

TEXTE

01/2022

**Abschlussbericht**

# Entwicklung eines Laborprüfverfahrens

zum Rückhalt von partikulären Stoffen in dezentralen  
Niederschlagsbehandlungsanlagen bei Einleitung in  
Oberflächengewässer

von:

Martina Dierschke, Christian Hähnlein  
Frankfurt University of Applied Sciences, Frankfurt am Main

**Herausgeber:**

Umweltbundesamt



TEXTE 01/2022

Ressortforschungsplan des Bundesministeriums für  
Umwelt, Naturschutz und nukleare Sicherheit und  
Verbraucherschutz

Forschungskennzahl 3720 22 302 0

UBA-FB XXX

Abschlussbericht

## **Entwicklung eines Laborprüfverfahrens**

zum Rückhalt von partikulären Stoffen in dezentralen  
Niederschlagsbehandlungsanlagen bei Einleitung in  
Oberflächengewässer

von

Martina Dierschke, Christian Hähnlein  
Frankfurt University of Applied Sciences, Frankfurt am Main

Im Auftrag des Umweltbundesamtes

## Impressum

### Herausgeber

Umweltbundesamt  
Wörlitzer Platz 1  
06844 Dessau-Roßlau  
Tel: +49 340-2103-0  
Fax: +49 340-2103-2285  
[buergerservice@uba.de](mailto:buergerservice@uba.de)  
Internet: [www.umweltbundesamt.de](http://www.umweltbundesamt.de)

[f/umweltbundesamt.de](https://www.facebook.com/umweltbundesamt.de)

[t/umweltbundesamt](https://twitter.com/umweltbundesamt)

### Durchführung der Studie:

Frankfurt University of Applied Sciences  
Fachgebiet Siedlungswasserwirtschaft  
Nibelungenplatz 1  
60318 Frankfurt am Main

### Abschlussdatum:

Oktober 2022

### Redaktion:

Fachgebiet III 2.6  
Dr. Andrea Roskosch

Publikationen als pdf:

<http://www.umweltbundesamt.de/publikationen>

ISSN 1862-4804

Dessau-Roßlau, September 2022

Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt bei den Autorinnen und Autoren.

### **Kurzbeschreibung:**

Das Arbeitsblatt der DWA-A 102-2 als Teil des DWA-/BWK-Regelwerks zu Grundsätzen der Regenwetterbewirtschaftung zur Einleitung in Oberflächengewässer regelt die emissionsbezogenen Bewertungen von Regenwetterabflüssen. Für dezentrale Behandlungsanlagen kann die Reinigungsleistung dem Arbeitsblatt zufolge mittels eines geeigneten Prüfverfahrens festgestellt werden und zwar in einer von der zuständigen Wasserbehörde zugelassenen Prüfstelle. Ein an die Vorgaben angepasstes Prüfverfahren fehlte bisher und wurde im Rahmen dieses Projektes entwickelt. Es wurden Recherchen zum Aufkommen von Feststoffen in Niederschlagsabflüssen mit dem Fokus auf deren absetzrelevanten Eigenschaften, zur Eignung von potentiellen Prüfmaterialien, zu national und international vorhandenen Prüfmethoden sowie zu auf dem Markt verfügbaren Behandlungsanlagen durchgeführt. Abgeleitet aus den Erkenntnissen der theoretischen Betrachtungen sowie aus Erkenntnissen von labortechnischen Versuchen in Absetzsäulen wurde ein Prüfkonzept entwickelt und in zwei Prüfstellen an vier ausgewählten Behandlungsanlagen verifiziert.

Es liegt nun ein Vorschlag für ein robustes Prüfverfahren vor, das entweder von den Wasserbehörden oder nach einer Änderung der Landesverordnungen zur Feststellung der wasserrechtlichen Eignung von Bauprodukten und Bauarten (WASBauPVO) vom Deutschen Institut für Bautechnik (DIBt) angewendet werden kann.

### **Abstract:**

The DWA-A 102-2 worksheet (DWA: German Association for Water, Waste Water and Waste), as part of the DWA/BWK rules and regulations on principles of stormwater management for discharge into surface waters, regulates the emission-related assessments of stormwater runoff. For decentralized treatment plants, the worksheet states that the treatment performance can be determined by means of a suitable test procedure, namely at a accredited test institute approved by the responsible water authority. A test procedure adapted to the specifications was previously lacking and was developed as part of this project. Research was conducted on the occurrence of suspended solids in stormwater runoff with a focus on their sedimentation-relevant properties, on the suitability of potential test materials, on nationally and internationally existing inspection methods, and on treatment facilities available on the market. Derived from the perceptions of the theoretical considerations as well as from the perceptions of laboratory tests in settling columns, a test procedure was developed and verified in two accredited test institutes on four selected decentralized treatment plants.

There is now a proposal for a robust test procedure available that can be used either by the water authorities or, following an amendment to the state ordinances, to determine the water-legislative suitability of construction products and construction methods (WASBauPVO) by the Deutsches Institut für Bautechnik (DIBt) (German Institute of Building Technology) can be applied.

