

## Dezentrale Niederschlagswasserbehandlungsanlagen – Grenzen der Wirksamkeit

Christian Lieske<sup>1,2\*</sup>, Mathias Uhl<sup>1</sup> und Malte Henrichs<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Institut für Wasser-Ressourcen-Umwelt (IWARU), Fachhochschule Münster, Corrensstr. 25, 48149 Münster, Deutschland

<sup>2</sup> Stadt Münster, Amt für Tiefbau und Mobilität Münster - Projektplanung Stadtentwässerung, Albersloher Weg 33, 48148 Münster, Deutschland

\*Korrespondierender Autor, E-Mail: [christian.lieske@fh-muenster.de](mailto:christian.lieske@fh-muenster.de)

**Kurzfassung:** Die Entwicklung eines kontinuierlichen Monitoringsystems, basierend auf Trübung als Surrogatparameter der Feststoffbelastung im Regenwasserabfluss erfolgte in Münster an drei dezentralen Anlagen und einem Regenklärbecken von 2017 bis 2022. Die Regenwasserabflüsse der Einzugsgebiete sind vom AFS63-Aufkommen dominiert mit  $f_{\text{AFS63,Median}} = 66\text{-}85\%$  und mittleren  $C_{R,\text{AFS63}}$  von 30 - 140 mg/L. In insgesamt über  $n = 400$  validierten Ereignissen zeigten die Anlagen Langzeitwirkungsgrade für AFS von 15 - 60 % und für AFS63 von 8 - 42 %. Der Wirkungszusammenhang entsprechend DWA-A 102-2 Bild B.2 kann bestätigt werden, bei entsprechender konstruktiver Gestaltung der Systeme. Die Beprobung der abgesetzten Partikel bei der jährlichen Reinigung der Anlagen unterstützt weiter den Zusammenhang von  $q_{A,\text{max}} \sim \eta_{\text{Sed}}$  mit AFS63-Anteilen im Zulaufsediment zwischen 3 - 7 % bei  $q_A = 10\text{ m/h}$  und 50 ~ 60 % bei  $q_A = 4\text{ m/h}$ , die in Bezug zum AFS63-Stoffabtrag des Einzugsgebietes gesetzt werden müssen. Die Schwermetallkonzentrationen lagen mit  $C_{\text{Kupfer}} = 3850\text{ mg/kg TS}$  und  $C_{\text{Zink}} = 3030\text{ mg/kg TS}$  im Einzugsgebiet ohne Kategorie III Flächen am höchsten.

**Key-Words:** Feststoffaufkommen AFS63 und AFS, dezentrale Behandlung, AFS63 Rückhalt, in-situ Monitoring, Unsicherheitsbestimmung der Wirksamkeit, Einfluss von Streusalz

## 1 Einleitung

Die Reduktion der stofflichen Belastung von AFS und AFS63 im Regenwasserabfluss erfordert in urbanen Räumen immer öfter eine gezielte und ortsnahe Behandlung, um die Erfordernisse nach (DWA-A 102-2/ BWK-A 3-2 2020) zu erfüllen. Neben den baulichen Herausforderungen im Bestand muss die Wirksamkeit dezentraler Anlagen

im Vergleich zu zentralen Anlagen für Planer und Betreiber bewertet und eine mögliche Nutzung der Ressource Wasser auf Einschränkungen untersucht werden. Die labortechnische Prüfung von Behandlungsanlagen auf den Feststoffrückhalt, die Schwermetallbindung sowie Spurenstoffelemination erfolgt im DACH-Raum z.B. nach der ÖNorm B 2506-3, dem DIBt-Verfahren oder dem VSA Adsorbertest.

Die unter Feldbedingungen variablen stofflichen und hydraulischen Einflussgrößen bleiben dabei jedoch unberücksichtigt. Dieser Fragestellung wurde in Münster in zwei Projektphasen von 2017-2022 an drei dezentralen System sowie einem Regenklärbecken im Projekt **DezNWBA** nachgegangen („Leistungsfähigkeit großer **dezentraler Niederschlagswasserbehandlungsanlagen** unter realen Betriebsbedingungen (Uhl et al. 2024).

Das Aufkommen von AFS und AFS63, die Belastung der abgesetzten Partikel mit Schwermetallen sowie die erzielte Langzeitwirksamkeit, abgeleitet aus kontinuierlichen Trübungsdaten mit Bewertung der Unsicherheiten nach (Bertrand-Krajewski et al. 2021), können erstmalig umfassend vorgestellt werden.

Die Bewertung des verlässlichen AFS und AFS63-Rückhalts durch dezentrale Behandlungsanlagen unter in-situ Bedingungen steht insbesondere aufgrund der vielfach neu entstehenden Anzahl an Betriebspunkten zusammen mit der angespannten Fachkräfteverfügbarkeit im Fokus von Anbietern und Nutzern. Die Abwägung der Anlagendimensionierung, des Betriebskonzepts und der teilweise messtechnische Nachweis über variable Zeiträume zur Gewährung von Zuschüssen stellen Kommunen vor eine Vielzahl an Herausforderungen. Die Ergebnisse der Langzeituntersuchungen in Münster benennen daher auch die betrieblichen Aspekte wie das Verhalten im Dauerstau bei gleichzeitigem Auftreten von hohen Leitfähigkeiten im Winter.

## 2 Material und Methoden

### 2.1 Behandlungsanlagen und Gebietseigenschaften

Das kontinuierliche Monitoringverfahren wurde zuerst an zwei dauergestauten Sedimentationsanlagen erprobt und entwickelt und im Weiteren auf eine Filterschichtanlage und ein Regenklärbecken, beide ebenfalls im Dauerstau, übertragen. Die zu behandelnden Gebiete in Münster wurden gemäß (DWA-A 102-2/ BWK-A 3-2 2020)) anhand ihrer Flächennutzung und dem somit potentiellen AFS63-Stoffabtrag  $b_{R,a,AFS63}$  von gering (Kategorie I) bis stark belastet (Kategorie III) eingestuft (vgl. Tabelle 1). Die Anforderung einer Niederschlagswasserbehandlung ergibt sich aus dem Vergleich des resultierenden Stoffabtrags  $b_{R,a,AFS63}$  gegenüber dem erlaubten Stoffeintrag  $b_{R,e,zul,AFS63}$  von 280 kg/(ha\*a).

Tabelle 1: Gebietseigenschaften hinsichtlich der AFS63-Belastung.

Standort	Eigenschaft	Einheit	Kategorie I - gering	Kategorie II - mäßig	Kategorie III - stark
Am Stadtgraben	Flächenanteil	%	40	10	50
	$b_{R,a,AFS63}$	kg/(ha*a)	545		
Canisiusgraben	Flächenanteil	%	59,7	40,3	-
	$b_{R,a,AFS63}$	kg/(ha*a)	380		
Grevener Straße	Flächenanteil	%	40,8	12,4	46,8
	$b_{R,a,AFS63}$	kg/(ha*a)	536		

### 2.1.1 „Am Stadtgraben“ – Anlage I

„Am Stadtgraben“ ( $A_{b,a} = 2,5$  ha) ist eine *SediPipe XL 600/12* im Bypass installiert (Anlage I, Fränkische Rohrwerke Gebr. Kirchner GmbH) welche über eine Peristaltikpumpe hydraulisch konstant beschickt wird ( $Q_{zu} = Q_{R,krit} = 6$  L/s, bei  $q_A = 4$  m/h). Das Gebiet ist geprägt von einer 4-spurigen Hauptverkehrsstraße (30.000 KFZ/24h), somit stammt der Regenwasserabfluss von mäßig bis stark belasten Flächen. Für eine Zieloberflächenbeschickung von  $q_A = 4$  m/h dürfen laut Hersteller 0,4 ha befestigte Fläche angeschlossen werden.

