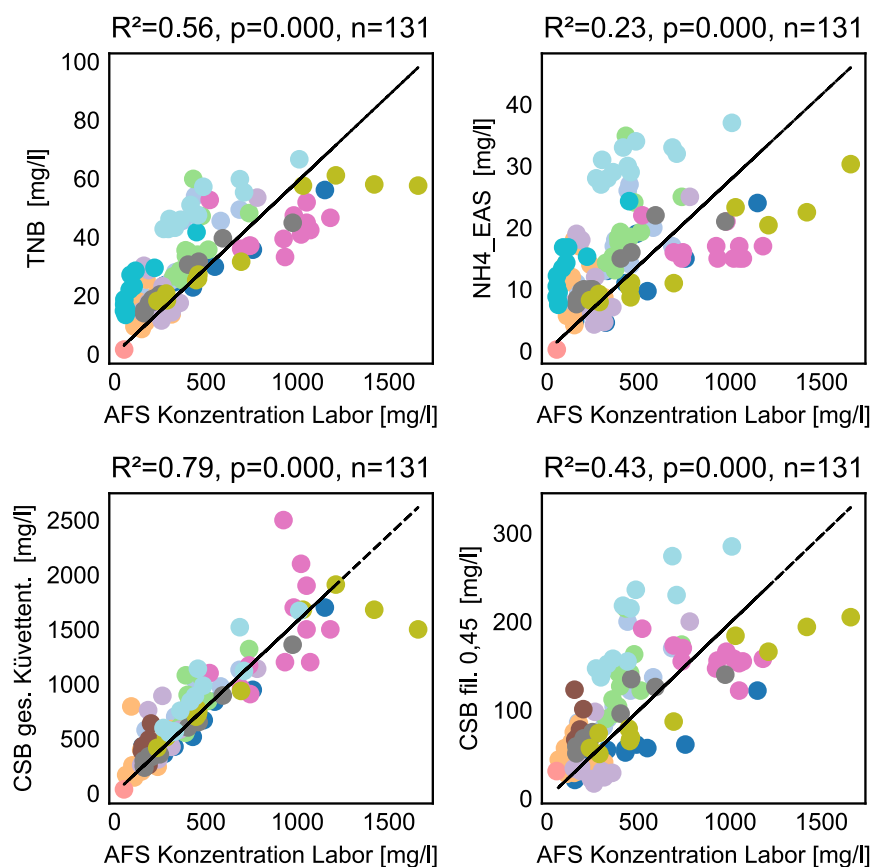


Abbildung 3.11: Korrelation von Stickstoff und CSB mit AFS Konzentrationen aus dem Labor vom RUB 0901

Eine gute Abbildung liegt theoretisch gegenüber Schwermetallen vor und auch z.B. Kunststoffpartikeln, da diese direkt im AFS abgebildet werden. Ebenso konnten in der Literatur hohe Korrelationen zwischen *E. coli* und AFS in Mischwasserentlastungen festgestellt werden (Madoux-Humery et al. 2015). Insbesondere für akkumulierende Effekte stellt somit der AFS einen guten Parameter für die Steuerung dar. Dabei sollte dieser idealerweise ergänzt werden, um physische Parameter (Minderung des maximalen Entlastungsvolumens) und einen weiteren Parameter für gelöste Stoffe.

Die Untersuchungen zur Sonde haben gezeigt, dass die Schmutzfrachtverläufe sehr gut abgebildet werden können. Damit können beispielsweise die Beschickung von Becken im Nebenschluss gut gesteuert werden. Im Projekt konnte hingegen bisher nicht abschließend festgestellt werden, ob ein Vergleich zwischen mehreren Sonden möglich ist. Dies kann für Sonden im Gerinne ausgeschlossen werden, an Schwellen wird aber eine realistische Möglichkeit gesehen, dass dies möglich ist.

3.4 Entwicklung von Steuerungskonzepten

Für das Kanalnetz wurden vor der Einbindung der Stoffkonzentrationen im Abwasser verschiedene Volumensteuerungskonzepte entwickelt. Aufbauend wurden Möglichkeiten für die frachtbasierte Steuerung untersucht und mit den Ergebnissen aus der Volumensteuerung verglichen. Das Modell, welches den aktuellen Zustand (Status Quo) des Kanalnetzes abbildet, wurde für eine Analyse der Auswirkungen der erarbeiteten Konzepte herangezogen.

Die hier gezeigten Ergebnisse der Steuerkonzepte basieren auf den Validierungsergebnissen der Modelle. Für die Validierung wurden die Niederschläge in den Jahren 2022 und 2023 simuliert. Für vereinzelt Betrachtungen wurden zusätzlich Starkregenereignisse aus den Jahren 2020 und 2021 einbezogen. Die Starkregenereignisse wurden nicht für die Entwicklung der Modelle verwendet, weil das Ziel der Steuerkonzepte hier nicht sein sollte Entlastungsvolumina und/oder -frachten bei Starkregenereignissen zu minimieren.

3.4.1 Volumenbasierte Steuerung

Um die Auswirkungen einer Volumensteuerung zu bewerten, wurde eine Potenzialanalyse durchgeführt. Dabei kam der Zentralbeckenansatz gemäß ATV-A 128 zur Anwendung. Für das untersuchte Kanalsystem konnte ein Potential von 53 % bestimmt werden. Unter Berücksichtigung der Starkregenereignisse sinkt das Potential auf 31 % (vgl. Abbildung 3.13). Andere Studien ermittelten Potenziale zwischen 10 % und 81 % (Einfalt und Stölting 2002; van der Werf et al. 2021). Zur volumenbasierten Optimierung wurden anschließend vier verschiedene Optimierungskonzepte erstellt, mit dem Ziel das abgeschlagene Volumen zu verringern: Flächengewichtete Drosselabflüsse, Statisch optimierte Drosselabflüsse, Verteilte Steuerung der Hubwehre und Gleichmäßige Füllung der Becken.

Für die Entwicklung dieser Modelle wurden 12 Niederschlagsereignisse ausgewählt. Dabei wurde darauf geachtet, dass die Auswahl, Ereignisse die knapp nicht entlasten, Ereignisse bei denen es an unterschiedlichen Bauwerken zu Entlastungen kommt und Ereignisse mit unterschiedlichen Regenintensitäten repräsentiert.

Die flächengewichteten Drosselabflüsse werden über die befestigte Fläche des angeschlossenen Einzugsgebiets bestimmt. Gemäß des ATV-A 128 sollen die Abflüsse parallel geschalteter Drosseln in Summe nicht die Leistungen der folgenden Drosseln

überschreiten. Als Inputwert der Berechnung wird der Zufluss der Kläranlage verwendet. Die resultierenden Drosselabflüsse sind in Tabelle 3.6 im Vergleich zum Status Quo aufgezeigt.

Die statische Optimierung der Drosselabflüsse wurde mit einer Bayes'schen Optimierung und 60 Optimierungsschritten durchgeführt. Auf Grund der hohen Simulationszeit konnte keine höhere Anzahl an Schritten gewählt werden. Dem Optimierer wurde für jede Drossel im System Minimal- und Maximalwerte übergeben, welche mit der Zielgröße „Entlastetes Volumen“ in diesen Grenzen angepasst wurden: Pumpen [0 l/s; Verfügbare Pumpleistung], Schieber [5 l/s; Maximal gemessener Durchfluss], Hubwehre [Trockenwetter Maximum; Kläranlagenzufluss – Trockenwetter]. Die statische Optimierung des Abflusses bei Regenereignissen über die Hubwehre kann zu temporären Regelaussetzungen der Hubwehrsteuerung führen. Ein Beispiel hierfür sind die Steuerregeln für Spülvorgänge, welche in Konflikt mit den optimierten Parametern stehen können. Trotz dieser potenziellen Konflikte wird das ermittelte Optimierungsergebnis als maßgeblich betrachtet.

Um Überflutungen des Kanalnetzes auszuschließen, wurde eine Bestrafung beim Eintreten in Ereignissen implementiert. Die Ergebnisse der verschiedenen statischen Drosseleinstellungen sind in Tabelle 3.6 gegenübergestellt. Aufgrund der limitierten Anzahl an Optimierungsschritten wegen hoher Rechenzeit, ist davon auszugehen, dass mit der gewählten Optimierungsmethode nicht der gesamte Suchraum vollständig exploriert werden konnte. Für zukünftige Untersuchungen oder einer Implementierung, sollte die Anzahl der Optimierungsschritte erhöht werden.

Tabelle 3.6: Vergleich der Drosselabflüsse der Volumenoptimierungen in l/s

Drossel	Status Quo	Flächen- gewicht	Statisch optimiert	Statisch Fracht optimiert (Vgl. Kapitel 3.4.2)
MWP 0142	16	4	3	26
MWP 0112	60+60	4	9	74
HUB 0301	Konstante Überlaufhöhe Ziel = 300 Max = 450	361	240	260
MWP 0944	35+35	42	73	87
MWP 0314	50+300+250	14	4	4
MWE 0145	Rohrdrossel	66	Rohrdrossel	Rohrdrossel
HUB 0201	Konstante Überlaufhöhe Ziel = 130	95	95	305
RUE 0225	Rohrdrossel	4	Rohrdrossel	Rohrdrossel
SKU 0222	Rohrdrossel	58	Rohrdrossel	Rohrdrossel
RWP 0355	68	72	59	2
SKU 0216	MID geregelte Schieber = 20	8	94	62
MWP 0932	20+30	1	1	24
RWP 0302	50	1	1	6

Das Steuerungskonzept der verteilten Steuerung baut auf das Modell der statisch optimierten Drosseln auf und basiert auf der Kommunikation zwischen einer Höhenstandssonde an der Wehrschwelle SKU 0133 und des Abflusses über HUB 0201 und HUB 0301. Dies Bauwerke wurden auf Grundlage einer Analyse der Beckenauslastungen und Entlastungsvolumen der

einzelnen Bauwerke mit Vergleich zu den Beckenvolumina ausgewählt. Das RRB 0301 wurde als das Becken mit dem größtmöglichen Potenzial für die Minimierung des Abschlagsvolumens identifiziert, außerdem sind die Abschlüsse am Wehr SKU 0133 maßgebend (vgl. Abbildung 3.12). Wie für die Optimierung der Drosselabflüsse wurden hier die Parameter – Durchflüsse, Höhenstände und PID-Parameter – der Steuerung, wie für die statische Optimierung, über einen Bayes'schen Optimierer angepasst.