## Inhaltsverzeichnis

Abbildungsverzeichnis.....	9
Tabellenverzeichnis.....	13
Abkürzungsverzeichnis.....	16
Zusammenfassung.....	20
Summary .....	25
1 Einleitung.....	30
2 Anforderungen an die Einleitung von Niederschlagswasser in Oberflächengewässer.....	32
2.1 Entwurf Anhang Niederschlagswasser.....	32
2.2 DWA-A/M 102 – Grundsätze zur Bewirtschaftung von Regenwetterabflüssen zur Einleitung in Oberflächengewässer (2020).....	33
2.2.1 Wesentliche Eingangsgrößen .....	33
2.2.2 Anforderungen an den AFS63-Stoffrückhalt.....	35
2.3 DWA-M 179 – Planung und Betrieb dezentraler Regenwasserbehandlungsanlagen (in Bearbeitung) .....	36
3 Bestehende Prüfverfahren für dezentrale Regenwasserbehandlungsanlagen .....	38
3.1 Übersicht der Prüfverfahren weltweit.....	38
3.2 Übersicht der Prüfverfahren in Deutschland.....	42
3.2.1 DIBt-Prüfverfahren für dezentrale Regenwasserbehandlungsanlagen zur Einleitung in das Grundwasser .....	42
3.2.2 Nachweis der Vergleichbarkeit dezentraler und zentraler Regenwasserbehandlungsanlagen in NRW (2012).....	44
3.2.3 LfU Metalledachprüfung.....	44
4 Aufkommen und Zusammensetzung von Feststoffen im Niederschlagsabfluss .....	46
4.1 Feststoffaufkommen.....	47
4.1.1 Feststoffquellen auf Dach- und Verkehrsflächen .....	47
4.1.2 Standortspezifische Randbedingungen und Dargebot an Feststoffen .....	47
4.1.3 Methodenspezifische Randbedingungen für die Probenahme, die Bestimmung und die Auswertung von Feststoffen im Abfluss .....	49
4.1.4 Feststoffaufkommen im Niederschlagsabfluss - AFS und AFS63.....	51
4.2 Zusammensetzung von Niederschlagsabfluss hinsichtlich partikulärer Schadstoffe ..	55
4.2.1 Metalle.....	55
4.2.2 Mikroplastik .....	57
4.3 Zusammensetzung von Niederschlagsabfluss hinsichtlich absetzrelevanter Kenngrößen.....	59

4.3.1	Partikelgrößenverteilung und Abflusswirksamkeit der Partikel .....	59
4.3.2	Dichte und organischer Anteil .....	64
4.3.3	Partikelform .....	67
4.4	Zusammenfassendes Fazit .....	68
5	Überlegungen zum Prüfkonzept .....	69
5.1	Relevante Flächen .....	70
5.2	Anpassung der Jahresfracht und Auswirkung auf Zulaufkonzentration .....	71
5.3	Hydraulische Beaufschlagung .....	73
5.4	Anforderungen an das Prüfmaterial .....	76
5.4.1	Partikelgrößenverteilung / AFS.....	76
5.4.2	Dichte .....	78
5.4.3	Kornform.....	79
5.4.4	Recherche Prüfmaterialien .....	79
5.5	Umrechnung des Wirkungsgrades auf den Gesamtwirkungsgrad des Systems.....	84
6	Untersuchungen zum Absetzverhalten von Feststoffen in einer Laborsäule .....	86
6.1	Theoretische Grundlagen zur Sinkgeschwindigkeit von Feststoffen .....	86
6.2	Untersuchungskonzept .....	88
6.3	Sedimentationssäulen, Versuchsablauf und Ergebnisdarstellung.....	89
6.4	Verwendetes Material .....	93
6.5	Ergebnisse und Diskussion .....	96
6.5.1	Überprüfung der Versuchsanordnung.....	96
6.5.2	Einfluss einer möglichen Flockung bzw. Dispergierung.....	97
6.5.3	Stabilität des Prüfmaterials.....	99
6.5.4	Einfluss der Korngrößenverteilung < 250 µm auf den Absetzprozess .....	100
6.5.5	Einfluss von Dichte und Organik .....	104
6.5.6	Einfluss von Bedingungen im Winter durch Salzstreuung und geringer Temperatur .....	106
6.5.7	Einfluss der Feststoffkonzentration auf die Sinkgeschwindigkeit .....	107
6.6	Fazit.....	110
7	Prüfkonzept zur Testung des Feststoffrückhaltes in dezentralen Anlagen.....	111
7.1	Vorbereitungen.....	111
7.2	Auswahl und Beschreibung der Anlagen .....	111
7.3	Untersuchungen zum Einfluss der Zulaufkonzentration auf die Wirksamkeit .....	112
7.3.1	Anlage A .....	113

7.3.2	Anlage B .....	119
7.3.3	Auswahl der Zulaufkonzentration für die Prüfvorschrift und Begründung .....	124
7.4	Darstellung des Prüfprozedere .....	124
8	Durchführung der Prüfung von dezentralen Behandlungsanlagen .....	128
8.1	Anlage A .....	128
8.1.1	Versuchsbeschreibung und Ergebnisse (IKT) .....	128
8.1.2	Vergleich mit Werten aus der Literatur, unterschiedliche Dichte berücksichtigt	133
8.1.3	Zusammenfassende Erkenntnisse .....	136
8.2	Anlage B .....	137
8.2.1	Versuchsbeschreibung und Ergebnisse (IKT, TRLP, Beladung nach TP 1 bis 3) ....	137
8.2.2	Versuchsbeschreibung und Ergebnisse (IKT, Beladung vor TP 1 bis 3).....	143
8.2.3	Vergleich mit Anlagen im Feld .....	147
8.2.4	Zusammenfassende Erkenntnisse .....	149
8.3	Anlage C .....	150
8.3.1	Versuchsbeschreibung (TRLP, Beladung nach TP 1 bis 3).....	150
8.3.2	Versuchsbeschreibung (IKT, Beladung vor TP 1 bis 3) .....	152
8.3.3	Ergebnisse und Vergleich (Beladung nach und vor TP 1 bis 3) .....	153
8.3.4	Zusammenfassende Erkenntnisse .....	157
8.4	Anlage D .....	158
8.4.1	Versuchsbeschreibung und Ergebnisse (IKT, Beladung nach TP 1 bis 3) .....	158
8.4.2	Zusammenfassende Erkenntnisse .....	164
9	Fazit und offene Punkte .....	165
10	Literaturverzeichnis.....	167
A	Anlage – Versuchsrandbedingungen in den Prüfstellen .....	183
A.1	IKT Gelsenkirchen .....	183
A.2	TRLP Würzburg.....	183
B	Anlage – Versuchssetup und Ergebnisse Voruntersuchungen des Einflusses der Konzentration auf den Wirkungsgrad .....	184
B.1	Anlage A .....	184
B.1.1	Versuchssetup.....	184
B.1.2	Versuchsprotokolle .....	185
B.1.3	Versuchsergebnisse .....	186
B.2	Anlage B .....	187
B.2.1	Versuchssetup.....	187