### 2.1.2 „Canisiusgraben“ – Anlage II

„Am Canisiusgraben“ ( $A_{b,a} = 5,7$  ha) ist der *Lamellenklärer ViaTub 18R63* im Hauptschluss mit einer Drossel installiert (Anlage II, Mall GmbH). Die Dimensionierung erfolgte auf eine Oberflächenbeschickung von  $q_{A,max} = 10$  m/h. Durch das Drosselbauwerk erfolgt die Beschickung nicht konstant, sondern hydraulisch variabel bis  $Q_{Dr,Zu} = Q_{R,krit} = 35$  L/s. Nach den ersten Betriebsjahren wurde die Drossel zur Anlage weiter reduziert, um eine geringere Oberflächenbeschickung von  $q_A = 4$  m/h zu erzielen. Das Gebiet ist durch eine Wohnbesiedlung sowie zwei Straßen mit 9.000 und 13.000 DTV geprägt, sodass keine stark belasteten Flächen abflusswirksam sind.

### 2.1.3 Grevener Straße – Anlagen III und IV

Der Regenwasserabfluss vom Einzugsgebiet „Grevener Straße“ ( $A_{b,a} = 7,1$  ha) wird im Hauptstrom in einem *Regenklärbecken mit Dauerstau* (Anlage IV,  $q_{A,max} = 10$  m/h,  $Q_{R,krit} = 106,5$  L/s,  $V = 110$  m<sup>3</sup>) behandelt. Als Hauptemittent von verkehrsbürtigen Schadstoffen gilt die 4-spurige, stark befahrene Grevener Straße mit 22.400 KFZ/24 h. Für das Forschungsprojekt wurde die Filterschachtanlage *Hydrosystem 1000 heavy traffic* im Bypass errichtet ( $q_A = 4$  m/h,  $Q_{R,krit} = 0,75$  L/s, 3P Technik Filtersysteme GmbH). Es handelt sich um eine Anlage mit vorgefüllten Filtereinsätzen, die wie Anlage I hydraulisch konstant mit einer Peristaltikpumpe beschickt wird. Zusätzlich

zum kontinuierlichen Monitoring werden *Anlage III* und IV bei selektiven Ereignissen am Zu- und Ablauf auf Gesamtkupfer- und Gesamtzinkkonzentrationen untersucht.

## 2.2 Monitoringmethodik

### 2.2.1 Referenzparameter AFS63 und Surrogatparameter Trübung

Mit der Einführung des DWA-A 102-2/ BWK-A 3-2 2020 ist die Fraktion AFS63 (Partikel kleiner 63  $\mu\text{m}$ ) als Referenzparameter definiert für die akkumulierende Wirkung der stofflichen Belastung von Regenwetterabflüssen. Die Bestimmung erfolgt mittels Filtration entsprechend der Methodik von (Dierschke und Welker 2015) die jedoch Membranfilter mit 0,45  $\mu\text{m}$  Porenweite nutzen. Eine Anpassung erfolgte im Projektverlauf nach „LANUV-Methode“ durch den Wechsel auf Glasfaserfilter (Porenweite 1  $\mu\text{m}$ ), welche in internationalen Methoden zur Feststoffbestimmung Anwendung finden.

Die Trübung einer Niederschlagswasserprobe korreliert mit der Konzentration an AFS. Eine kontinuierliche Trübungsmessung kann daher zur Herleitung einer kontinuierlichen AFS-Zeitreihe verwendet werden. Die Leistungsfähigkeit dezentraler Niederschlagswasserbehandlungsanlagen wird somit anhand kontinuierlicher AFS-Zeitreihen ermittelt. Hierzu werden die Anlagen im Zu- und Ablauf mit Trübungssensoren ausgestattet, um Frachtbilanzen und -wirkungsgrade zu bestimmen.

Grundlage dafür ist die Herleitung einer matrix- und standortspezifischen Umrechnungsfunktion, die häufig durch eine lineare Regression beschrieben werden kann (Hannouche et al. 2011; Leutnant et al. 2016; Métadier und Bertrand-Krajewski 2012). Eine gesetzte Randbedingung für die lineare Regression ist (0/0), also ihr Verlauf durch den Koordinatenursprung der X- und Y-Achse. Diese Bedingung legt fest, dass bei einer Konzentration von 0 mg/L AFS ebenfalls nur eine Trübung von 0 FNU auftreten kann. Die für die Regressionsauswertung gewählten Kriterien zur Prüfung der Datenpunkte und Ausreißeranalyse sind:

- Abstand der standardisierten Residuen zur ermittelten Regression  $|d| < 3$
- Iterative Ausreißerprüfung je Probenahmeposition, bezogen auf das Verhältnis Trübung/AFS-Konzentration, mit dem Ausreißerkriterium Verhältnis  $< 3 \cdot \text{Quartil} + 1,5 \cdot \text{IQR}$
- Iterative Ausreißerprüfung je Probenahmeposition, bezogen auf das Verhältnis AFS-Konzentration/Trübung, mit dem Ausreißerkriterium Verhältnis  $< 3 \cdot \text{Quartil} + 1,5 \cdot \text{IQR}$

### 2.2.2 Ermittlung der Leistungsfähigkeit

Die Leistungsfähigkeit der Anlagen wird anhand des Frachtwirkungsgrades bewertet, der durch den Quotienten aus Ablauf- ( $B_{E,Ab}$ ) und Zulauftracht ( $B_{E,Zu}$ ) allgemein in Gleichung (2.1) für einen Ereigniszeitraum  $E$  beschrieben wird.

$$\text{Frachtwirkungsgrad (\%): } \eta_{E,B} = \left(1 - \frac{B_{E,Ab}}{B_{E,Zu}}\right) * 100 \quad (2.1)$$

Zur Ermittlung von jahres- oder ereignisspezifischen Zu- und Ablauffrachten werden Daten der kontinuierlichen Trübungsmessung mit einer matrix- und standort-spezifischen Umrechnungsfunktion transformiert, so dass im Ergebnis eine kontinuierliche AFS-Zeitreihe  $C_{AFS,i}(t)$  für den jeweiligen Messort vorliegt. Die erforderlichen Umrechnungsfunktionen werden anhand von Proben hergeleitet. Das Summenprodukt aus AFS-Konzentration  $C_{AFS,i}(t)$  und Anlagenzufluss  $Q_i(t)$  führt zur ereignisspezifischen AFS-Stofffracht  $B_{E,AFS,x}$  (Gleichung (2.2)) an der Probenahme-position  $x$  ( $x$  = Zulauf oder Ablauf).

$$\text{AFS-Stofffracht (kg): } B_{E,AFS,x} = \sum_{i=1}^n Q_i C_{AFS,i} \Delta t \quad (2.2)$$

Anschließend werden anhand von Niederschlagsdaten relevante Ereignisse aus dem Messdatenkontinuum selektiert, die die Kriterien i) minimale Niederschlagshöhe  $h_N > 1 \text{ mm}$  oder ii) minimale Niederschlagsintensität im 60-Minuten-Intervall  $i_{N,max60} > 1 \text{ mm/h}$  erfüllen. Eine finale Prüfung der Ereignisse wird visuell durchgeführt und kann die Anzahl auswertbarer Ereignisse reduzieren. Für jedes Ereignis werden Kennwerte zu Niederschlag, Durchfluss, Stoffkonzentration und Frachtwirkungsgrad berechnet.