Das Konzept der gleichmäßigen Füllung von Becken (engl.: *equal filling degree (EQF)*) wird in vielen Studien (Dirckx et al. 2011; Borsányi et al. 2008; Kirstein et al. 2024; Cembellín et al. 2023; Troutman et al. 2020) als zentralisierte Steuerungsstrategie genutzt. Dies wurde hier als letzte Optimierung nach dem erläuterten Vorgehen in Dirckx et al. (2011) aufgebaut. Dafür werden zunächst für alle Bauwerke im System Füllkurven erstellt. Dafür werden hier abweichend dynamische Füllkurven betrachtet. Diese werden erstellt, in dem das im System befindliche Volumen oberhalb des Beckens bis zum nächsten Speicherbauwerk mit in die Rechnung aufgenommen wird. Dafür wurde das System für die Jahre 2022 und 2023 simuliert. Auf Basis der Füllkurven lassen sich zwischen der Bodenhöhe und der Wehrhöhe oder Beckenoberkante prozentuale Füllungen ermitteln. Ziel des Algorithmus ist es nun, die Füllstände aller Becken auszugleichen, so dass das System gleichmäßig gefüllt ist. Mathematisch bedeutet dies, dass alle Füllungsgrade versuchen müssen, den mittleren Füllungsgrad zu erreichen. Hier wurde ebenfalls eine Aktivierungsgrenze eines Füllungsgrades von 20% verwendet, aber der diese Steuerung aktiviert wird. Die einzelnen Pumpen wurden entweder mit z.B. Start/Stopp Regeln für die Pumpwerke oder mit PID-Reglern für frequenzregelbaren Pumpen und für die Hubwehre versehen.

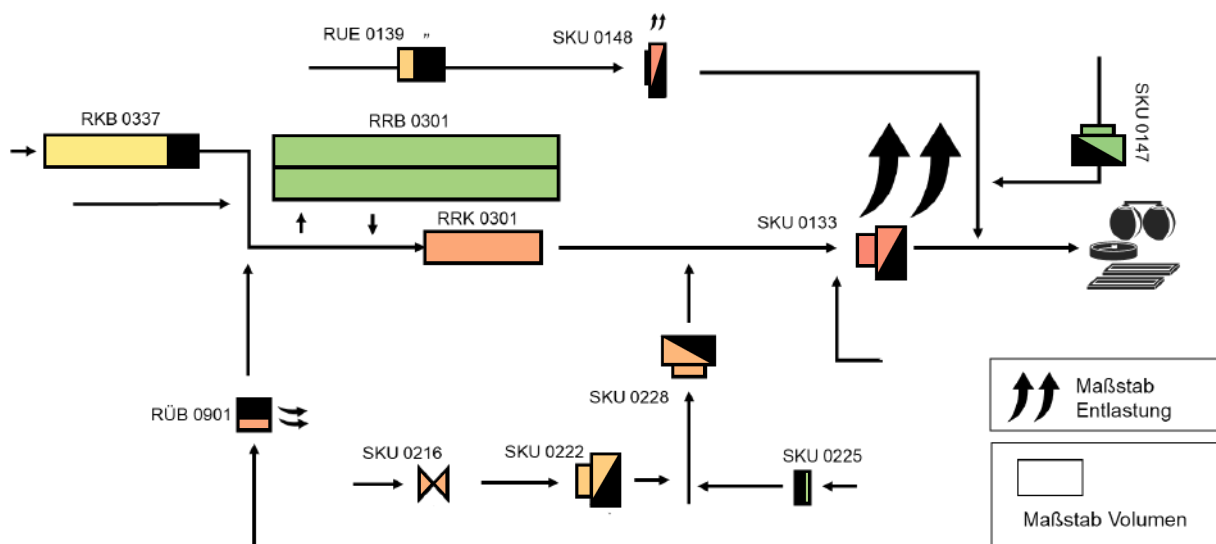


Abbildung 3.12: Einzugsgebiet mit Stauraumbauwerken in Maßstab des durchschnittlichen ungenutzten Volumens und Entlastungen im Maßstab der jährlichen Entlastungsmenge

Den größten Effekt auf das Entlastungsvolumen konnte durch die Verteilte Steuerung erreicht werden, das berechnete Potenzial kann hier fast erreicht werden (vgl. Abbildung 3.12). Der Erfolg dieses Konzept kann darauf zurückgeführt werden, dass im Vergleich zu der

gewichteten und statisch optimierten Drossel hier die Regeln der Hubwehrsteuerung zusätzlich optimiert wurden. Dadurch konnte eine bessere Auslastung des RRB 0301 erreicht werden und die Entlastungen am SKU 0133 um 128.500 m³ in den betrachteten zwei Jahren verringert werden (vgl. Abbildung 3.13). Das Konzept der gleichmäßigen Beckenfüllung schafft dies nicht, da dieses Konzept nicht im Detail optimiert und angepasst wurden und somit auch das Beckenvolumen am RRB 0301 nicht optimal ausgenutzt wird. Dies zeigt, dass nicht einfach Konzepte ohne eine spezifische Optimierung umgesetzt werden sollten.

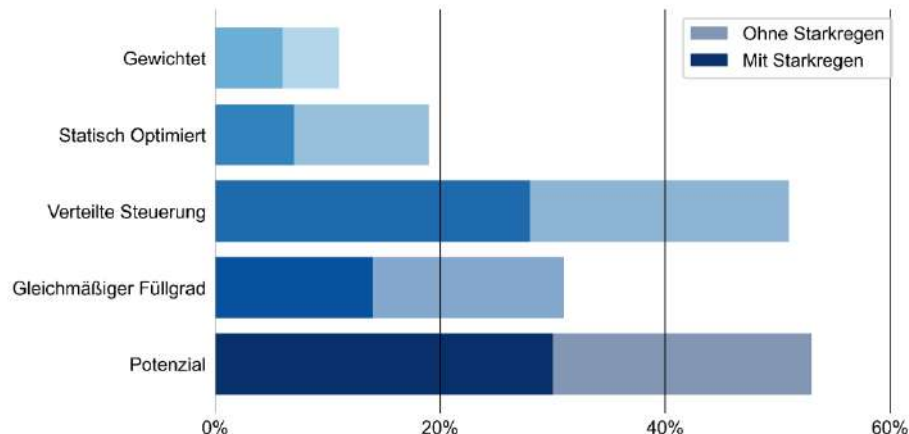


Abbildung 3.13: Prozentuale Verbesserungen gegenüber dem Status-Quo der Volumen-basierten Ansätze

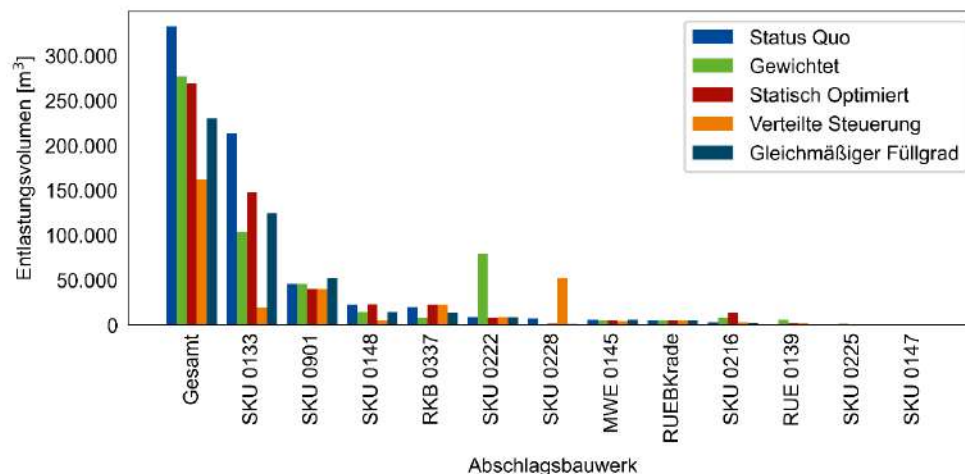


Abbildung 3.14: Verteilung des Entlastungsvolumen für verschiedene Volumen-basierte Ansätze

Ebenso ist in den Grafiken zu sehen, dass bereits durch eine statische Optimierung deutliche Verbesserungen erzielt werden können. In einem neu geplanten System und einer gleichmäßigen Verteilung von Stauraum und Drosseln sollte dieser Fall bereits sehr gute Ergebnisse erreichen. Eine Verbesserung ist zu sehen, da die meisten Kanalnetze historisch bedingt aufgebaut wurden und somit nicht diesem Optimum entsprechen. Da zudem auch der Stauraum ungleichmäßig verteilt ist, ergibt sich die große Lücke zu den Steuerungen.