B.2.2	Versuchsprotokolle .....	188
B.2.3	Versuchsergebnisse .....	189
C	Anlage – detaillierte Prüfergebnisse .....	191
C.1	Anlage A .....	191
C.2	Anlage B .....	192
C.3	Anlage C .....	196
C.4	Anlage D .....	198
D	Anlage - Ausformuliertes Prüfverfahren (expliziter Bericht).....	199
E	Anlage - Übersicht über recherchierte dezentrale Niederschlagswasserbehandlungsanlagen (expliziter Bericht).....	200

## Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1:	Schemadarstellung zur Bilanzierung des resultierenden Stoffaustrages für Behandlungsanlagen mit Zuflussbegrenzung („Teilstrombehandlung“).....	35
Abbildung 2:	Erreichbarer Feststoffabscheidewirkungsgrad in Abhängigkeit von der Oberflächenbeschickung bei dezentralen Sedimentationsanlagen .....	37
Abbildung 3:	Prüfverfahren für dezentrale Behandlungsanlagen in Deutschland .....	42
Abbildung 4:	Schematische Darstellung der DIBt-Feststoffprüfung .....	44
Abbildung 5:	Feststoffquellen für den Verkehrsflächenabfluss .....	47
Abbildung 6:	Box-Plots – Verteilung der spezifischen Massen ( $\text{g/m}^2$ ) über den Straßenquerschnitt .....	48
Abbildung 7:	Bezeichnungen gelöster und ungelöster Anteile in Abwasser; .....	50
Abbildung 8:	TRWP-Aufnahmen erzeugt mittels Durchlichtmikroskopie und Rasterelektronenmikroskopie (REM) kombiniert mit energiedispersiver Röntgenanalyse (EDA) .....	58
Abbildung 9:	Korngrößen von Einträgen in Niederschlagsabflüsse (qualitativ) .....	59
Abbildung 10:	Partikelgrößenverteilungen – oben: Straßenstaub; unten: Straßenabfluss.....	60
Abbildung 11:	Vergleich der Abflusswirksamkeit einzelner Partikelgrößenfraktionen auf Asphalt und Beton bei unterschiedlichen Niederschlagsintensitäten (Beregnung im Labor).....	62
Abbildung 12:	Dichte und organischer Anteil in Kanalsedimenten, $n = 25$ .....	64
Abbildung 13:	Glühverlust (% GV) und Dichte $\rho$ ( $\text{g/cm}^3$ ) in Straßenstaub aus Frankfurt am Main.....	65
Abbildung 14:	Whisker-Box-Plot – Glühverlust (% GV) im AFSges von Niederschlagsabflüssen .....	66
Abbildung 15:	Whisker-Box-Plots des organischen Anteils (loss on ignition, %) in Siebfraktionen von Oberflächenabfluss eines Industriegebietes in Freiburg ...	66
Abbildung 16:	Aufnahmen von Straßenstaubpartikeln .....	67

Abbildung 17:	Aufnahmen von Straßenstaubpartikeln aus der digitalen Bildanalyse (links), Auswertung der Form nach Unregelmäßigkeit $\phi$ Riley von 3 Straßenstäuben und Millisil W 4 (rechts).....	68
Abbildung 18:	Schematische Darstellung einer Feststoffprüfung für Anlagen zur Einleitung in das Oberflächengewässer mit offenen Fragestellungen.....	69
Abbildung 19:	Unterschreitungshäufigkeiten der Regenintensitäten der Station Mühldorf am Inn.....	73
Abbildung 20:	Anteil des Regenwasserabflusses unterhalb der kritischen Regenspende (VR,krit) bezogen auf das Jahresregenwasserabflussvolumen $V_{r,aM}$ (DWA-A 102-2 2020) .....	74
Abbildung 21:	Bypass bei einem Durchfluss $> Q_{krit}$ .....	75
Abbildung 22:	Korngrößen von Feststoffen in Straßenstäuben und -abflüssen (Dierschke et al. 2010; Gelhardt 2020), sowie im Prüfstoff Millisil W 4 im Vergleich .....	77
Abbildung 23:	Komponenten und ihre Dichten in Verkehrsflächenabflüssen .....	78
Abbildung 24:	2D-Histogramm der Zirkularität ( $\Psi$ -Riley) in Abhängigkeit vom Partikeldurchmesser in drei Straßenstäuben aus Frankfurt .....	79
Abbildung 25:	Sedimentationssäule (Durchmesser 70 mm) in Klimakammer .....	90
Abbildung 26:	Ergebnisdarstellung eines „Langversuchs“ .....	92
Abbildung 27:	Ergebnisdarstellung eines „Kurzversuchs“ .....	92
Abbildung 28:	Partikelgrößenverteilung in Prüfstoffen.....	93
Abbildung 29:	Durchgangssummenkurve abgesetzter Massen in Abhängigkeit von der Sinkgeschwindigkeit vs (m/h).....	97
Abbildung 30:	Anteile an abgesetzter und nicht abgesetzter Masse nach 4 min ( $v_s \geq$ und $< 11,0$ m/h) für Millisil W 4 und reale Feststoffe (PSD250Millisil) (BRS, NIB, ECL und FRS Q1 und Q4, 2021) .....	98
Abbildung 31:	Anteile an abgesetzter und nicht abgesetzter Masse nach 4 min ( $v_s \geq$ und $< 11,0$ m/h) für Millisil sowie reale Feststoffe $< 63 \mu\text{m}$ (PSD63) (BRS, ECL; Q4 2021).....	98
Abbildung 32:	Anteile an abgesetzter und nicht abgesetzter Masse nach 4 min ( $v_s \geq$ und $< 11,0$ m/h) für drei Prüfstoffe Bismehl, Silibeads und Millisil W 4 (PSD250Millisil).....	100
Abbildung 33:	Anteile an abgesetzter und nicht abgesetzter Masse nach 4 min ( $v_s \geq$ und $< 11,0$ m/h) für variierende AFS63-Anteile im Prüfmaterial Millisil.....	101
Abbildung 34:	Siebsummenkurven (bis $300 \mu\text{m}$ ) (oben) und digitale Bildanalyse (bis $40 \mu\text{m}$ ) (unten) des Prüfmaterials Millisil W 4 von acht für dieses Projekt gekaufte Paletten .....	103
Abbildung 35:	Anteile an abgesetzter und nicht abgesetzter Masse nach 4 min ( $v_s \geq$ und $< 11,0$ m/h) für Millisil W 4 und reale Feststoffe (PSD250Millisil) (BRS, NIB, ECL und FRS Q1 und Q4, 2021) .....	104
Abbildung 36:	Anteil abgesetzter Masse nach 4 min ( $\geq 11,0$ m/h) in Abhängigkeit vom Glühverlust der Messprobe (PSD250Millisil).....	105