Der Zusammenhang von Trübung und AFS und somit auch der resultierende Frachtwirkungsgrad  $\eta_{AFS}$  gelten für die Gesamtheit der abfiltrierbaren Stoffe (Partikel 0,45-2000  $\mu\text{m}$ ). Um den AFS63-Frachtwirkungsgrad  $\eta_{AFS63}$  abzuschätzen wird nach (Lieske et al. 2021b) der aus den über 1 Jahr generierten Einzelmischproben ermittelte AFS63-Anteil  $f_{AFS63}$  als Median und als Mittelwert mit der Jahresfracht multipliziert (vgl. Gleichung (2.3)). Die daraus resultierenden AFS63-Frachtwirkungsgrade können als Spanne für den erwartbaren AFS63-Rückhalt angegeben werden.

$$\text{AFS63-Stofffracht (kg): } B_{E,AFS63,x} = B_{E,AFS,x} * f_{AFS63,x} \quad (2.3)$$

Durch Subtrahieren des AFS63-Anteils von 1 als der Gesamtheit von AFS ergibt sich der Anteil von AFSgrob (Partikel 63-2000  $\mu\text{m}$ ). Für AFSgrob lässt sich nach (Lieske et al. 2021b) ebenfalls ein Frachtwirkungsgrad abschätzen mit Gleichung (2.4). Die Berechnung erfolgt wie zuvor mit dem Median und Mittelwert von  $f_{AFS63}$ , für eine Ergebnisdarstellung der Spanne des AFSgrob-Wirkungsgrads.

$$\text{AFSgrob-Stofffracht (kg): } B_{E,AFSgrob,x} = B_{E,AFS} * (1 - f_{AFS63,x}) \quad (2.4)$$

### 2.2.3 Kontinuierliche Untersuchung der Wasserphase

Die Beschaffenheit des Regenwasserabflusses wird im Anlagenzu- und -ablauf kontinuierlich mittels Online-Sensoren für die Parameter Trübung, pH und elektrische Leitfähigkeit erfasst (VisoTurbIQ700, SensoLyt700IQ, TetraCon700IQ, alle Xylem

Analytics GmbH - WTW). Durchfluss- und Füllstandsmessungen im Zulaufkanal (CSM-D, DSM, NIVUS GmbH) steuern den Pumpenstart und die automatische Probenahme (ASP-Station, Endress+Hauser; SP5-S, Maxx GmbH). Das begleitende Analytikprogramm umfasst die Parameter AFS, AFS63, Cu, Zn, MKW und Kornverteilung, Korndichte und Glührückstand. Mess- und Analysedaten werden mithilfe des eigenen Messdatenmanagementsystems verarbeitet nach dem Konzept von Leutnant et al. (2018). Damit auch Systeme ohne Dauerstau untersucht werden können erfolgte die parallele Weiterentwicklung zum Bypassmonitoring.

Die Auswertung ist erweitert um die Unsicherheitsbestimmung nach dem „Guide to the expression of uncertainty in measurement“ basierend auf der Übertragung von Bertrand-Krajewski et al. (2021) auf das Themengebiet der Stadtentwässerung und Regenwasserbewirtschaftung. Zudem wurde eine Methodik formuliert zur Bestimmung der Unsicherheiten in Zeitreihen unter Berücksichtigung des Effektes der Autokorrelation. Es können damit die Unsicherheiten bestimmt werden für den Durchfluss, die Trübung, die Regressionsparameter, die Sensorkorrekturfunktionen, die AFS-Konzentration, die Frachten und somit abschließend für den Wirkungsgrad.

#### 2.2.4 Aggregierte Probenahme aus der Wasserphase

Um den Personalbedarf für Probenentransport und Laboranalytik zu reduzieren, erfolgte die Recherche, Entwicklung und Anpassung von drei zeitlich aggregierenden Methoden, sowie ihre Labor- und Felduntersuchung im Vergleich. Das Ziel war es eine verlässliche Anlagenbewertung zu ermöglichen und geeignete Methodenauswahl zur jeweiligen Monitoringfragestellung zu empfehlen. Die geeignetste Methode ist der KIT-Feststoffsammler (Uhl et al. 2024), aufgrund der sicheren sowie einfachen Probenahme und des großen Potentials für eine separate Folgeanalytik der Wasser- sowie Feststoffphase.

Der Feststoffsammler ist konzeptioniert als großvolumiger Sammelbehälter, in welchem ein Probevolumen bis maximal 1000 L erfasst werden kann. Ein Pegelschalter unterhalb des Notüberlaufs unterbricht die Spannungsversorgung der Pumpe (vgl. Abbildung 1). Die Pumpe fördert permanent im Bypass die aktuelle Niederschlagswassermatrix zum Feststoffsammler. Zwei Ventile steuern dort die Dosierung. Ein Ventil ist stromlos offen (Ablauf in die Kanalisation), das andere ist stromlos geschlossen (zum FSS). Die Dosierung wird so konfiguriert, dass die Ventile entsprechend Spannung erhalten, um ein Probevolumen von 1 L/min zu erzielen. Daraus lässt sich eine Feststoffprobe generieren, welche im Gegensatz zu Einzelmischproben eine belastbare Untersuchung der Partikelzusammensetzung zulässt (Nickel und Fuchs 2021) und verschiedene Niederschlagsdynamiken und Stoffabträge integriert.

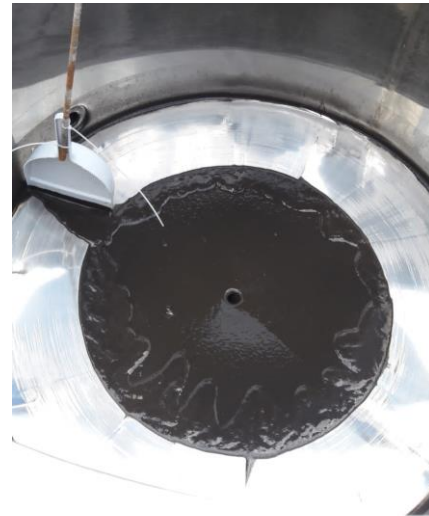
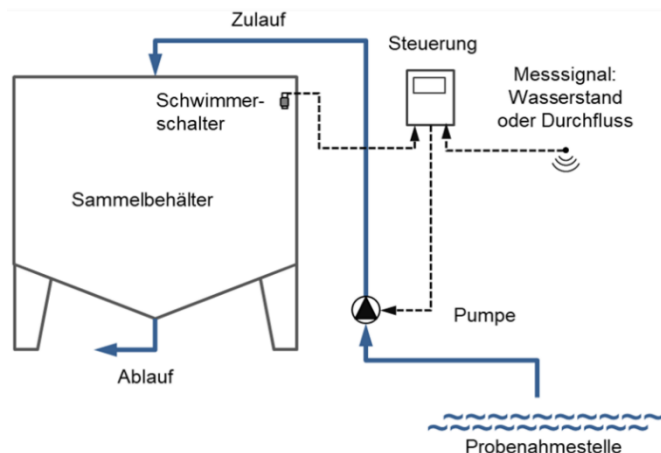


Abbildung 1: Funktionsprinzip des Feststoffsammlers (links, (KIT 2021)) und Entnahme der Feststoffphase (rechts, eigene Aufnahme).