Abbildung 3.13 verdeutlicht zudem den Einfluss der Auswahl der Regenereignisse und der Jahre die für die Validierung der Steuerungen genutzt werden. Die Steuerungsergebnisse

verringern sich drastisch für alle Steuerungen, wenn mehr Starkregen vorliegen. Insbesondere bei der statischen Optimierung zeigt sich, dass diese nicht viel besser als die flächengewichteten Drosseln ist. Dies ist damit zu begründen, dass diese Einstellungen an die Regen die vorliegen angepasst werden müssen und nicht auf Starkregen ausgelegt sind. Für die verteilte Steuerung, welche die besten Ergebnisse liefert wird in Abbildung 3.14 deutlich, dass es zwar zu einer Reduzierung der Entlastungsmengen kommt, allerdings auch zu einer Umverteilung auf die Bauwerke. Hier kommt es durch die Steuerung zu einer erhöhten Entlastung an SKU 0228 und die Entlastung am SKU 0133 wird dadurch drastisch reduziert. An dieser Stelle sind insbesondere frachtgestützte Informationen notwendig, um eine Verbesserung durch die Verlegung der Entlastungen zu verifizieren.

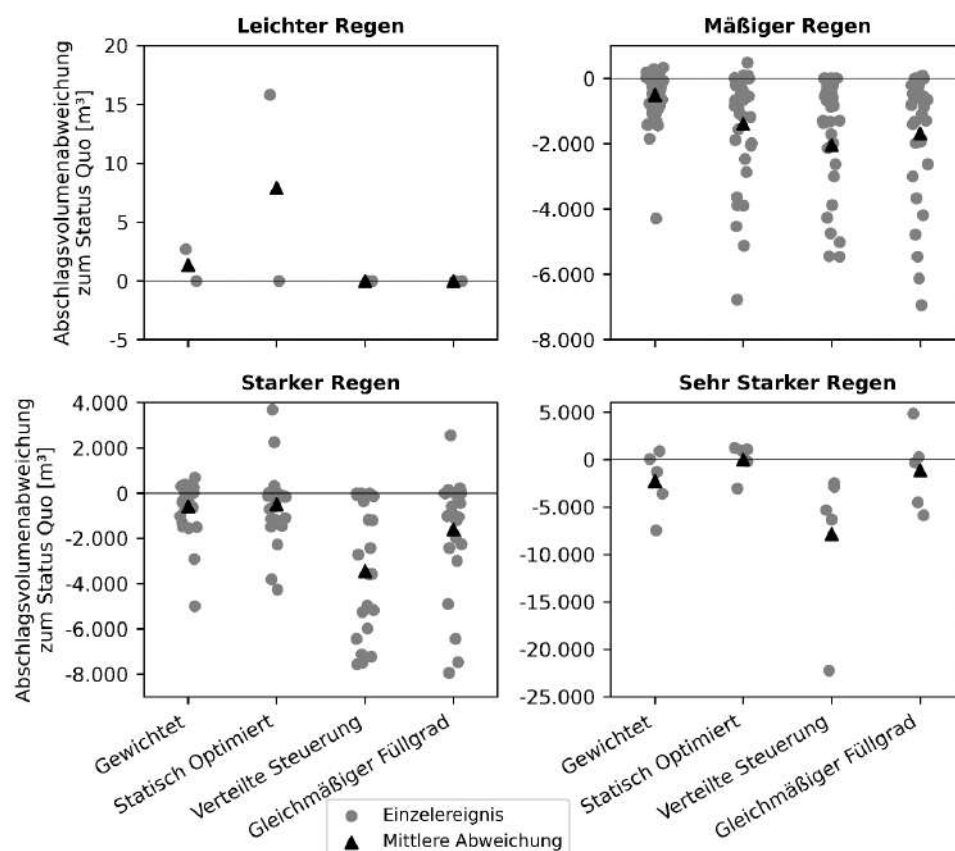


Abbildung 3.15: Änderung des Entlastungsvolumens der einzelnen Ereignisse für verschiedene Regenintensitäten nach DWD (2023)

Zuletzt sind in Abbildung 3.15 die Entlastungsvolumenverringerungen für verschiedene Regenintensitäten dargestellt. Dabei zeigt sich, dass für leichte Regen die Entlastungen mit Steuerungen auf null bleiben, statische Einstellungen hier aber zu sehr geringen Entlastungen sorgen können. Somit sind für diese Regen keine Frachtbetrachtungen notwendig. Bei mäßigen und starken Regen zeigt sich, dass es bei allen Optimierungen zu einer Reduktion kommt, der Vergleich der verschiedenen Optimierungen aber unterschiedlich ausfällt. Bei den starken und sehr starken Regen ist zu sehen, dass es auch zu einer Erhöhung der Entlastungen kommen kann. Lediglich die verteilte Steuerung führt zu keiner Erhöhung der Entlastungen. Eine komplette Vermeidung von Entlastungen konnte durch alle Steuerungen,

außer mit den gewichteten Drosseleinstellungen, erreicht werden. Allerdings kam es auch zu neuen Entlastungen die im Status Quo nicht eingetreten sind. Bei mäßigen Regen können die meisten Entlastungen durch das Steuerungskonzept des gleichmäßigen Füllgrads erreicht werden, bei starken Regen durch die verteilte Steuerung. Die meisten neuen Entlastungen wurden durch die gewichteten Drosseln hervorgerufen (vgl. Tabelle 3.7).

Tabelle 3.7: Anzahl der vermiedenen und neuen Entlastungen

Steuerung	Mäßiger Regen		Starker Regen	
	Vermiedene Entlastungen	Neue Entlastungen	Vermiedene Entlastungen	Neue Entlastungen
Gewichtet	0	6	0	4
Statisch Optimiert	3	5	1	2
Verteilte Steuerung	4	3	3	1
Gleichmäßiger Füllgrad	11	1	1	2

3.4.2 Frachtbasierte Steuerung

Das aufgebaute Schmutzfrachtmodell (siehe Kapitel 3.2) weist keine ausreichende Genauigkeit auf für die Entwicklung einer Steuerung mit Hilfe des Modells. Ebenso lagen verlässliche Sondendaten erst am Ende der Laufzeit des Projektes vor. Daher wurde im Projekt ein Fokus auf implizite Frachtbasierte Steuerungen gesetzt, in denen Erkenntnisse aus der Auswertung der Sondendaten in Konzepte umgesetzt wurden.

3.4.2.1 Datenauswertung

Die von den Sonden gemessenen Konzentrationen standen für die Bauwerke SKU 0148 und SKU 0133 für Messkampagne 2 parallel zur Verfügung. Dabei zeigt sich (vgl. Abbildung 3.16), dass im Mittel beide Entlastungen ähnlich verschmutzt sind (respektive 9,3 und 7,6 mg/l). Insbesondere SKU 0148 zeigt einen stark ausgeprägten First-flush im Gegensatz zum SKU 0133. Somit sollte als Steuerungseingriff insbesondere das anfängliche Volumen vom SKU 0148 prioritär zur Kläranlage geleitet werden. Für die Steuerung stehen zwei Schieber am Zulaufpumpwerk zur Kläranlage zur Verfügung.

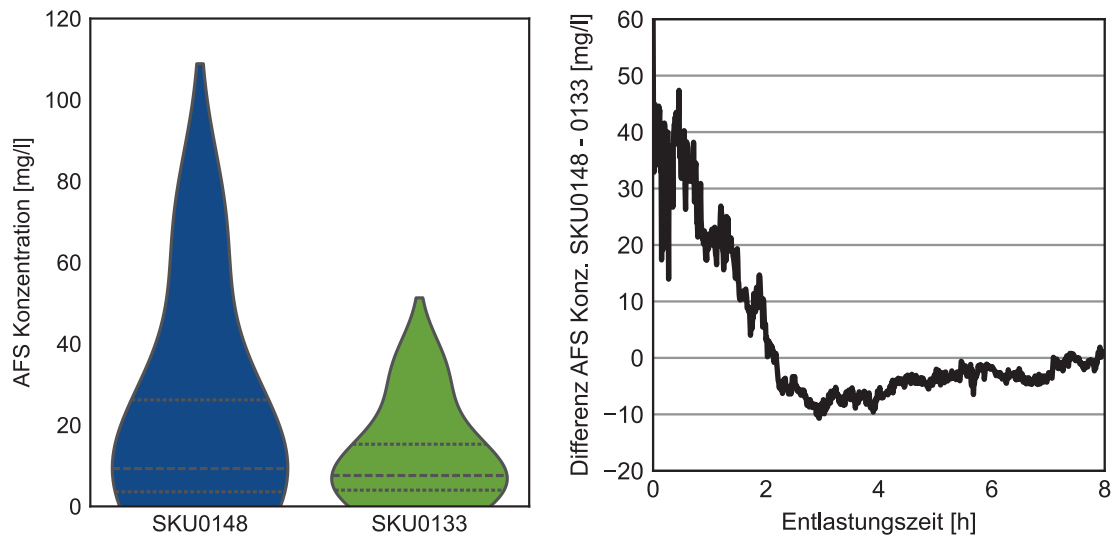


Abbildung 3.16: Konzentrationen an den Entlastungsschwellen an den SKU 0133 und 0148. Links als Violinplot und rechts als Median der Differenz der Konzentrationen für 50 Entlastungsereignisse

Ein wichtiger Baustein der Kanalnetzsteuerung ist wie in der volumenbasierten Steuerung gezeigt das HUB 0301. Hier wurden für Messkampagne 2 die Sonden ca. 45 m hinter das Hubwehr versetzt. Damit kann der Rückhalt von Frachtstößen durch das Hubwehr betrachtet werden und ebenfalls der Effekte durch die Schwallspülungen. Für den zweiten Punkt kann die Messung des Sedimentes durch die PKM-Sonde zum Vorteil eingesetzt werden. In Abbildung 3.17 sind dafür zwei Spülungen beispielhaft gezeigt. Dabei ist zu beobachten, dass mit den erhöhten Abflüssen auch deutlich erhöhte Konzentrationen durch den Kanal geleitet werden. Somit lösen die Spülstöße auch deutliche Frachtstöße im Kanal aus. An der nächsten unterhalb des Hubwehres eingebauten Sonde am SKU 0133 (Fließweg 2,1 km und Fließzeit 26 min) können im Trockenwetter keine Spülstöße nachgewiesen werden, da die Sonde im Trockenwetter nicht misst.