Abbildung 37:	Anteile an abgesetzter und nicht abgesetzter Masse nach 4 min ( $v_s \geq$ und $< 11,0$ m/h) für Millisil W 4 und reale Feststoffe (PSD250Millisil) aus dem Winter (BRS, NIB, ECL und FRS Q4, 2021) .....	106
Abbildung 38:	Summenkurve abgesetzter Massen mit einer Sinkgeschwindigkeit $\geq v_s$ (m/h) für Millisil W 4.....	108
Abbildung 39:	Summenkurve abgesetzter Massen mit einer Sinkgeschwindigkeit $\geq v_s$ (m/h) für einen Staubmix; GV = 25,1 % .....	108
Abbildung 40:	Summenkurve abgesetzter Massen mit einer Sinkgeschwindigkeit $\geq v_s$ (m/h) für Millisil W 4 (gestrichelte Linie) und Straßenstaub (GV = 25,1 %) (durchgezogene Linie) .....	109
Abbildung 41:	AFS-Wirkungsgrad in Abhängigkeit von der Zulaufkonzentration Klicken oder tippen Sie hier, um Text einzugeben. ....	113
Abbildung 42:	Einbau der Anlage A in den Versuchsstand mit Zulauf und Ablauf, oben die Dosierschnecke.....	114
Abbildung 43:	Zulauf bei $r = 2,5$ l/(s · ha) (links) und bei $r = 25$ l/(s · ha) (rechts) .....	115
Abbildung 44:	Probenahmehahn im Ablaufrohr (links); Probennahme (rechts).....	115
Abbildung 45:	AFSges- und AFS63-Konzentrationsverlauf im Ablauf der Anlage A bei $r = 2,5$ l/(s · ha) in Abhängigkeit von der Zulaufkonzentration.....	116
Abbildung 46:	AFSges- und AFS63-Konzentrationsverlauf im Ablauf der Anlage A bei $r = 25$ l/(s · ha) in Abhängigkeit von der Zulaufkonzentration.....	117
Abbildung 47:	AFSges- und AFS63-Rückhalt in der Anlage A in Abhängigkeit von der Zulaufkonzentration bei $r = 2,5$ l/(s · ha) .....	118
Abbildung 48:	AFSges- und AFS63-Rückhalt in der Anlage A in Abhängigkeit von der Zulaufkonzentration bei $r = 25$ l/(s · ha) .....	118
Abbildung 49:	Ablagerungen im Ablaufrohr der Anlage A nach Abschluss des Versuchs bei einer Regenspende von $r = 2,5$ l/(s · ha) und 4.000 mg/l Zulaufkonzentration .....	119
Abbildung 50:	Einbau der Anlage B in den Versuchsstand mit Zulauf und Ablauf, oben links die Dosierschnecke, rechts das Ablauf- und Probenahmerohr.....	120
Abbildung 51:	Millisildosierung in das Zulaufrohr (links); Sicht von oben auf die Lamellen (rechts).....	120
Abbildung 52:	Befüllung der Anlage (links); Wassertrübung bei einer Konzentration von 4000 mg/l .....	120
Abbildung 53:	AFSges- und AFS63-Konzentrationsverlauf im Ablauf der Anlage B bei $r = 2,5$ l/(s · ha) in Abhängigkeit von der Zulaufkonzentration.....	121
Abbildung 54:	AFSges- und AFS63-Konzentrationsverlauf im Ablauf der Anlage B bei $r = 25$ l/(s · ha) in Abhängigkeit von der Zulaufkonzentration .....	122
Abbildung 55:	AFSges- und AFS63-Rückhalt in der Anlage B in Abhängigkeit von der Zulaufkonzentration bei $r = 2,5$ l/(s · ha) .....	123
Abbildung 56:	AFSges- und AFS63-Rückhalt in der Anlage B in Abhängigkeit von der Zulaufkonzentration bei $r = 25$ l/(s · ha) .....	123
Abbildung 57:	AFSges- und AFS63-Ablaufkonzentrationen der Teilprüfungen 1 bis 3 (Anlage A) .....	130