#### 2.2.5 Probenahme und Auswertung von abgesetzten Partikeln

Die Behandlungsanlagen werden durch das Amt für Mobilität und Tiefbau der Stadt Münster nach Herstellervorgaben gewartet. Bei den Wartungen und Reinigungen wurde das in den Anlagen abgesetzte Material mittels Schöpfbecher und Teleskopstange von den Zu- und Abläufen bzw. von Behandlungselementen entnommen. Die interne und externe Analytik der Proben erfolgt wie in (Lieske et al. 2021a). Für die Untersuchung der Schwermetallkonzentrationen an verschiedenen Korngrößenfraktionen wurde von Gelhardt et al. (2021b) gezeigt, dass die Nasssiebung die beste Methode zur Separierung der adsorbierten Metalle je Fraktion ist.

Am Standort von Anlage I wurde mit dem Feststoffsammler von März bis April 2021 ein Gesamtvolumen von 1 m<sup>3</sup> Regenabfluss als Referenz der Wasserphase gesammelt. Das Probevolumen betrug 1 L/min, sodass mehrere Ereignisse innerhalb einer Gesamtdauer von bis zu 16,67 h abgedeckt wurden.

### 3 Ergebnisse

#### 3.1 Stoffaufkommen von AFS und AFS63 im Regenwasserabfluss

Die kontinuierlichen Sensoren wurden zur Bestimmung der Regressionsbeziehung ganzjährig durch eine Bildung von 6-12 Proben pro Ereignis begleitet, welche im Labor auf ihren AFS- und AFS63-Gehalt sowie die Trübung untersucht wurden. Die deskriptiven Kennzahlen zum AFS63 Aufkommen im Regenwasserabfluss sind in Tabelle 2 zusammengefasst.

Für das erste Einzugsgebiet mit einem hohen Verkehrsaufkommen zeigt sich im Zulauf von *Anlage I* eine mittleren AFS63-Konzentration von 99 mg/L. Bei der vergleichbaren Gebietszusammensetzung aber kürzeren Monitoringdauer tritt bei *Anlage III* im Zulauf eine deutlich geringe Konzentration von nur 30 mg/L auf, welche unterhalb der mittleren Konzentration von 50 mg/L AFS63 - der geringsten Belastungskategorie des Regelwerks - liegt. Durch eine Monitoringverlängerung über den Winter, zeigte sich dann unter Streusalzeinsatz über mehrere Ereignisse im Mittel eine vielfach höhere AFS63-Konzentrationen von über 140 mg/L.

Der untersuchte Lamellenklärer – *Anlage II* – erhält ganzjährig eine geringe mittlere Zulaufbelastung von nur 32 bis 34 mg/L, welche unterhalb der Belastung von Kategorie I Flächen liegt. Die veränderte Drosseleinstellung bewirkt wie erwartet keine Änderung der Belastung im Zulauf.

Tabelle 2: AFS63-Konzentrationen  $C_{R,AFS63}$  (Angaben in mg/L).

Messstation	Messort	n	AFS63-Konzentration $C_{R,AFS63}$		
			Median	Mittelwert	Standardabweichung
Anlage I – 4 m/h	Zulauf	320	62	99	117
	Ablauf	209	45	72	73
Anlage II – 10 m/h	Zulauf	291	20	34	51
	Ablauf	218	16	32	53
Anlage II – 4 m/h	Zulauf	53	18	32	33
	Ablauf	53	17	22	16
Anlage III – 4 m/h 1. Jahr	Zulauf	78	20	30	31
	Ablauf	78	9	11	8
Anlage III – 4 m/h Verlängerung	Zulauf	30	84	146	159
	Ablauf	30	63	103	99



Der aus den ganzjährigen Proben bestimmte Anteil von AFS63 an AFS ist als Verhältnis  $f_{AFS63}$  in Abbildung 2 für die Probenmepositionen in den Anlagen aufgetragen. Im Zulauf liegt  $f_{AFS63}$  im Median zwischen 0,75 bis 0,85. Durch das effektivere Absetzen von größeren Partikel erfolgt in der Wasserphase eine Anreicherung zum Ablauf mit  $f_{AFS63}$  im Median von 0,88 bis 0,95.

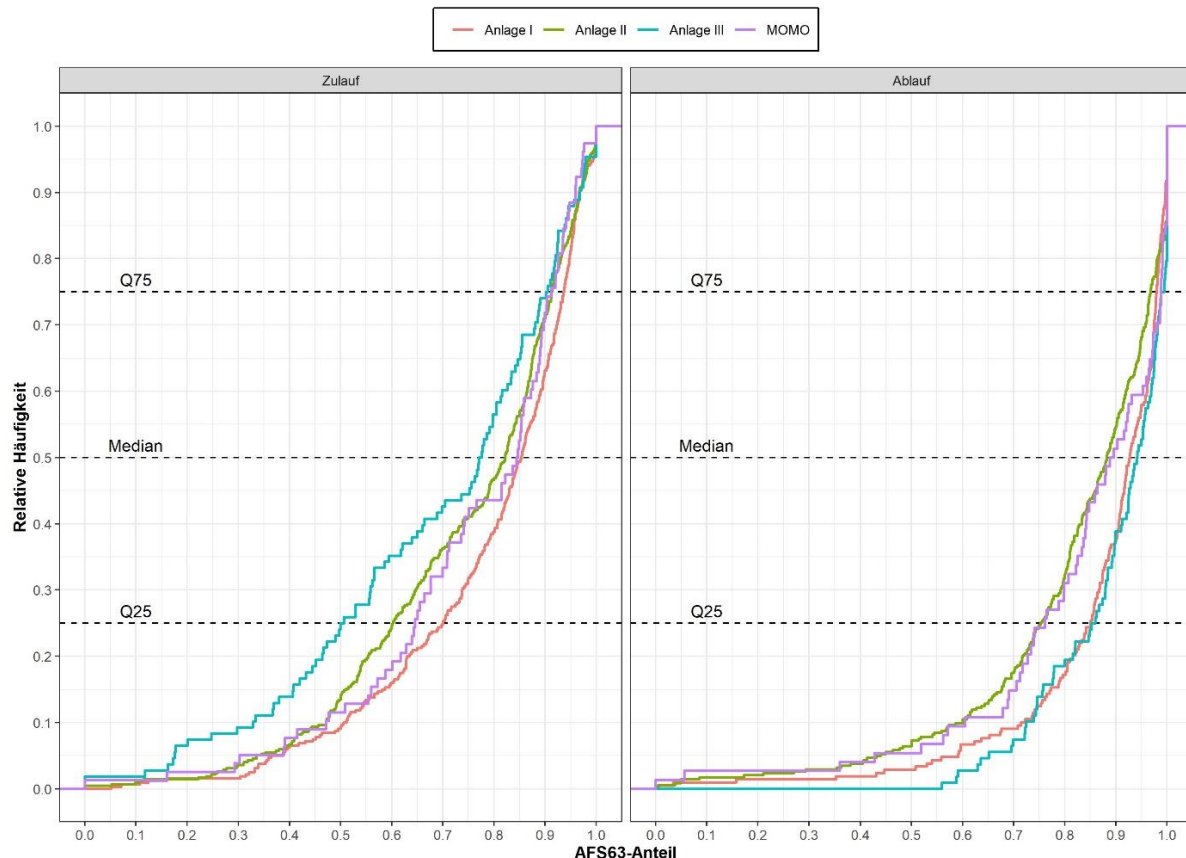


Abbildung 2: Empirische Verteilungsfunktion des AFS63-Anteils  $f_{AFS63}$  an  $AFS_{Gesamt}$  differenziert nach Messstation und Messort