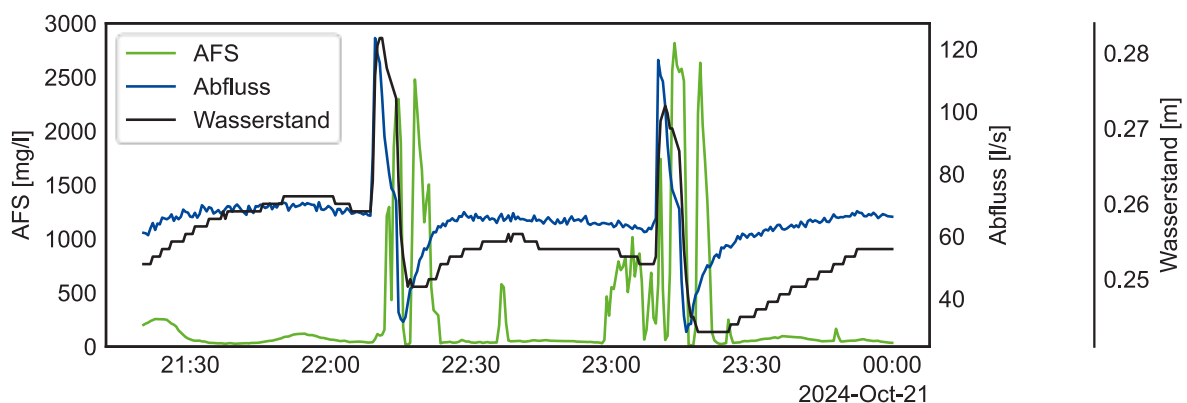


Abbildung 3.17: Spülungen des HUB 0301

Um die Konzentration an der Entlastungsschwelle SKU 0133 unterhalb des Hubwehres zu verringern, sollte sichergestellt werden, dass das HUB 0301 diese zurückhält. In Abbildung 3.18 ist dafür ein Beispielregen dargestellt. Zu sehen ist, dass trotz der Drosselung

des Abflusses durch das Hubwehr eine Frachtspitze durch die Haltung unterhalb läuft. Diese Beobachtung kann auch im Schmutzfrachtmodell gemacht werden. Daher kann an dieser Stelle das Schmutzfrachtmodell genutzt werden, um zu prüfen wie eine Steuerung angepasst werden kann, um den Spülstoß im Becken im Nebenschluss zu speichern.

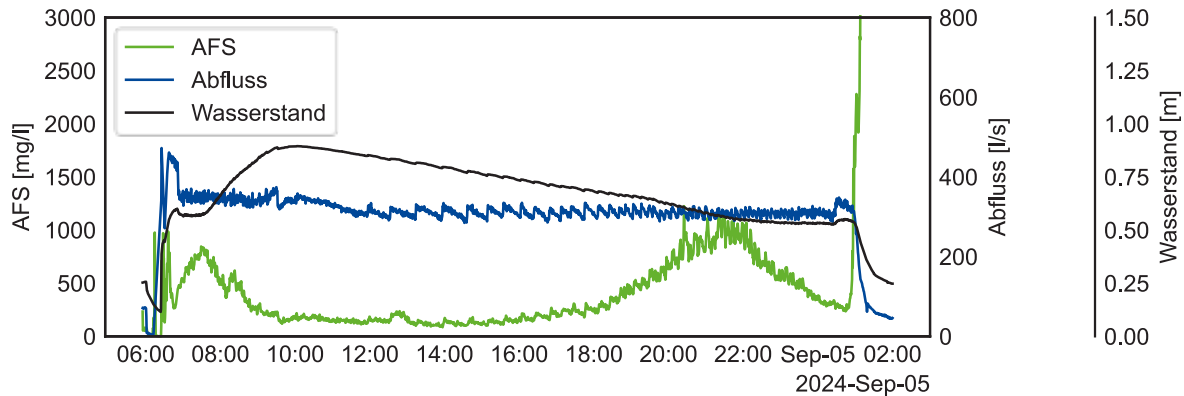


Abbildung 3.18: Regenereignis am HUB 0301 mit Spülstößen am Anfang und Ende

Für Niederschlagsereignisse kann die Sonde am SKU 0133 betrachtet werden. Bei leichten Regen kann zwar teilweise ein starker first- und last-flush am HUB 0301 beobachtet werden, allerdings wird dieser in der Sonde am SKU 0133 nicht sichtbar. Bei mäßigen Regen hingegen kann auch ein starker first- und last-flush an der Sonde auf der Sohle im SKU 0133 und an der Schwelle beobachtet werden.

3.4.2.2 Steuerungskonzepte

Im Rahmen dieses Projektes können die Verschmutzungsgrade lediglich abgeschätzt werden, da keine Messdaten für alle Entlastungen vorliegen und auch das Modell keine ausreichende Genauigkeit für die Entlastungsfrachten aufweist. Das Ziel der frachtbasierten Steuerung ist das Entlastungsvolumen so zu verschieben, dass eine Verschlechterung der Entlastungsfracht ausgeschlossen werden kann.

Für die Berechnung der Entlastungsfracht wurden die durchschnittlichen AFS-Konzentrationen für jedes Entlastungsbauwerk rechnerisch ermittelt, wobei die spezifischen Charakteristika der jeweiligen Teileinzugsgebiete – hinsichtlich der Belastungen durch häusliches Abwasser, industrielles Abwasser und Regenwasser – berücksichtigt wurden. Dabei wurde für die AFS-Fracht des häuslichen Abwassers ein Wert von $70 \text{ g}/(\text{E} \cdot \text{d})$ gemäß den Vorgaben des DWA-A 198 zugrunde gelegt. Die Bestimmung der AFS-Konzentrationen im Regenwasser erfolgte anhand der Belastungsklassen gemäß DWA-A 102.

Zur Ermittlung von Konzentrationen, die sich auf ein Entlastungsereignis beziehen, wurden die durchschnittliche Eventdauer sowie die durchschnittliche Niederschlagshöhe aller Entlastungsereignisse in den Jahren 2020 bis 2023 herangezogen. Über eine Mischungsrechnung wurde eine AFS-Konzentration für jedes Abschlagsbauwerk in mg/l berechnet (vgl. Tabelle 3.8). Dieses methodische Vorgehen ermöglicht eine differenzierte

Betrachtung der einzelnen Entlastungsströme und liefert eine fundierte Grundlage für die Bewertung der AFS-Belastung in den einzelnen Bauwerken des Kanalsystems. Es ist jedoch zu beachten, dass dieser Ansatz den zeitlichen Verlauf der Konzentrationen nicht abbildet. Dynamische Effekte, wie beispielsweise der First-Flush-Effekt, der zu Beginn eines Entlastungsereignisses zu erhöhten AFS-Konzentrationen führen kann, werden dementsprechend nicht berücksichtigt. Dies zeigt sich an den Bauwerken SKU 0133 und SKU 0148. Hier zeigt in den Messdaten SKU 0148 einen ausgeprägten first-flush und dadurch eine höhere mittlere Konzentration. Allerdings ist die Hintergrundkonzentration am SKU 0133 höher, wie auch in diesen angenommenen Daten.

Tabelle 3.8: AFS-Konzentrationen der Entlastungsbauwerke gemäß Mischungsrechnung

Entlastungsbauwerk	AFS-Konzentration [mg/l]	Entlastungsbauwerk	AFS-Konzentration [mg/l]
SKU 0133	92,5	SKU 0148	84,1
SKU 0228	85,8	RUE 0139	112,6
SKU 0901	90,8	RUE 0225	80,0
SKU 0147	87,0	RUEB Krade	95,0
SKU 0216	79,8	MWE 045	124,6
SKU 0222	96,1	RKB 0337	124,6

Die mittleren Konzentrationen wurden anschließend in die statische Optimierung der Drosseleinstellungen aufgenommen, um eine Wichtung der Entlastungen vorzunehmen. Es wurden dieselben Optimierungen genutzt wie für die reine Volumensteuerung. Die resultierenden Drossel Einstellungen sind mit in Tabelle 3.6 dargestellt. Dabei werden die meisten Drosseln deutlich erhöht. Eine niedrigere Einstellung erfolgt für RKB 0337 und SKU 0216. So kommt es insgesamt zu einer Reduzierung der Fracht um 1,3 kg (0,03 %) und 1.300m³ (3,15 %). Insbesondere wird deutlich, dass es zu einer Verschiebung der Entlastungen auf andere Bauwerke kommt, hier stechen SKU 0228 und RKB 0337 heraus. Welche sonst sehr wenig entlasten. Insgesamt zeigt die Betrachtung erneut, dass mehr Optimierungsschritte notwendig gewesen wären für ein finales Ergebnis. Trotz einer erhöhten Drosseleinstellung über das HUB 0201 resultiert ein erhöhtes Entlastungsvolumen am SKU 0228. Dies ist darauf zurückzuführen, dass die Volumensteuerung zu Abflüssen über das Hubwehr führt, die die festgelegte Einstellung überschreiten. Dieser Effekt ist auf Konflikte mit der allgemeinen Steuerung des Hubwehres zurückzuführen.