Abbildung 58:	AFSges- und AFS63-Ablaufkonzentrationen des Spülstoßes (Anlage A) .....	131
Abbildung 59:	Berechnete Wirkungsgrade eines Absetzsystems für AFS, AFS63 und Millisil W 4 bei 10 ° C.....	133
Abbildung 60:	Erreichbarer Feststoffwirkungsgrad in Abhängigkeit von der Oberflächenbeschickung bei dezentralen Sedimentationsanlagen .....	134
Abbildung 61:	Summenkurve abgesetzter Massen mit einer Sinkgeschwindigkeit $\geq v_s$ (m/h) für Millisil und Stäube GV = 14,4%, 25,1 % resp. 28,0 %.....	135
Abbildung 62:	Abgesetzte (AFS63-)Masse in Absetzsäulen in Abhängigkeit von der Aufenthaltszeit und des Glühverlustes in der Probe.....	136
Abbildung 63:	AFSges- und AFS63-Ablaufkonzentrationen der Teilprüfungen 1 bis 3 (Anlage B) .....	139
Abbildung 64:	AFSges- und AFS63-Ablaufkonzentrationen des Spülstoßes (Anlage B) .....	141
Abbildung 65:	AFSges- und AFS63-Ablaufkonzentrationen der Teilprüfungen 1 bis 3 (Anlage B) .....	145
Abbildung 66:	AFSges- und AFS63-Ablaufkonzentrationen des Spülstoßes (Anlage B) .....	146
Abbildung 67:	Feststoffrückhalt eines Schrägklärers (Versuchsanlage) für AFS63 im Trennsystem; Median des Glühverlustes im AFS63: ca. 30 %, n = 27.....	148
Abbildung 68:	AFS-Konzentrationen im Anlagenzulauf nach der Sedimentationsstufe (Mitte) und im Anlagenablauf; n=41 (Zulauf) bzw. n=40 (Mitte und Ablauf).....	149
Abbildung 69:	Einbau der Anlage C in den Prüfstand. Rechts: Filterelemente von oben .....	151
Abbildung 70:	links: Ablauf der kleinen Prüfrengenspende, rechts: Spülstoß (Bildquelle: G. Arnold, TRLP, Würzburg) .....	151
Abbildung 71:	Einbau der Anlage C in der Prüfhalle des IKT .....	152
Abbildung 72:	AFSges- und AFS63-Ablaufkonzentrationen der Teilprüfungen 1 bis 3 (Anlage C) .....	154
Abbildung 73:	AFSges- und AFS63-Ablaufkonzentrationen des Spülstoßes (Anlage C) .....	155
Abbildung 74:	Anlage D mit Überstau und Bypass .....	158
Abbildung 75:	linkes Bild: Einbau der Anlage D in den Prüfstand mit Überstau und Bypass; rechtes Bild: Blick von oben in die Rinne mit angeschlossener Teflonfläche und Überstausonde am unteren Bildrand.....	159
Abbildung 76:	linkes Bild: Beregnungsanlage; rechtes Bild: Aufgabe eines Teils der Millisil-Jahresfracht .....	159
Abbildung 77:	linkes Bild: Aufbringen des Spülstoßes mittels Gartenschläuchen (im Hintergrund); Vergleichmäßigung des Zustromes durch Gitter (in der Bildmitte); Anstau und Überlauf (im Vordergrund); rechtes Bild: Probennahme .....	160
Abbildung 78:	AFSges- und AFS63-Ablaufkonzentrationen der Teilprüfungen 1 bis 3 (Anlage D) .....	161
Abbildung 79:	Zufluss und Druckhöhe (oben) sowie AFSges- und AFS63-Ablaufkonzentrationen des Spülstoßes (unten) (Anlage D).....	162
Abbildung 80:	Ablaufkonzentrationen während der Beladung mit C = 3.000 mg/l und r = 6 l/(s · ha).....	194

## Tabellenverzeichnis

Tabelle 1:	Rechenwerte zu mittleren Konzentrationen im Regenwasserabfluss und flächenspezifischem jährlichem Stoffabtrag $b_{R,a,AFS63}$ für AFS63 der Belastungskategorien I bis III (DWA-A 102-2 2020) .....	34
Tabelle 2:	Anforderungen an den AFS63 Rückhalt .....	36
Tabelle 3:	Art der Prüfungen in den einzelnen Ländern .....	39
Tabelle 4:	Details zu Laborprüfungen zum AFS-Rückhalt .....	40
Tabelle 5:	Anzahl an Studien (research items) zu den Schlagworten Straßen- und Dachabfluss (road runoff, roof runoff) in <a href="http://www.sciencedirect.com">www.sciencedirect.com</a> , <a href="http://scholar.google.com">scholar.google.com</a> , <a href="http://www.tandfonline.com">www.tandfonline.com</a> .....	46
Tabelle 6:	Orientierungswerte - Stoffaufkommen AFS und AFS63 im Niederschlagsabfluss unterschiedlicher Herkunftsflächen .....	51
Tabelle 7:	Übersicht Literaturreviews zu AFS und AFS63 von verschiedenen Herkunftsflächen (in mg/l) .....	52
Tabelle 8:	Literaturreview aktuelle Studien zu AFS und AFS63 im Straßenabfluss nach Herkunftsflächen in Deutschland .....	53
Tabelle 9:	Schwermetallkonzentrationen ( $\mu\text{g/l}$ ) für Cu, Zn und Pb in Verkehrsflächenabflüssen urbaner Straßen verschiedener durchschnittlicher täglicher Verkehrsstärken (DTV) .....	56
Tabelle 10:	Partikelgrößenkenngrößen $d_{10}$ , $d_{50}$ , $d_{90}$ ( $\mu\text{m}$ ) in Niederschlagsabfluss (eigene Auswertung) .....	63
Tabelle 11:	AFS63- und Millisil W 4-Jahresfrachten nach den DIBt-Grundsätzen und Vorgaben DWA-A 102.....	71
Tabelle 12:	Feststofffrachten bei einer DIBt-Prüfung einer Anlage mit 500 m <sup>2</sup> angeschlossener Fläche (Jahresfrachtmodell: 25 kg verteilt auf 3 Prüfrengspenden).....	72
Tabelle 13:	Feststofffrachten im neuen Prüfverfahren einer Anlage mit 500 m <sup>2</sup> angeschlossener Fläche der Kategorie II (Jahresfracht Millisil W 4: 109 g/(m <sup>2</sup> · a); davon 90 % = 49,05 kg).....	72
Tabelle 14:	Anforderungskriterien an ein Prüfmaterial .....	76
Tabelle 15:	Recherche Prüfmaterialien, nach Dichte sortiert absteigend. NB: nicht bestimmt .....	80
Tabelle 16:	Feststoffkonzentration bei Säulendurchmesser $d = 50$ und $70$ mm .....	90
Tabelle 17:	Messzeiten und zugehörige Sinkgeschwindigkeitsschnitte $v_s$ [m/h].....	91
Tabelle 18:	Untersuchte Prüfstoffe.....	93
Tabelle 19:	Fraktionen des gelieferten Silibeads und Zusammensetzung als Prüfstoff .....	94
Tabelle 20:	Probenzusammensetzung für Absetzversuche .....	94
Tabelle 21:	Standortübersicht und Probenahmedatum .....	95
Tabelle 22:	Dichte und organische Anteile in den Staubproben.....	96
Tabelle 23:	AFS63-Anteile in Vergleichsproben zu je 0,5 g (Angabe Verhältnis: $\geq / < 63 \mu\text{m}$ ) .....	101
Tabelle 24:	Fluiddichte (entionisiertes Wasser, H <sub>2</sub> O; Salzlösung) (eigene Messung mit Fluidpyknometer) .....	107