### 3.2 Rückhalt von AFS und AFS63 in Niederschlagswasserbehandlungsanlagen

Die Auswertung des AFS-Frachtwirkungsgrads  $\eta_{AFS}$  erfolgte für alle Anlagen und Standorte basierend auf der Summierung der AFS-Frachten der Einzelereignisse als  $B_{zu,AFS}$  und  $B_{ab,AFS}$ . Die Gesamtfrachten sind mit den Summen der Ereignisniederschlagshöhe und -dauer in Tabelle 3 aufgeführt. Die Ergebnisse für den Rückhalt von AFS63 als  $\eta_{AFS63}$  und für AFSgrob als  $\eta_{AFSgrob}$  sind in Tabelle 4 und Tabelle 5 aufgeführt. Der ermittelte Wirkungsgrad  $\eta_{AFS}$  repräsentiert den Sedimentations- als auch den Speicherwirkungsgrad.

Bei *Anlage I* beträgt der Wirkungsgrad  $\eta_{AFS} = 42,7 \%$  ( $n=165$ ,  $u_\eta=0,23\%$ , bei konst.  $q_{A,max} = 4 \text{ m/h.}$ ) Mit Hinzunahme der Veränderungen der AFS63-Anteile ( $f_{AFS63,Median}$ ) lassen sich die Wirkungsgrade ermitteln als  $\eta_{AFS63} = 37 \%$  und  $\eta_{AFSgrob} = 73 \%$ .

Die ermittelten Wirkungsgrade sind für *Anlage II*  $\eta_{AFS} = 14,9 \%$  ( $n=139$ ,  $u_{\eta}=0,67\%$ ), für AFS63  $\eta_{AFS63} = 8 \%$  und für AFSgrob  $\eta_{AFSgrob} = 52 \%$  bei einer Oberflächenbeschickung von  $q_{A,max} = 10 \text{ m/h}$ . In dieser Auswertung sind ebenfalls Niederschlagsereignisse enthalten, bei denen es zu einer Resuspension und somit zum Austrag von Partikeln kam. Die Resuspension konnte bei zwei Ereignissen anhand kontinuierlicher Daten und durch Probenahmen bestätigt werden. Als möglicher Grund kann die durch hohe Feinanteile dominierte Niederschlagswassermatrix im Konflikt mit der starken hydraulischen Belastung genannt werden.

Alle dargestellten Wirkungsgrade von Anlage III repräsentieren den Rückhalt bei einer zulässigen maximalen hydraulischen Belastung  $q_{A,max} = 4 \text{ m/h}$ . Nach einem Jahr Betriebszeit wird vom Hersteller eine Filterwartung vorgesehen, welche hier ausgelassen wurde. Durch die hydraulisch konstante, zulässige Beschickung mit der Pumpe erhält die Anlage mehr Durchsatz als im Kanalfreigefälle und es wird ein sonst repräsentatives Betriebsjahr (Volumendurchsatz) früher erreicht. Damit muss das Anlagenverhalten unter betrieblichen Einschränkungen bewertet werden. Die aus den Ganglinien ermittelten AFS-Wirkungsgrade sind für *Anlage III*  $\eta_{AFS} = 59,4 \%$  ( $A_i/A_{b,a} = 0,16 \%$ , konst.  $q_A = 4 \text{ m/h}$ ,  $n=67$ ,  $u_{\eta_{AFS}} = 0,08\%$ ) und bei *Anlage IV*  $\eta_{AFS,RKB} = 61,2 \%$  ( $q_{A,max,mittel} = 1,9 \text{ m/h}$ ,  $n=36$ ,  $u_{\eta_{AFS}} = 0,04 \%$ ). Für den AFS63- und AFSgrob-Rückhalt ergeben sich in *Anlage III*  $\eta_{AFS63} = 42 \%$  sowie  $\eta_{AFSgrob} = 90\%$  und in *Anlage IV* ein  $\eta_{AFS63} = 42 \%$  und  $\eta_{AFSgrob}$  von  $94 \%$ .

Da Partikel mit einem größeren Durchmesser, trotz gleicher Form und -dichte, eine höhere Sinkgeschwindigkeit besitzen, erzielen die Behandlungsanlagen für diese „grobe“ Fraktion hohe Rückhalte  $\eta_{AFSgrob}$  von  $52 - 94 \%$ . Aufgrund der dominierenden Anteile von AFS63 kommt dieser effektivere Rückhalt von AFSgrob im Gesamtwirkungsgrad aber nur gering zum Wirken. Die relevanteren AFS63-Rückhalte der Anlagen liegen deutlich geringer mit  $\eta_{AFS63}$  zwischen  $8 - 42 \%$ .

Tabelle 3: AFS-Frachten und Wirkungsgrade.

Mess-station	Wertesummen der validierten Ereignisse					Gesamt AFS-Rückhalt	
	$n$	$D_N$	$h_N$	$B_{zu,AFS}$	$B_{ab,AFS}$	$\eta_{AFS}$	$u_{\eta}$
[-]	[-]	[h]	[mm]	[kg]	[kg]	[%]	[%]
Anlage I	165	1051	2077	1719	986	42,7	0,23 <sup>2</sup>
Anlage II	139	860	872	566	482	14,9 <sup>1</sup>	0,67 <sup>3</sup>
Anlage III	67	280	420	181	73	59,4	0,08 <sup>2</sup>

Anlage IV	36	250	200	287	111	61,2	0,04 <sup>3</sup>
-----------	----	-----	-----	-----	-----	------	-------------------

<sup>1</sup> Inklusive Ereignissen mit Resuspension.

<sup>2</sup> Bestimmungsmethode mit partieller Autokorrelation der Trübung.

<sup>3</sup> Bestimmungsmethode mit partieller Autokorrelation der Trübung, des Wasserstandes und der Fließgeschwindigkeit.

Tabelle 4: AFS63-Frachten und -Wirkungsgrade.

Mess- station	AFS63-Stofffrachten				AFS63-Rückhalt	
	$B_{zu,AFS63}$		$B_{ab,AFS63}$		$\eta_{AFS63}$	
	$f_{Median}$	$f_{MW}$	$f_{Median}$	$f_{MW}$	$f_{Median}$	$f_{MW}$
[-]	[kg]	[kg]	[kg]	[kg]	[%]	[%]
Anlage I	1461	1358	917	868	37	36
Anlage II	475	425	439	410	8	3
Anlage III	114	114	66	64	42	44
Anlage IV	181	181	104	98	42	46

Tabelle 5: AFSgrob-Frachten und -Wirkungsgrade.