Mit den rechnerischen Entlastungskonzentrationen können ebenfalls die Entlastungsfrachten für alle volumenbasierten Steuerungen verglichen werden (vgl. Abbildung 3.20). Dabei zeigen sich keine Unterschiede zu den volumenbasierten Ergebnissen. Dies liegt einerseits an den großen Unterschieden in den Ergebnissen der Steuerungen und den relativ geringen Unterschieden in den angenommenen Konzentrationen an den Entlastungen. Mit den rechnerischen Entlastungen würden sich so im betrachteten Kanalnetz eine Frachtreduzierung von Gewichtet- 16 %, Statisch optimiert 19 %, Verteilte Steuerung 51 % und EQF 31 % ergeben. Für die Volumensteuerung liegen diese bei respektive 11 %, 19 %, 51 % und 31 %. Somit kommt es nur durch die flächengewichteten Drosseln zu einer weiteren Verringerung

der Fracht. Bei allen weiteren Steuerungen folgt die Verringerung der Fracht dem des Volumens. Bei Berücksichtigung einer Dynamik würden hier voraussichtlich andere Unterschiede vorliegen.

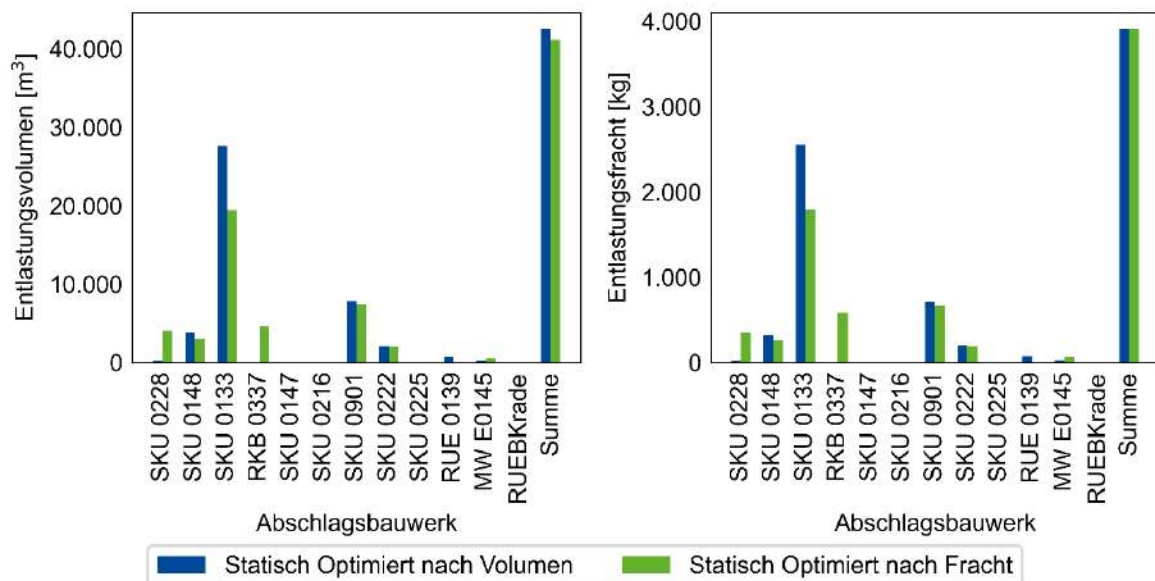


Abbildung 3.19: Entlastungsvolumen und Entlastungsfracht der 12 Optimierungereignisse mit statischer Volumen- und Fracht-Optimierung

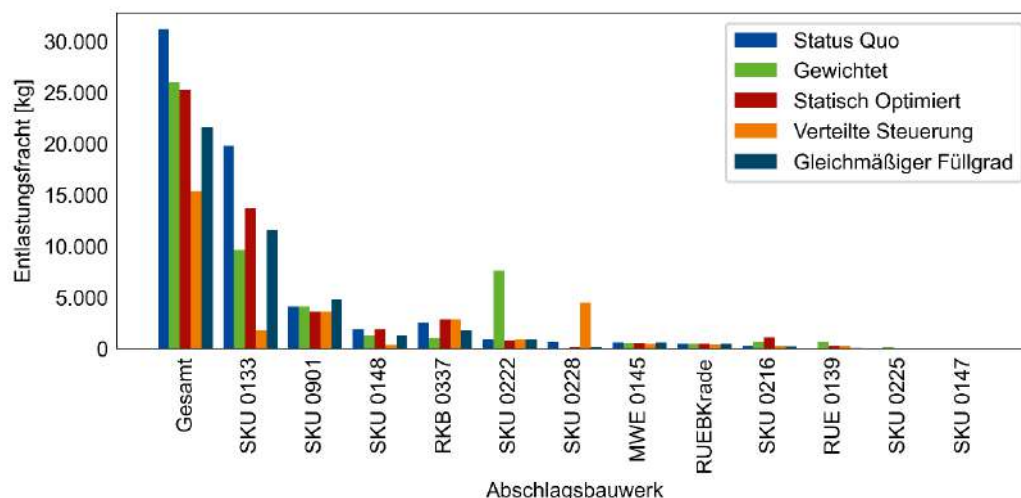


Abbildung 3.20: Rechnerische Entlastungsfrachten der volumenbasierten Steuerungen

Auf Basis der AFS-Konzentrationsmessungen am RKB 0337 wurde eine Steuerung für die RWP 0335 entwickelt. Ziel dieser Steuerung ist es, sauberes Niederschlagswasser mit AFS-Konzentrationen unter 50 mg/l (DWA-A 102-2/BWK-A 3-2) über das RKB 0337 abzuleiten, während verschmutztes Wasser über das Regenwasserpumpwerk (RWP) 0335 zur Kläranlage gefördert wird. Zum Vergleich wird eine Volumensteuerung herangezogen, welche das Speichervolumen des RKB 0337 optimal ausnutzt, indem das RWP 0335 erst aktiviert wird, wenn das Becken vollständig gefüllt ist. Für die Auswertung stehen keine Messreihen der AFS-Konzentrationen im Zufluss des RKB 0337 während Niederschlagsereignissen mit Abschlüssen am RKB 0337 und Unterstrom am SKU 0133 zur Verfügung. Um die Wirksamkeit

der entwickelten Steuerung dennoch zu bewerten, wurde das Abfluss/Zufluss-Verhältnis, zwischen der zufließenden und der abgepumpten AFS-Fracht bestimmt. Dadurch lässt sich abschätzen, in welchem Maße die über das RKB 0337 abgeleitete AFS-Fracht durch die Steuerung beeinflusst wird. Es wurden fünf Ereignisse ausgewählt, bei denen die RWP für beide Steuerungen aktiviert wurde. Die Abfluss-/Zufluss-Verhältnisse zeigen, dass mit der Frachtsteuerung mehr Fracht über die RWP zur Kläranlage gepumpt wird als mit der Volumensteuerung (vgl. Tabelle 3.9). Daraus resultiert, dass sauberes Wasser im RKB gespeichert wird und bei starken Zuflussmengen abgeschlagen werden würde. Diese Steuerungsevaluierung sollte allerdings mit besserer Datengrundlage wiederholt werden.

Tabelle 3.9: Abfluss/Zufluss-Verhältnis der AFS-Fracht mit Steuerung am RKB 0337

Ereignis	Volumensteuerung	Frachtsteuerung
1	0,00022	0,64
2	0,16	0,67
3	0,42	0,65
4	0,033	0,41
5	0,063	0,68

Vor dem Hintergrund der First-flush-Charakteristik wurde eine implizite Frachtsteuerung für das Hubwehr 0301 entwickelt, die darauf abzielt, die erste Abflussswelle in den Becken vom RRB 0301 zu speichern, um den Abschlag besonders verschmutzten Wassers am SKU 0133 zu vermeiden. Die Steuerung basiert auf einer Fortentwicklung der Regelung des Hubwehres in der verteilten Steuerung. Dabei wird das Wehr schon früher geschlossen: sofern der Abfluss im Zulauf des Beckens 200 l/s überschreitet, die Becken noch nicht gefüllt sind und zuvor keine Spülung stattgefunden hat. Durch diese Steuerung kann die erste Abflussswelle gezielt in den Becken zurückgehalten und somit die erste Entlastungswelle am SKU 0133 reduziert werden. Der Effekt der Steuerung ist für ein Ereignis beispielhaft in Abbildung 3.21 dargestellt. Zu sehen ist das Durchflussvolumen bezogen auf das abgeflossene Volumen dargestellt in mm Regen. Zu sehen ist, dass der Speicher (RRB 0301) in der first-flush Steuerung früher gefüllt wird und die Entlastung (am SKU 0133) in diesem Fall stärker später stattfindet.

Auf Basis der Messwerte wurde auch eine Steuerung untersucht, die den first-flush in der Entlastung am SKU 0148 reduziert. Allerdings liegt im SKU 0148 nur eine Rohrdrossel vor und mit den Hochwasserschiebern im Zulaufpumpwerk der Kläranlage ist nur ein Effekt zu erreichen, wenn der Zufluss vom restlichen System komplett geschlossen wird. Da dieser Zufluss 80% des Einzugsgebietes entwässert, ist eine komplette Schließung im Betrieb nicht empfehlenswert. Somit konnten hier keine sinnvollen Steuerungskonzepte im bestehenden Netz erarbeitet werden.