Tabelle 25:	Ausgewählte Anlagen .....	111
Tabelle 26:	Prüfprozedere für eine Anlage der Flächenkategorie III mit einer Anschlussfläche von $A = 6.000 \text{ m}^2$ (Ungenauigkeiten durch Rundungsfehler)	124
Tabelle 27:	Prüfdauer und Probennahmezeitpunkte der AFS63-Prüfung gemäß der DIBt-Prüfvorschrift (DIBt 2017) .....	126
Tabelle 28:	Prüfprozedere für eine Anlage der Flächenkategorie II mit einer Anschlussfläche von $A = 1.000 \text{ m}^2$ mit einer Teilbeladung an Tag 1 mit 51% der Jahresfracht (Ungenauigkeiten durch Rundungsfehler) .....	127
Tabelle 29:	Prüfsetup der Anlage A für eine Anschlussfläche von $800 \text{ m}^2$ der Flächenkategorie II (Ungenauigkeiten durch Rundungsfehler).....	129
Tabelle 30:	AFS63-Frachtein- und -austräge, Durchflüsse, Prüfdauer und Konzentrationen als Bewertungsgrundlage für die Prüfung der Anlage A sowie AFS63-Wirkungsgrad je Teilprüfung .....	132
Tabelle 31:	Bewertung der Prüfung (Anlage A) .....	132
Tabelle 32:	Millisil-Frachteinträge und -austräge, Durchflüsse, Prüfdauer und Konzentrationen als Bewertungsgrundlage für die Prüfung der einzelnen TP bei der Anlage A mit $A = 0,95 \text{ m}^2$ .....	134
Tabelle 33:	Prüfsetup der Anlage B für eine Anschlussfläche von $1.300 \text{ m}^2$ der Flächenkategorie II (Ungenauigkeiten durch Rundungsfehler), Beladung nach TP 1 bis 3.....	138
Tabelle 34:	AFS63-Frachtein- und -austräge, Durchflüsse, Prüfdauer und Konzentrationen als Bewertungsgrundlage für die Prüfung der Anlage B (TRLP) sowie AFS63-Wirkungsgrad je Teilprüfung), Beladung nach TP 1 bis 3 .....	142
Tabelle 35:	AFS63-Frachtein- und -austräge, Durchflüsse, Prüfdauer und Konzentrationen als Bewertungsgrundlage für die Prüfung der Anlage B (IKT) sowie AFS63-Wirkungsgrad je Teilprüfung), Beladung nach TP 1 bis 3 .....	142
Tabelle 36:	Bewertung der Prüfung (Anlage B) (TRLP) ), Beladung nach TP 1 bis 3 .....	142
Tabelle 37:	Prüfsetup der Anlage B für eine Anschlussfläche von $1.300 \text{ m}^2$ der Flächenkategorie II mit Teilbeladung vor TP 1 bis 3 (Rundungsfehler).....	143
Tabelle 38:	AFS63-Frachtein- und -austräge, Durchflüsse, Prüfdauer und Konzentrationen als Bewertungsgrundlage für die Prüfung der Anlage B (IKT) mit der Beladung vor TP 1 bis 3 sowie AFS63-Wirkungsgrad je Teilprüfung .....	147
Tabelle 39:	Bewertung der Prüfung mit Teilbeladung vor TP 1 bis 3 (links) und nach TP 1 bis 3 (rechts); (IKT, Anlage B) .....	147
Tabelle 40:	Prüfsetup der Anlage C für eine Anschlussfläche von $2.000 \text{ m}^2$ der Flächenkategorie II (Ungenauigkeiten durch Rundungsfehler).....	150
Tabelle 41:	Prüfsetup der Anlage C für eine Anschlussfläche von $2.000 \text{ m}^2$ der Flächenkategorie II mit Teilbeladung vor TP 1 bis 3 (Ungenauigkeiten durch Rundungsfehler) .....	153
Tabelle 42:	AFS63-Frachtein- und -austräge, Durchflüsse, Prüfdauer und Konzentrationen als Bewertungsgrundlage für die Prüfung der Anlage C mit der Beladung nach TP 1 bis 3 (TRLP) sowie AFS63-Wirkungsgrad je Teilprüfung .....	156