Mess- station	AFSgrob-Stofffrachten				AFSgrob-Rückhalt	
	$B_{zu,AFSgrob}$		$B_{ab,AFSgrob}$		$\eta_{AFSgrob}$	
	$f_{Median}$	$f_{MW}$	$f_{Median}$	$f_{MW}$	$f_{Median}$	$f_{MW}$
[-]	[kg]	[kg]	[kg]	[kg]	[%]	[%]
Anlage I	258	361	69	118	73	67
Anlage II	91	142	43	72	52	49
Anlage III	67	67	7	9	90	87
Anlage IV	106	106	7	13	94	87

### 3.3 Einfluss der Leitfähigkeit auf den AFS-Stoffrückhalt

Bei Abflussereignissen ohne Streusalzeinsatz sinkt die Leitfähigkeit in der Regel in allen Anlagen, wobei zu Beginn durch die ersten Schmutzstoffe der abgeflossenen Oberflächen eine kurze Amplitude auftreten kann. Mit dem Ende des Ereignisses bleibt in den Bypassanlagen (Anlage I und Anlage III) das geringe Niveau der Leitfähigkeit erhalten. Während der Winterzeit können beim Einsatz von Streusalz und einem anschließenden Abflussereignis Höchstwerte zwischen 2000-13500  $\mu\text{S}/\text{cm}$  gemessen werden, die während des Ereignisses schnell wieder sinken.

Für den Winterzeitraum 2021 wurde der Streusalzeinsatz bei Anlage III und IV untersucht. Die über das Ereignis durchschnittliche Leitfähigkeit und der Ereigniswirkungsgrad sind für valide Ereignisse in Tabelle 6 aufgeführt. Vor dem Streusalzeinsatz wiesen beide Anlagen einen AFS-Rückhalt um die 70% auf. Anlage III reagiert beim Einsatz von Streusalz direkt nach dem Verdrängungseffekt mit einer Abnahme des Rückhalts. Der Rückhalt sinkt dabei um 20-30 Prozentpunkte auf einen AFS-Wirkungsgrad von 36-43 % (n = 6). Der AFS-Wirkungsgrad von Anlage III verbleibt dann auf einem Niveau um 40 %, während der Wirkungsgrad vom RKB langsam mit jedem weiteren Abflussereignis und zusätzlicher Salzfracht abnimmt. Da keine Leitfähigkeitssonde zentral im RKB verbaut ist, liegen keine Informationen über die Ausbildung einer Dichteschichtung und somit der Reduzierung des durchströmbaren Volumens vor. Es zeigt sich aber, dass nach dem Ereignis vom 29.12.2021 das Wasser mit hoher LF in Anlage III und IV verdrängt wurde, da bei dem anschließenden Ereignis der übliche Anlagenwirkungsgrad wieder erreicht wird.

Tabelle 6: Verlaufs des AFS-Rückhalts bei Streusalzeinsatz an Anlage III und IV.

Datum	Durchschn. Leitfähigkeit [ $\mu\text{S}/\text{cm}$ ]	AFS-Wirkungsgrad Anlage III – 4 m/h [%]	AFS-Wirkungsgrad Anlage IV – 1,9 m/h [%]
04.12.2021 – Typ 1	693	36	63
12.12.2021 – Typ 1	2039	40	71
23.12.2021 – Typ 1	1500	41	60
27.12.2021 – Typ 1	1760	43	54
29.12.2021 – Typ 2	571	43	48
02.01.2022 – Typ 2	517	60	69
02.01.2022 – Typ 2	180	59	60

### 3.4 Zusammensetzung der abgesetzten Partikel

Ein Anstieg der AFS63-Anteile vom Zulauf zum Ablauf ist in allen Systemen zu erkennen (vgl. Tabelle 7). Ebenfalls nimmt der AFS63-Anteil der abgesetzten Partikel zu, je niedriger die Oberflächenbeschickung ist. Die Behandlungsanlagen I und III werden bei der identischen Oberflächenbeschickung von konstant 4 m/h betrieben, aber der Regenwasserabfluss zu Anlage III weist bereits geringere AFS63 Anteile auf, wodurch auch der Anteil in den abgesetzten Partikeln geringer ist. Beim Vergleich der Ergebnisse aus den Jahren 2020 und 2021 liegen die Werte in vergleichbaren Größenordnungen. Die geringsten AFS63-Anteile weisen die Proben aus Anlage II bei einer Oberflächenbeschickung von bis zu 10 m/h auf. Durch die Drosselung auf 4 m/h konnte in Anlage II der AFS63-Anteil im Jahr 2022 nachweislich erhöht werden.

Tabelle 7: AFS63-Anteile der abgesetzten Partikel.

Messstation	Jahr	Zulaufnah	Mitte	Ablaufnah
Anlage I – 4 m/h	2020	61 %	85 %	-
	2021	53 %	72 %	75 %
Anlage II – 10 m/h	2020	3 %	-	36 %
	2021	7 %	12 %	21 %
Anlage II – 4 m/h	2022	53 %	78 %	97 %
Anlage III – 4 m/h	2021	46 %	-	58 %

Die mittels Kapillarpiknometer gemäß DIN EN ISO 17892 Teil 3 bestimmten Korndichten der abgesetzten Partikel sind in Tabelle 8 exemplarisch für die Proben aus dem Jahr 2020 dargestellt. Die höchsten Korndichten treten im Zulauf auf. Für *Anlage I* gilt zusätzlich, dass die höchste Korndichte bei der kleinsten Korngrößenfraktion von  $<25\ \mu\text{m}$  vorlag, sich also nur die ausreichend schweren Partikel erfolgreich absetzen konnten. Bei *Anlage II* liegt die höchste Korndichte mit  $2,54\ \text{g/cm}^3$  im Korngrößenbereich von  $125\text{-}200\ \mu\text{m}$  nah an der von Sand, was einer nahezu mineralischen Matrix entspricht, die sich direkt im Zulauf absetzte. Es gilt, dass organische Anteile die Korndichte reduzieren, Schwermetallbestandteile und mineralische Anteile die Dichte des Partikels erhöhen.

Tabelle 8: Korndichten der Schlammmatrix aus 2021 in  $\text{g/cm}^3$ .

Beprobung 2021		Korngrößenbereich in $\mu\text{m}$			
Messstandort	Messort	$< 25\ \mu\text{m}$	25-63	63-125	125-200
Anlage I – 4 m/h	Zulaufnah	2,08	2,09	2,04	2,04
	Mitte	2,09	1,92	1,96	2,00
	Ablaufnah	2,12	1,91	1,80	1,81
Anlage II – 10 m/h	Zulaufnah	2,09	2,22	2,24	2,54
	Ablaufnah	2,02	2,22	2,18	2,08
Anlage III – 4 m/h	Zulaufnah	1,93	2,01	1,93	2,02
	Ablaufnah	2,08	2,01	1,96	2,02

Die Ergebnisse für das partikulär gebundene Kupfer und Zink an AFS63 sind in Tabelle 9 gelistet. Neben der Zunahme an  $f_{\text{AFS63}}$  vom Zulauf hin zum Ablauf (vgl. Tabelle 7), erfolgt auch innerhalb der Kornfraktion  $0\text{-}63\ \mu\text{m}$  eine Zunahme an kleineren Korngrößenfraktionen, insbesondere des Rückstands  $< 25\ \mu\text{m}$  (vgl. Tabelle 10). Durch den erhöhten Massenanteil der kleinsten Fraktion ergibt sich eine größere potentielle Adsorptionsfläche für die partikuläre Bindung von Schwermetallen an AFS63. Zusammen mit dem Schwermetallaufkommen ergibt sich das Bild, dass die höchsten Konzentrationen an den Partikeln aus dem Einzugsgebiet von *Anlage II* mit dem

geringsten Verkehrsaufkommen und dem größten Anteil an Wohnbebauung vorliegen. Die Belastung aus dem Gebiet von *Anlage I*, welche das höchste Verkehrsaufkommen vorweist, liegt sowohl bei Kupfer und Zink darunter.