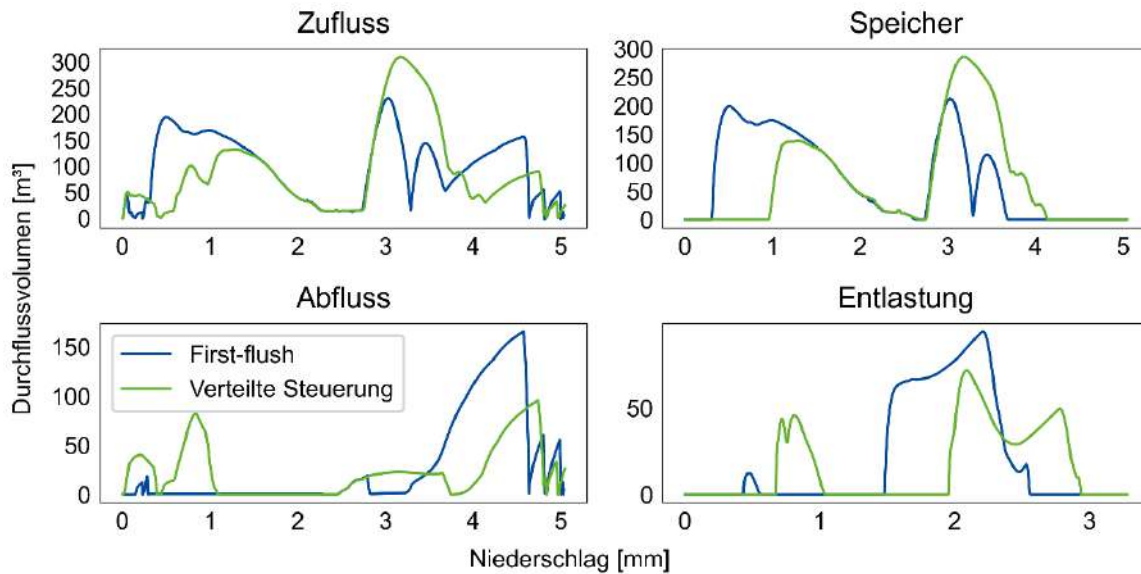


Abbildung 3.21: Auswirkungen des gezielten Rückhalts der ersten Abflusswelle

3.4.2.3 Potenzialanalyse

Insgesamt wurde gezeigt, dass mit den Sonden und den verfügbaren Modellen aktuell keine zentrale frachtbasierte Steuerung aufbaubar ist. Daher wurde im Projekt zusätzlich zu den bereits erläuterten Konzepten eine Methodik entwickelt, um die wirkungsvollsten Punkte für eine lokale Frachtoptimierung im Kanalnetz zu identifizieren. Auf Basis einer Literaturrecherche wurden Fälle abstrahiert unter denen eine lokale frachtbasierte Steuerung sinnvoll ist. Diese lassen sich unterteilen in die Füllung von Becken im Nebenschluss, ein Vergleich von Entlastungsbauwerken in Serien und parallelen Entlastungsbauwerken. Für eine Untersuchung, wo eine Steuerung das größte Potenzial hat, wurde das Kanalnetzmodell im Status-Quo und das Schmutzfrachtmodell im Modul WQ verwendet. Im Modell wurden anschließend vereinfachte Vergleiche berechnet, wie Entlastungen optimal umgelegt werden müssten zwischen Bauwerken oder wie Becken optimiert befüllt werden sollten. Die daraus errechneten Potenziale sind dabei als theoretische Potenziale anzusehen, die nicht in der Realität erreicht werden können, aber eine Einordnung geben, wo eine Messung und auch eine Steuerung den größten Effekt erzielen kann. Als Zeitraum wurden dafür alle Entlastungen in den Jahren 2021 und 2022 modelliert. Die Ergebnisse dieser Auswertung sind in Tabelle 3.10 dargestellt. Das lokale Potenzial bezieht sich auf die Entlastungsverringerung an den verglichenen Bauwerken und das globale auf die gesamte Entlastungsfracht.

Aus dem Vergleich wird sichtbar, dass das größte Potenzial am Becken im Nebenschluss RRB 0301 vorliegt. Was sich auch bereits in der volumenbasierten Steuerung gezeigt hat. Bei den parallelen und seriellen Entlastungen ist das Potenzial deutlich geringer, bei den Entlastungen in Serie aber noch deutlich höher. Für beide Fälle ergeben sich Bauwerke bei denen von keiner Verbesserung durch eine Frachtsteuerung ausgegangen werden kann.

Das Vorgehen muss noch mit anderen Schmutzfrachtmodellen und einer implementierten Volumensteuerung wiederholt werden, bevor mit der Tabelle Entscheidungen zum Einbau von Sonden getroffen werden. Es kann davon ausgegangen werden, dass sich das Potenzial am Becken im Nebenschluss dann deutlich verringert. Aber auch die Potenziale, welche mit dem SKU 0133 zusammenhängen, da sich hier die Entlastungen erheblich reduzieren sollten.

Tabelle 3.10: Theoretische lokale und globale Frachtreduktionspotenziale für eine lokale Frachtsteuerung im Vergleich zum Status-quo

Parameter	Einheit	Vergleiche zwischen Bauwerken (nur Nummern)				
Becken im Nebenschluss		RRB 0301				
Speicherbare Fracht der untenliegenden Entlastung	%	99,4				
globales Frachtreduktionspotenzial	%	75,3				
Parallele Entlastungen		0222-0225	0337-0901	0133-0147	0133-0148	0147-0148
lokales Frachtreduktionspotenzial	%	1,0	46,7	2,5	6,6	6,5
globales Frachtreduktionspotenzial	%	0,0	3,2	1,9	5,8	0,8
Entlastungen in Serie (Ausschnitt)		0337-0133	0228-0133	0901-0133	0145-0148	0225-0228
lokales Frachtreduktionspotenzial	%	23,0	19,1	9,2	17,9	6,0
globales Frachtreduktionspotenzial	%	17,4	14,5	7,0	2,3	0,1

3.5 Übertragbarkeit

Das Ziel der Steuerungsentwicklung war es möglichst einfache und übertragbare Konzepte zu erarbeiten. Die meisten volumenbasierten Konzepte beruhen auf der Anpassung von Drossелеinstellungen und sind damit leicht auf andere Netze übertragbar. Die Hubwehre, mit denen die größten Einsparungen erzielt werden können, sind eher eine Seltenheit. Das größte Potenzial lag allerdings primär auf Grund des hohen Speichervolumens an diesen Stellen vor. Daher können auch diese Konzepte mit anderen Aktuatoren in anderen Netzen verwendet werden. Die Konzepte setzen dabei entweder ein hydrodynamisches Modell voraus oder eine Messung für implizite Frachtsteuerungen.

Der Rhein stellt als einziger Vorfluter im Untersuchungsgebiet ein großes und vergleichsweise unsensibles Gewässer dar. Deshalb mussten in der Entwicklung eine Priorisierung von Entlastungen nicht mit aufgenommen werden, welche für andere Vorfluter allerdings ein wichtiges Werkzeug sein können. Um den Fall verschiedener Vorfluter und den Einfluss der Steuerungen auf den Gewässerschutz zu bewerten, wurde fiktiv die Einleitung in einen kleineren und sensibleren Vorfluter untersucht.

Als beispielhaftes Rechenbeispiel wurden zum Vergleich Messdaten (Pegel und Konzentrationen) der Messstation Bad Honnef Rhein (BAFG 2025) und Messstelle 003001 Eppinghoven an der Erft (MUNV 2025) verwendet. Die Erft wurde auf Grund der nahen

geographischen Lagen gewählt und da es sich um einen deutlich kleineren und potenziell sensibleren Vorfluter handelt, welcher je nach Witterung nur 0,5 bis 1% des Abflusses Rheins führt. Als Beispiel werden die Emissionen des SKU 0133 verwendet. Die Sondendaten zeigen hier zumeist eine konstante Entlastungskonzentration, was auch in der Rechnung angenommen wurde. Als Beispiel wurden die Modelldaten vom starken Regenereignis vom 23. und 24.06.2022 im Status-quo und mit einer verteilten Steuerung betrachtet. Dieses wurde ausgewählt, da die Flusspegel relativ niedrig geblieben sind und es trotzdem hohe Entlastungsvolumina gab. AFS-Messwerte waren nur für den Rhein verfügbar. Daher wurde als zweiter Parameter der TOC mitbetrachtet, da hier (s. Abbildung 3.11) eine gute Korrelation vom CSB zum AFS besteht und auch eine gute Korrelation zum TOC angenommen wird. Somit würde sich, durch eine Steuerung mit den untersuchten Sensoren, diese Konzentration direkt beeinflussen lassen. Als AFS-Emissionsdaten wurden die theoretischen mittleren Konzentrationen aus Tabelle 3.8 angesetzt. Für den TOC wurde eine Konzentration von 35 mg/l nach LANUV (2021) angenommen. Die Ergebnisse sind in Tabelle 3.11 dargestellt. Dabei zeigt sich, dass die Auswirkungen auf den Rhein, ob mit Steuerung oder ohne, sehr gering sind. Mit Blick auf die Erft zeigt sich aber, dass es zu erheblichen Einflüssen auf das Gewässer kommt, welche durch eine Steuerung erheblich reduziert werden könnten. Hier kann die Dynamik der Entlastungen auch sehr viel weiteres Potenzial bergen, um akute Belastungen der Gewässer zu verringern. Nach der Einleitung hätte das Gewässer im Status-quo nach Bewertung damit einen Zustand „nicht gut“ (OGewV). Auch bei einem Blick auf die jährlichen Emissionen in einen Vorfluter zeigt sich am Beispiel der Erft, dass - wenn das EZG Teil der angeschlossenen Siedlungen wäre - durch die Steuerung eine Reduzierung der TOC-Fracht von 4%. Somit zeigt sich, dass Steuerungen und eine Priorisierung an empfindlicheren Gewässern priorisiert vorangetrieben werden sollten.