Tabelle 43:	AFS63-Frachtein- und -austräge, Durchflüsse, Prüfdauer und Konzentrationen als Bewertungsgrundlage für die Prüfung der Anlage C mit der Beladung vor TP 1 bis 3 (IKT) sowie AFS63-Wirkungsgrad je Teilprüfung), Beladung vor TP 1 bis 3 .....	156
Tabelle 44:	Bewertung der Prüfung (Anlage C; TRLP: Beladung nach TP 1 bis 3; IKT: Beladung vor TP 1 bis 3) .....	157
Tabelle 45:	Prüfsetup der Anlage D für eine Anschlussfläche von 31 m <sup>2</sup> der Flächenkategorie II (Ungenauigkeiten durch Rundungsfehler).....	160
Tabelle 46:	AFS63-Frachtein- und -austräge, Durchflüsse, Prüfdauer und Konzentrationen als Bewertungsgrundlage für die Prüfung der Anlage D sowie AFS63-Wirkungsgrad je Teilprüfung .....	163
Tabelle 47:	Bewertung der Prüfung (Anlage D) .....	163
Tabelle 48:	Versuchssetup zur Variation der Eingangskonzentration (Anlage A).....	184
Tabelle 49:	Versuch 1 mit $r = 2,5 \text{ l}/(\text{s} \cdot \text{ha})$ .....	185
Tabelle 50:	Versuch 2 mit $r = 25 \text{ l}/(\text{s} \cdot \text{ha})$ .....	185
Tabelle 51:	Ablaufkonzentrationen Anlage A mit $r = 2,5 \text{ l}/(\text{s} \cdot \text{ha})$ .....	186
Tabelle 52:	Ablaufkonzentrationen Anlage A mit $r = 25 \text{ l}/(\text{s} \cdot \text{ha})$ .....	186
Tabelle 53:	Versuchssetup zur Variation der Eingangskonzentration (Anlage B).....	187
Tabelle 54:	Versuch 1 mit $r = 2,5 \text{ l}/(\text{s} \cdot \text{ha})$ .....	188
Tabelle 55:	Versuch 2 mit $r = 25 \text{ l}/(\text{s} \cdot \text{ha})$ .....	188
Tabelle 56:	Ablaufkonzentrationen Anlage B mit $r = 2,5 \text{ l}/(\text{s} \cdot \text{ha})$ .....	189
Tabelle 57:	Ablaufkonzentrationen Anlage B mit $r = 25 \text{ l}/(\text{s} \cdot \text{ha})$ .....	190
Tabelle 58:	Ergebnisse AFS-, AFS63-Konzentration je Teilprüfung (Beladung vor TP1 bis 3; IKT).....	191
Tabelle 59:	Ergebnisse AFS-, AFS63-Konzentration je Teilprüfung (Beladung nach TP1 bis 3; TRLP).....	192
Tabelle 60:	Ergebnisse AFS-, AFS63-Konzentration je Teilprüfung (Beladung nach TP1 bis 3; IKT).....	193
Tabelle 61:	Ergebnisse AFS-, AFS63-Konzentration während der Beladung nach TP1 bis 3 (IKT).....	194
Tabelle 62:	Ergebnisse AFS-, AFS63-Konzentration je Teilprüfung (Beladung vor TP1 bis 3; IKT).....	195
Tabelle 63:	Ergebnisse AFS-, AFS63-Konzentration je Teilprüfung (Beladung nach TP1 bis 3; TRLP).....	196
Tabelle 64:	Ergebnisse AFS-, AFS63-Konzentration je Teilprüfung (Beladung vor TP1 bis 3; IKT).....	197
Tabelle 65:	Ergebnisse AFS-, AFS63-Konzentration je Teilprüfung (Beladung nach TP1 bis 3; TRLP).....	198

## Abkürzungsverzeichnis

<b>A</b>	Arbeitsblatt
<b>A</b>	Fläche in m <sup>2</sup>
<b>A<sub>b,a</sub> (veraltet: A<sub>red</sub>)</b>	Befestigte, angeschlossene Fläche [m <sup>2</sup> ]
<b>A<sub>E,k</sub></b>	Kanalisierte Einzugsgebietsfläche [m <sup>2</sup> ]
<b>A<sub>F</sub></b>	Filterfläche [m <sup>2</sup> ]
<b>AbwV</b>	Abwasserverordnung
<b>AFS</b>	Abfiltrierbare Stoffe
<b>AFS63</b>	Abfiltrierbare Stoffe mit Korngrößen von 0,45 µm bis 63 µm (Feinanteil)
<b>AFS250<sub>Millisil</sub></b>	Abfiltrierbare Stoffe < 250 µm; für Prüfung mit Millisil W 4
<b>B</b>	Betriebsfläche
<b>B<sub>R,a</sub></b>	Stoffabtrag der angeschlossenen Fläche A <sub>b,a</sub>
<b>B<sub>R,in</sub></b>	Stoffstrom zur Behandlungsanlage
<b>B<sub>R,u</sub></b>	Unbehandelter Stoffstrom (im Bypass)
<b>B<sub>R,aus</sub></b>	Stoffstrom aus der Behandlungsanlage
<b>B<sub>R,e</sub></b>	Resultierender Stoffeintrag ins Gewässer
<b>BBodschV</b>	Bundesbodenschutzverordnung
<b>BF</b>	Betriebsflächen von Flughäfen
<b>BKÜ</b>	Baumkronenüberdeckungsgrad [%]
<b>BLAG</b>	Bund-Länder-Arbeitsgruppe
<b>BMBF</b>	Bundesministeriums für Bildung und Forschung
<b>BWK</b>	Bund der Ingenieure für Wasserwirtschaft, Abfallwirtschaft und Kulturbau e.V.
<b>b<sub>R,e,zul,AFS63</sub></b>	zulässiger flächenspezifischer jährlicher Stoffaustrag AFS63 durch Regenwasserabflüsse [kg/(ha · a)]
<b>b<sub>R,a,AFS63</sub></b>	flächenspezifischer Stoffabtrag AFS63 des betrachteten Gebietes [kg/(ha · a)]
<b>b<sub>R,u,,AFS63</sub></b>	AFS63-Frachtanteil des unbehandelten Stoffstroms z. B. in einem Bypass [kg/(ha · a)]
<b>CaCl<sub>2</sub></b>	Calciumchlorid
<b>CFD</b>	Computational Fluid Dynamics
<b>Cu</b>	Kupfer
<b>D</b>	Dach
<b>D</b>	Durchmesser [mm]; [m]
<b>DIA</b>	digitalen Bildanalyse
<b>DIBt</b>	Deutsches Institut für Bautechnik
<b>DIN</b>	Deutsches Institut für Normung e. V. Berlin
<b>DN</b>	diamètre nominal, Nennweite, Innendurchmesser eines Rohres [mm]
<b>DTV</b>	Durchschnittliche tägliche Verkehrsstärke [Kraftfahrzeuge pro 24 Stunden]
<b>DWA</b>	Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall e.V.