Tabelle 9: Kupfer und Zinkgehalte der abgesetzten AFS63-Partikel in mg/kg TS.

Messstation	Jahr	Messort	$f_{\text{AFS63}}$	$C_{\text{Kupfer}}$	$C_{\text{Zink}}$
Anlage I – 4 m/h	2021	Zulauf	53 %	1310	1640
		Mitte	72 %	1950	2430
		Ablauf	75 %	1840	1730
Anlage II – 10 m/h	2021	Zulauf	7 %	2390	3030
		Ablauf	21 %	3850	2570
Anlage III – 4 m/h	2021	Zulauf	46 %	2830	2990
	2021	Ablauf	58 %	3540	2900

Tabelle 10: Massenanteile der Korngrößenfraktionen von AFS63.

Messstation	Messort	Korngrößenbereich in $\mu\text{m}$			
		< 25	25-40	40-63	$f_{\text{AFS63}}$
Anlage I – 4 m/h	Zulauf	45 %	3 %	5 %	53 %
	Mitte	53 %	8 %	11 %	72 %
	Ablauf	63 %	5 %	7 %	75 %
Anlage II – 10 m/h	Zulauf	5 %	0 %	1 %	7 %
	Ablauf	16 %	1 %	3 %	21 %
Anlage III – 4 m/h	Zulauf	39 %	2 %	5 %	46 %
	Ablauf	44 %	5 %	9 %	58 %

## 4 Diskussion

Die ermittelten Wirkungsgrade  $\eta_{\text{AFS}}$  und  $\eta_{\text{AFS63}}$  der Anlagen sind den im DWA-A 102-2 dargestellten Zusammenhang von Oberflächenbeschickung und erreichbarem Feststoffwirkungsgrad durch Sedimentation nach (Fuchs und Kemper 2018) in Abbildung 3 gegenübergestellt.

Der ermittelte Rückhalt in Anlage I ( $n = 165$ ) entspricht für AFS63 dem dargestellten Zusammenhang von  $q_{\text{A,max}} \sim \eta_{\text{Sed}}$ , sodass ein wirksames Absetzen als auch die Fixierung von Partikel erfolgen können. Der Sonderfall dabei ist, dass konstant  $q_{\text{A,max}}$  durch die Bypassbeschickung vorlag, somit aber auch eine gleichmäßige Beschickung erfolgte und keine ungedrosselten Abflussspitzen die Anlage belasteten.

Der Lamellenklärer Anlage II weist gegenüber dem publizierten Wirkungszusammenhang deutlich niedrigere Rückhalte auf. Neben der hydraulisch hohen und

variablen Beschickung bei gleichzeitig geringer AFS63-Konzentration im Zulauf, werden vor allem konstruktive Gestaltungsdetails als Ursache für den unzureichenden Rückhalt vermutet. Die Publikation von Fuchs und Kemper basiert auf einem optimal gestalteten Lamellenklärer mit flächiger Fassung und Entnahme des behandelten Wassers oberhalb der Lamellen. Die untersuchte Anlage II weist lediglich ein getauchtes Rohr auf. Auch die Anströmung erfolgt nicht über ein T-Stück hydraulisch optimal in die Behandlungskammer. Zusätzlich ist die Ausrichtung der Lamellen zur Strömung gleichgerichtet anstatt im Gegenstrom wie bei Fuchs und Kemper. Der niedrige Rückhalt wurde von der Stadt Münster als Anlass genommen die Anlage von 10 m/h auf 4 m/h zu drosseln. Die konstruktiven Defizite sind in einer neuen Produktreihe behoben worden.

Die DIBt geprüfte Anlage III (Filterschacht) erreicht, wie erwartet, aufgrund der zusätzlichen Behandlungsstufe Wirkungsgrade oberhalb der Kennlinien für Schrägklärer. Durch die konstante maximale hydraulische Belastung bei  $q_{A,max} = 4$  m/h ist der Volumendurchsatz schneller erreicht, die Anlagenbewertung kann also nur eingeschränkt erfolgen, da die nötige Wartung zur Filterspülung ausblieb.

Das runde Regenklärbecken weist einen Rückhalt auf, der unterhalb der Sedimentationskennlinie von Fuchs und Kemper liegt. Ebenfalls wird die Gesamtwirkungsgradkennlinie von Schmitt (Bild 4 in (DWA-A 102-2/ BWK-A 3-2 2020: 102-2)) unterschritten, welche für zentrale Bauwerke den Speicher und Sedimentationswirkungsgrad integriert. Das Becken wurde auf 10 m/h dimensioniert, in den  $n = 36$  untersuchten Ereignissen zeigte sich jedoch nur eine mittlere  $q_{A,max}$  von 1,9 m/h im Betrieb.

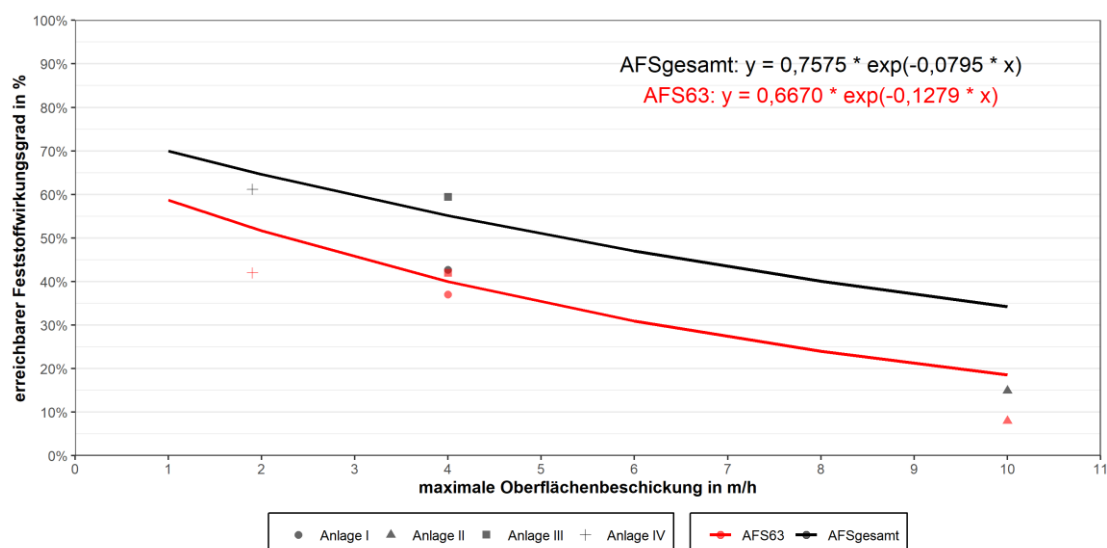


Abbildung 3: AFS- und AFS63-Wirkungsgrade gegenüber Schrägklärerwirkungsgraden, ergänzt nach (Fuchs und Kemper 2018).