Tabelle 3.11: Bewertung der Umweltqualitätsnormen und Änderung der Konzentrationen in Erft und Rhein anhand eines Beispielerignisses

Zustand	Rhein AFS [mg/l]	Rhein TOC [mg/l]	Erft TOC [mg/l]
Mittlere Konzentration Gewässer	14,45	3,47	3,58
Nach Entlastung im Status-quo	14,472 (+0,2%)	3,49 (+0,6%)	7,38 (+106,1%)
Nach Entlastung mit verteilter Steuerung	14,465 (+0,1%)	3,48 (+0,3%)	5,88 (+64,2%)

3.6 Ausblick

Die Erprobung der Messtechnik im Mischsystem hat gezeigt, dass die Anordnung der Sonden wesentlich für eine zuverlässige Messung ist. Daher sollten Sonden anders als hier im Projekt in Zukunft nach den Empfehlungen platziert werden. Im Projekt konnte gezeigt werden, dass der Schmutzfrachtverlauf gut abgebildet werden kann. Optimierungspotenzial besteht

allerdings in der Messgenauigkeit. Insbesondere beim Übergang zwischen Schmutzwasser und Mischwasser und zusätzlich zwischen Frachtspitzen und dem Ausklingen von Events ist weitere Arbeit notwendig, die Einflussfaktoren wie Saisonalität, Spülstoßausprägung oder der Verdünnung berücksichtigt. Eine automatisierte Erkennung ist als Resultat anzustreben. Eine bisher nicht durchgeführte Untersuchung ist die Fragestellung, inwiefern die Unsicherheiten in der Messtechnik bei parallelen Messungen einen Abgleich von Konzentrationen zur Steuerung erlauben.

Das entwickelte deterministische Wasserqualitätsmodell bietet keine ausreichende Genauigkeit zur Entwicklung von Steuerungen. Das Modell wurde allerdings verwendet, um eine Methodik zur Erfassung des Potenzials von lokalen frachtbasierten Steuerungen zu entwickeln. Die Potenzialanalyse ist noch für mehrere verschiedene Wasserqualitätsmodelle und unter Berücksichtigung von Volumensteuerungen ausstehend. Ebenfalls sollten die Empfehlungen verifiziert werden durch die genaue Simulation der lokalen Steuerungen.

Die volumenbasierten Steuerungen zeigen, dass weitere Optimierungsschritte vor der Implementierung durchgeführt werden sollten. Dies war im Projekt auf Grund der hohen Rechenzeit nicht möglich. Lösungswege zur Reduzierung der Rechenzeit könnte eine Vereinfachung des Modells sein, eine Eingrenzung der Optimierungsparameter, deren Bereiche oder die Möglichkeit einer weiteren Parallelisierung von Simulationsläufen.

Zur frachtbasierten Steuerungsentwicklung sollte in Zukunft der Blick stärker auf messdatengetriebene Modelle gelegt werden. Hier sollte untersucht werden, wie ein Zusammenspiel aus messdatengetriebenen Frachtsteuerungen mit volumenbasierten Steuerungen in Eintracht gebracht werden kann, da die Abdeckung eines gesamten Systems mit Sonden unrealistisch ist. Somit wird das größte Potenzial für eine übertragbare Steuerung aus einer Synergie zwischen zentralen volumenbasierten und lokalen Frachtbasierten Konzepten gesehen.

4 Fazit

Im Rahmen dieses Forschungsprojekts wurden innovative Ansätze zur frachtbasierten Kanalnetzsteuerung entwickelt und bewertet, um das Stoffstrommanagement in Mischkanalsystemen zu optimieren. Die Untersuchung zeigt, dass eine gezielte Steuerung auf Basis von Frachtmessungen eine deutliche Entlastung der Gewässer ermöglichen kann.

Durch die Analyse verschiedener Steuerungsstrategien wurde deutlich, dass einfache volumenbasierte Ansätze im Vergleich zur ungesteuerten Einleitung Emissionen in Gewässer deutlich reduziert können. Insbesondere können bei leichtem Regen Entlastungen komplett eliminiert werden. Eine weitere Frachtoptimierung macht erst in dem Moment Sinn, in dem das Kanalnetzvolumen bereits vollständig ausgenutzt wird. Daher besteht bei moderaten bis starken Regen das größte Umweltentlastungspotenzial für frachtbasierte Steuerungen. Hierbei zeigt sich, dass eine qualitätsabhängige Steuerung nur durch statische

Verschmutzungsgrade keine deutliche Reduktion der Gesamtemissionen aufweist. Dies verdeutlicht die hohe Relevanz der Dynamik. In impliziten Steuerungen wurden erfolgreich dynamische Informationen genutzt, um die emittierte Fracht zu verringern. Sowohl die volumenbasierten als auch die frachtbasierten Steuerungen basieren auf einfachen heuristischen Konzepten und sind somit einfach und effizient übertragbar.

Ein weiterer wesentlicher Bestandteil des Projekts war die Entwicklung eines praxistauglichen Systems zur Online-Frachtdatenerfassung. Im Projekt konnte gezeigt werden, dass die Messtechnik langfristig in der Mischwasserkanalisation eingesetzt werden kann. Dafür sind die im Projekt erarbeiteten Empfehlungen zur Sonden-Platzierung zu befolgen. Die Messtechnik bietet so eine umsetzbare und übertragbare Lösung zur Erfassung der Schmutzfrachtdynamik in der Kanalisation. Defizite sind aktuell noch in der Genauigkeit des Messsystems vorhanden. Zur Nutzung des Messsystems zur Steuerung werden lokale frachtbasierte Konzepte vorgeschlagen. Die Einbauorte dafür können mit Hilfe der vorgestellten Potenzialanalyse bestimmt werden.

Die Ergebnisse des Projekts verdeutlichen das hohe Potenzial frachtbasierter Steuerungskonzepte für die Siedlungsentwässerung. Sie liefern wertvolle Erkenntnisse für die zukünftige Implementierung solcher Systeme und stellen eine Grundlage für weiterführende Forschung sowie praktische Anwendungen dar.

5 Literaturverzeichnis

Al Ali, Saja; Bonhomme, Céline; Chebbo, Ghassan (2016): Evaluation of the Performance and the Predictive Capacity of Build-Up and Wash-Off Models on Different Temporal Scales. In: *Water* 8 (8), S. 312. DOI: 10.3390/w8080312.

Bachmann, Anna; Wetzel, Jonas; Dittmer, Ulrich (2016): Online-Qualitätsmessungen zur Abschätzung des Steuerungspotenzials im Mischsystem. In: 6. Aqua Urbanica - Miss es oder vergiss es! Aqua Urbanica. Rigi Kaltbad, Schweiz.

Bachmann-Machnik, Anna (2020): Optimierung des Betriebs von Kanalnetzen im Mischsystem auf Basis von Online-Messdaten (*Optimization of the operation of sewer networks in the combined sewer system based on online measurement data*). Doctoral thesis. Kaiserslautern. Online verfügbar unter <https://d-nb.info/1204923663/34>, zuletzt geprüft am 05.01.2024.

BAFG (2025): Flussgebietsgemeinschaft Rhein: Zahlentafeln der chemisch-physikalischen Untersuchungen. Hg. v. Bundesanstalt für Gewässerkunde. Online verfügbar unter <https://fgg-rhein.bafg.de/dkrr/>.

Beier, Maïke; Pabst, Michael; Rosenwinkel, Karl-Heinz; Schütze, Manfred; Alex, Jens; Jumar, Ulrich et al. (2012): Nachhaltige Bewirtschaftung von Kläranlagen zur energieoptimierten Abwasserreinigung unter Verwendung einer erweiterten vorkonfektionierten Kanalnetzsteuerung. Hannover.

Borsányi, Péter; Benedetti, Lorenzo; Dirckx, Geert; Keyser, Webbey de; Muschalla, Dirk; Solvi, Anne-Marie et al. (2008): Modelling real-time control options on virtual sewer systems. In: *Journal of Environmental Engineering and Science* 7 (4), S. 395–410. DOI: 10.1139/S08-004.

Campisano, Alberto; Cabot Ple, J.; Muschalla, Dirk; Pleau, Martin; Vanrolleghem, Peter A. (2013): Potential and limitations of modern equipment for real time control of urban wastewater systems. In: *Urban Water journal*, S. 300–311. DOI: 10.1080/1573062X.2013.763996.

Cembellín, Antonio; Francisco, Mario; Vega, Pastora (2020): Distributed Model Predictive Control Applied to a Sewer System. In: *Processes* 8 (12), S. 1595. DOI: 10.3390/pr8121595.

Cembellín, Antonio; Francisco, Mario; Vega, Pastora (2023): Optimal Operation of a Benchmark Simulation Model for Sewer Networks Using a Qualitative Distributed Model Predictive Control Algorithm. In: *Processes* 11 (5), S. 1528. DOI: 10.3390/pr11051528.

Clemens-Meyer, Francois H. L. R.; Lepot, Mathieu; Blumensaat, Frank; Leutnant, Dominik; Gruber, Guenter (2021): Data validation and data quality assessment, S. 327–390. DOI: 10.2166/9781789060119_0327.

DHI (2021): MIKE URBAN. Online verfügbar unter <https://wiki.mikepoweredbydhi.com/mikeurban/start>.

DHI (2023): MIKE+ Collection System User Guide.

Dirckx, Geert; Thoeye, Chris; Gueldre, Greeet de; van de Steene, Bert (2011): CSO management from an operator's perspective: a step-wise action plan. In: *Water Sci Technol* 63 (5), S. 1044–1052. DOI: 10.2166/wst.2011.288.

DWD (2023): Wetter- und Klimalexikon. Hg. v. Deutscher Wetterdienst. Online verfügbar unter <https://www.dwd.de/DE/service/lexikon/Functions/glossar.html?lv2=100578&lv3=100604>, zuletzt aktualisiert am 10.07.2023.