## 5 Fazit

Die kontinuierliche und aggregierte Methodik zur Anlagenbewertung wurde validiert, beschrieben und kann auf verschiedene Systeme übertragen werden. Bei der Untersuchung hat sich gezeigt:

- In Laborverfahren erreichte Wirkungsgrade treten in-situ nicht auf, die In-situ Rückhalte decken sich jedoch mit dem DWA-A 102-2 Wirkungszusammenhang nach (Fuchs und Kemper 2018) bei entsprechender Konstruktion.
- Die separaten AFS63 und AFSgrob Rückhalte verdeutlichen die große Spanne der Absetzeffektivität für die jeweilige Korngrößenfraktion.
- AFS63 ist dominierend im Regenwasserabfluss und erschwert eine wirksame Niederschlagswasserbehandlung mit Sedimentationsanlagen.
- Der AFS63-Rückhalt durch Sedimentationsanlagen ist nicht ausreichend für die Behandlung des Regenwasserabflusses von Flächen der Belastungskategorie III, hier ist eine weitergehende Behandlung zum effektiven Gewässerschutz nötig.
- Einsatz von Streusalz reduziert den AFS-Rückhalt um 20 - 30 %, bis das Beckenvolumen erneut komplett ausgetauscht wurde
- Die Untersuchung der in den Anlagen abgesetzten Partikeln vervollständigt mit geringem Aufwand die Bewertung der Absetzwirkung und fördert die Erkenntnis zum Aufkommen von Schwermetallen im Entwässerungsgebiet.
- Filterschachtsysteme erfordern eine enge Betriebsbegleitung oder Überwachung.

Abschließend lässt sich festhalten, dass variable stoffliche und hydraulische Betriebsbedingungen entsprechend zu variablen Stoffrückhalten führen. Nur eine ganzjährige Untersuchung kann über eine stoffliche Jahresbilanz die Bewertung der Wirksamkeit erzielen. Dezentrale Behandlungsanlagen als wichtige Bausteine der wasserbewussten Stadtentwicklung könnten über eine regelmäßige Stoffentnahme mehr Anteil zum Gewässerschutz leisten. Dabei werden klimabedingte Änderungen von Starkregen oder Trockenperioden ein verändertes Betriebsverhalten mit sich bringen.

## Danksagung

Das Projekt „DezNWBA“ wurde gefördert durch das MULNV des Landes NRW. Die Autoren danken den Mitarbeitern des LANUV NRW für die fachliche Begleitung sowie der Stadt Münster und dem Labor für Geotechnik für die Zusammenarbeit.



## 6 Literatur

Bertrand-Krajewski, J.-L., Uhl, M., Clemens-Meyer, F.H.L.R. (2021): „*Uncertainty assessment*“. In: Bertrand-Krajewski, J.-L., Clemens-Meyer, F., Lepot, M. (Hrsg.) *Metrology in Urban Drainage and Stormwater Management: Plug and Pray*. IWA Publishing S. 263–326, [https://doi.org/10.2166/9781789060119\\_0263](https://doi.org/10.2166/9781789060119_0263).

Dierschke, M., Welker, A. (2015): „*Bestimmung von Feststoffen in Niederschlagsabflüssen*“. In: *gwf Wasser-Abwasser*. 156 (4), S. 440–446.

DWA-A 102-2/ BWK-A 3-2 (2020): *DWA-Regelwerk: Grundsätze zur Bewirtschaftung und Behandlung von Regenwetterabflüssen zur Einleitung in Oberflächengewässer - Teil 2: Emissionsbezogene Bewertungen und Regelungen*. Hennef: Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall e. V. (DWA).

Fuchs, S., Kemper, M. (2018): „*Empfehlungen für Planung und Betrieb klärtechnischer Maßnahmen*“. Stuttgart 27.2.2018.

Gelhardt, L., Kuch, B., Dittmer, U., Welker, A. (2021): „*Granulometric distribution of metals in road-deposited sediments by using different sieving methods*“. In: *Environmental Advances*. 5 , S. 100094, <https://doi.org/10.1016/j.envadv.2021.100094>.

Hannouche, A., Chebbo, G., Ruban, G., Tassin, B., Lemaire, B.J., Joannis, C. (2011): „*Relationship between turbidity and total suspended solids concentration within a combined sewer system*“. In: *Water Science and Technology*. 64 (12), S. 2445–2452, <https://doi.org/10.2166/wst.2011.779>.

KIT (2021): „*Forschung - Arbeitsmethoden - Monitoring*“. Karlsruher Institut für Technologie. Abgerufen am 28.08.2021 von <https://iswww.iwg.kit.edu/2728.php>.

Leutnant, D., Kleckers, J., Haberkamp, J., Uhl, M. (2018): „*In-situ-Monitoring der Reinigungsleistung großer dezentraler Niederschlagswasserbehandlungsanlagen*“. In: Schmitt, T.G. (Hrsg.) *Regenwasser in urbanen Räumen - aqua urbanica trifft RegenwasserTage 2018*. Landau i.d. Pfalz: Technische Universität Kaiserslautern (Schriftenreihe Wasser Infrastruktur Ressourcen).

Leutnant, D., Muschalla, D., Uhl, M. (2016): „*Stormwater Pollutant Process Analysis with Long-Term Online Monitoring Data at Micro-Scale Sites*“. In: *Water*. 8 (7), S. 299, <https://doi.org/10.3390/w8070299>.

Lieske, C., Leutnant, D., Haberkamp, J., Uhl, M. (2021a): „*Untersuchungen zum Partikelrückhalt in großen dezentralen Niederschlagswasserbehandlungsanlagen*“. In: *Aqua Urbanica 2021 - Schwammstadt – Versickerung 2.0?*. Innsbruck: Österreichischer Wasser- und Abfallwirtschaftsverband, S. 160–165.

Lieske, C., Leutnant, D., Uhl, M. (2021b): „Assessing the TSS Removal Efficiency of Decentralized Stormwater Treatment Systems by Long-Term In-Situ Monitoring“. In: *Water*. 13 (7), S. 908, <https://doi.org/10.3390/w13070908>.

Métadier, M., Bertrand-Krajewski, J.-L. (2012): „The use of long-term on-line turbidity measurements for the calculation of urban stormwater pollutant concentrations, loads, pollutographs and intra-event fluxes“. In: *Water Research*. (Special Issue on Stormwater in urban areas), 46 (20), S. 6836–6856, <https://doi.org/10.1016/j.watres.2011.12.030>.

Nickel, J.P., Fuchs, S. (2021): „Large-Volume Samplers for Efficient Composite Sampling and Particle Characterization in Sewer Systems“. In: *Water*. 13 (20), S. 2831, <https://doi.org/10.3390/w13202831>.

Uhl, M., Haberkamp, J., Lieske, C., Abadi, A. (2024): *Leistungsfähigkeit großer dezentraler Niederschlagswasserbehandlungsanlagen unter realen Betriebsbedingungen*. (Schlussbericht des Forschungsprojektes DezNWBA) Münster: IWARU Institut für Wasser•Ressourcen•Umwelt, FH Münster (noch unveröffentlicht).

#### Korrespondenz an:

Christian Lieske  
Corrensstraße 25, 48149 Münster  
Tel.: +49 251 83-65299  
E-Mail.: [christian.lieske@fh-muenster.de](mailto:christian.lieske@fh-muenster.de)