Eggert, Udo; Ellenbroek, Hans; Groote Beverborg, Anita Oude; Gieske, Markus (2014): Einführung einer Fuzzy-gestützten Abwassersystembewirtschaftung der Technischen Betriebe Rheine und der Gemeinde Oldenzaal. Hg. v. INFA. Ahlen.

Einfalt, Thomas; Stölting, Birgit (2002): Real-Time Control for Two Communities - Technical and Administrative Aspects. In: Eric W. Strecker und Wayne C. Huber (Hg.): *Global Solutions for Urban Drainage*. Ninth International Conference on Urban Drainage (9ICUD). Lloyd Center Doubletree Hotel, Portland, Oregon, United States, September 8-13, 2002. Reston, VA: American Society of Civil Engineers, S. 1–11.

Fuchs, Lothar; Seggelke, Katja; Krebs, Peter (2006): Entwicklung eines integrierten Steuerungs- und Betriebsverfahrens für die Teilsysteme Kanalnetz und Kläranlage zur deutlichen Reduzierung der Gewässerbelastung - Abschlussbericht Phase I. Hg. v. DBU.

Graner, Martin; Nümm, Hanstheo Maria; Staubach, Martin; Haag, Tanja; Brahmi, Daniela; Hoen, Cornelia et al. (2012): Abschlussbericht KANNST. Integrierte Optimierung von Kanalisationssystemen und Kläranlagen mit Computational Intelligence Tools. Online verfügbar unter https://www.lanuv.nrw.de/fileadmin/tx_mmkresearchprojects/Abschlussbericht_KANNST_V6.2.pdf.

Hochedlinger, Martin; Hofbauer, Peter; Wandl, Gerald; Meyer, S.; Rauch, Wolfgang; Kroiss, Helmut; Heindl, M. (2006): Online UV-VIS Measurements—The Basis for Future Pollution Based Sewer Real Time Control in Linz.

Kirstein, Nadia S. V.; Mikkelsen, Peter Steen; Rungø, Morten; Löwe, Roland (2024): Automated screening of control potential with spatially explicit results to support dialogue about sewer overflow reduction and beyond. In: *Water research* 256, S. 121527. DOI: 10.1016/j.watres.2024.121527.

LANUV (2021): Entwicklung und Stand der Abwasserbeseitigung in Nordrhein-Westfalen. 19. Aufl. Hg. v. Ministerium für Umwelt, Landwirtschaft, Natur- und Verbraucherschutz des

Landes Nordrhein-Westfalen. Düsseldorf. Online verfügbar unter https://www.lanuv.nrw.de/fileadmin/lanuv/wasser/abwasser/lagebericht/00_EStAb2020_Gesamtversion.pdf, zuletzt geprüft am 03.05.2024.

Larrarte, Frédérick (2008): Suspended solids within sewers: an experimental study. In: *Environ Fluid Mech* 8 (3), S. 249–261. DOI: 10.1007/s10652-008-9073-8.

Ly, Duy Khiem; Maruéjols, Thibaud; Binet, Guillaume; Bertrand-Krajewski, Jean-Luc (2019): Application of stormwater mass–volume curve prediction for water quality-based real-time control in sewer systems. In: *Urban Water Journal* 16 (1), S. 11–20. DOI: 10.1080/1573062X.2019.1611885.

Madoux-Humery, Anne-Sophie; Dorner, Sarah M.; Sauvé, Sébastien; Aboulfadl, Khadija; Galarneau, Martine; Servais, Pierre; Prévost, Michèle (2015): Temporal analysis of E. coli, TSS and wastewater micropollutant loads from combined sewer overflows: implications for management. In: *Environmental science. Processes & impacts* 17 (5), S. 965–974. DOI: 10.1039/C5EM00093A.

Mahmoodian, Mahmood; Delmont, Orianne; Schutz, Georges (2017): Pollution-based model predictive control of combined sewer networks, considering uncertainty propagation. In: *Int. J. SDP* 12 (01), S. 98–111. DOI: 10.2495/sdp-v12-n1-98-111.

Männig, Frank (2015): 20 Jahre Kanalnetzsteuerung in Dresden. Hg. v. Stadtentwässerung Dresden GmbH. Gelsenkirchen.

Mathevet, Thibault; Michel, C.; Andréassian, Vazken; Perrin, C. (2006): A bounded version of the Nash-Sutcliffe criterion for better model assessment on large sets of basins. In: *IAHS-AISH Publication* 307, S. 211–219.

DWA-A 102-2/BWK-A 3-2, Dezember 2020: Merkblatt DWA-M 102-2/BWK-M 3-2 Grundsätze zur Bewirtschaftung und Behandlung von Regenwetterabflüssen zur Einleitung in Oberflächengewässer - Teil 2: Emissionsbezogene Bewertungen und Regelungen.

MUNV (2025): ELWAS-WEB – Wasserdaten NRW. Hg. v. Landesbetrieb Information und Technik Nordrhein-Westfalen (IT.NRW) und Ministerium für Umwelt, Naturschutz und Verkehr des Landes Nordrhein-Westfalen. Online verfügbar unter <https://www.elwasweb.nrw.de/elwas-web/index.xhtml>.

Raith, Katja Ines; Hoppe, Holger; Kutsch, Stefan; Ante, Jens; Massing, Christian (2017): Qualitätsabhängige Kanalnetzsteuerung. Konzeption und Umsetzung lokaler und stadtgebietsweiter Steuerungsstrategien (*Quality-dependent sewer network control. Design and implementation of local and city-wide control strategies*). Erkrath. Online verfügbar unter <https://elib.uni-stuttgart.de/bitstream/11682/9487/1/Raith%2c%20Hoppe%20et%20al.%202017%20->

%20Qualit%c3%a4tsabh%c3%a4ngige%20Kanalnetzsteuerung.pdf, zuletzt geprüft am 22.12.2021.

EU-KARL, A9-0276/2023 (September 2023): RICHTLINIE DES EUROPÄISCHEN PARLAMENTS UND DES RATES über die Behandlung von kommunalem Abwasser (Neufassung). Online verfügbar unter https://www.europarl.europa.eu/doceo/document/A-9-2023-0276-AM-268-268_EN.pdf, zuletzt geprüft am 11.06.2024.

ATV-A 128, 1992: Richtlinien für die Bemessung und Gestaltung von Regenentlastungsanlagen in Mischwasserkanälen (April 1992).

Risholt, L. P.; Schilling, Wolfgang; Erbe, Volker; Alex, Jens (2002): Pollution based real time control of wastewater systems. In: *Water Sci Technol* 45 (3), S. 219–228.

Sage, Jérémie; Bonhomme, Céline; Al Ali, Saja; Gromaire, Marie-Christine (2015): Performance assessment of a commonly used "accumulation and wash-off" model from long-term continuous road runoff turbidity measurements. In: *Water research* 78, S. 47–59. DOI: 10.1016/j.watres.2015.03.030.

Schilperoort, Rémy Peter Sander; Gruber, Guenter; Flamink, C. M. L.; Clemens, Francois; van der Graaf, J. H. J. M. (2006): Temperature and conductivity as control parameters for pollution-based real-time control. In: *Water Sci Technol* 54 (11-12), S. 257–263. DOI: 10.2166/wst.2006.744.

SCHMITT, T. G. (1994): Detaillierte Schmutzfrachtberechnung nach ATV-Arbeitsblatt A-128. In: *Korrespondenz Abwasser, Abfall (KA)* (12), Artikel 41.

Sedki, Karim; Neumann, Jonas; Klippstein, Christian; Dittmer, Ulrich (2023): Einflüsse auf die Kalibrierbarkeit urbanhydrologischer Modelle. Teil 2: Ergebnisse und Diskussion. In: *Korrespondenz Abwasser, Abfall (KA)* 70 (6), S. 424–432. Online verfügbar unter <https://de.dwa.de/de/ka-korrespondenz-abwasser-abfall.html>.

Sitzmann, Dieter; Wenzel, Stefan; Schacherl, Thomas; Henschel, Frank (2023): Entwässerungsplanung für die Stadt Nürnberg. Aufstellung und Kalibrierung des Kanalnetzmodells mit hydrodynamischer Berechnung. In: *Korrespondenz Abwasser, Abfall (KA)* 70 (3), S. 176–189. Online verfügbar unter <https://de.dwa.de/de/ka-korrespondenz-abwasser-abfall.html>.

Troutman, Sara C.; Love, Nancy G.; Kerkez, Branko (2020): Balancing water quality and flows in combined sewer systems using real-time control. In: *Environ. Sci.: Water Res. Technol.* 6 (5), S. 1357–1369. DOI: 10.1039/C9EW00882A.

van der Werf, Job Augustijn; Kapelan, Zoran; Langeveld, Jeroen (2021): Quantifying the true potential of Real Time Control in urban drainage systems. In: *Urban Water journal* 18 (10), S. 873–884. DOI: 10.1080/1573062X.2021.1943460.

OGewV (2016): Verordnung zum Schutz der Oberflächengewässer (BGBl. I S. 1373), die zuletzt durch Artikel 2 Absatz 4 des Gesetzes vom 9. Dezember 2020 (BGBl. I S. 2873) geändert worden ist. Online verfügbar unter https://www.gesetze-im-internet.de/ogewv_2016/OGewV.pdf.

Antragsteller



Projektpartner



Entwicklung eines integralen Mess-, Steuerungs- und Regelungstechnik-(MSR-) Konzepts zur frachtbasierten Echtzeit-Steuerung der Abwasserableitung in Kanalnetzen zur Entlastung der Gewässer