<b>d</b>	Durchmesser eines Partikels [ $\mu\text{m}$ ]; [mm]
<b>d<sub>10</sub></b>	Äquivalentdurchmesser mit $\leq 10\%$ der Partikelanteile
<b>d<sub>50</sub></b>	(Mittlerer) Äquivalentdurchmesser mit $\leq 50\%$ der Partikelanteile
<b>d<sub>90</sub></b>	Äquivalentdurchmesser mit $\leq 90\%$ der Partikelanteile
<b>EDA</b>	Energiedispersive Röntgenanalyse
<b>EMC</b>	Event Mean Concentration [mg/l]
<b><math>\eta</math></b>	dynamische Viskosität [ $\text{kg/m} \cdot \text{s}$ ]
<b><math>\eta</math></b>	Wirkungsgrad [%]
<b><math>\eta_{\text{AFS63}}</math></b>	AFS63-Wirkungsgrad [%]
<b><math>\eta_{\text{erf,AFS63}}</math></b>	Erforderlicher AFS63-Wirkungsgrad [%]
<b>FGSV</b>	Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen
<b>FRA UAS</b>	Frankfurt University of Applied Sciences
<b><math>\Psi_{\text{Riley}}</math></b>	Zirkularität der Partikel
<b>g</b>	Schwerebeschleunigung [ $9,81 \text{ m/s}^2$ ]
<b>G</b>	Gleisflächen
<b>GUS</b>	Gesamte ungelöste Stoffe [mg/l]
<b>GV</b>	Glühverlust [% von TS]
<b>GW</b>	Grundwasser
<b>H</b>	Höhe [m]; [mm]
<b>IKT</b>	Institut für Unterirdische Infrastruktur gGmbH, Exterbruch 1, 45886 Gelsenkirchen
<b>L</b>	landwirtschaftliche Hoffläche
<b>LANUV</b>	Landesamt für Natur, Umwelt und Verbraucherschutz, NRW
<b>LF</b>	Leitfähigkeit [ $\mu\text{S/cm}$ ]
<b>LfU</b>	Landesamt für Umwelt, Bayern
<b>LOI</b>	Loss on ignition (Glühverlust)
<b>M</b>	Merkblatt
<b>MCPP</b>	Meta-Chlorphenyl-Piperazin
<b>MKULNV</b>	Ministerium für Umwelt, Landwirtschaft, Natur- und Verbraucherschutz des Landes Nordrhein-Westfalen
<b>MKW</b>	Mineralöl-Kohlenwasserstoffe
<b>MW</b>	Mittelwert
<b>mD</b>	Metaldach
<b>N</b>	Stickstoff
<b>NaCl</b>	Natriumchlorid
<b>NJDEP</b>	New Jersey Corporation for Advanced Technology, USA
<b>NRW</b>	Nordrhein-Westfalen
<b>n</b>	Anzahl
<b>OGewV</b>	Oberflächengewässerverordnung

<b>OGW</b>	Oberflächengewässer
<b>P</b>	Phosphor
<b>PAK</b>	Polyzyklische aromatische Kohlenwasserstoffe
<b>Pb</b>	Blei
<b>PSD</b>	Particle size distribution (Partikelgrößenverteilung)
<b>PSD250<sub>Millisil</sub></b>	Partikelgrößenverteilung in einer Messprobe in der Zusammensetzung von Millisil W 4 (< 250 µm)
<b>PSD63</b>	Partikelgrößenverteilung einer Messprobe < 63 µm
<b>Q</b>	Durchfluss [l/s]; [m³/h]
<b>Q<sub>R</sub></b>	Regenwasserabfluss [l/s]
<b>q<sub>A</sub></b>	Oberflächenbeschickung [m/h]
<b>REM</b>	Rasterelektronenmikroskopie
<b>REwS</b>	Richtlinien für die Entwässerung von Straßen
<b>RiStWag</b>	Richtlinien für bautechnische Maßnahmen an Straßen in Wasserschutzgebieten
<b>r</b>	Regenspende [l/(s · ha)]
<b>r<sub>krit</sub></b>	kritische Regenspende [l/(s · ha)]: die Regenwassermenge, die behandelt wird, um einen erforderlichen Wirkungsgrad bezogen auf das jährliche Schmutzaufkommen zu erreichen
<b>ρ</b>	Dichte [kg/m³]; [g/cm³]
<b>ρ<sub>F</sub></b>	Dichte eines Fluids [kg/m³]
<b>ρ<sub>K</sub></b>	Dichte einer Kugel [kg/m³]
<b>S</b>	Flächen mit besonderer Belastung
<b>SD</b>	Standard deviation (Standardabweichung)
<b>SM</b>	Schwermetalle
<b>SMC</b>	site mean concentration
<b>StEB</b>	Stadtentwässerungsbetriebe
<b>SS</b>	Suspended Solids [mg/l]
<b>TARP</b>	Technology Acceptance Reciprocity Partnership. California, Massachusetts, Maryland, New Jersey, Pennsylvania, Virginia, USA.
<b>TDS</b>	Abdampfrückstand
<b>TN</b>	Gesamtstickstoff
<b>TP</b>	Teilprüfung
<b>TR</b>	Trockenrückstand
<b>TRLP</b>	TÜV Rheinland TRLP Products GmbH, Dreikronenstraße 31, 97082 Würzburg
<b>TRWP</b>	Tire and road wear particles
<b>TSS</b>	Total Suspended Solids [mg/l]
<b>UBA</b>	Umweltbundesamt, Dessau
<b>UQN</b>	Umweltqualitätsnorm
<b>V</b>	Verkehrsfläche

	Volumen
<b>V<sub>R</sub></b>	Regenabflussvolumen [m <sup>3</sup> /a]
<b>VSA</b>	Verband Schweizer Abwasser- und Gewässerschutzfachleute
<b>VSS</b>	Volatile suspended solids [mg/l]
<b>v<sub>F</sub></b>	Filtergeschwindigkeit [m/h]
<b>v<sub>s</sub></b>	Sinkgeschwindigkeit [m/s]; [m/h]
<b>WasBauPVO</b>	Landesverordnungen zur Feststellung der wasserrechtlichen Eignung von Bauprodukten und Bauarten
<b>WashDoE</b>	Department of Ecology State of Washington
<b>WHG</b>	Wasserhaushaltsgesetz
<b>WRRL</b>	Wasserrahmenrichtlinie
<b>Zn</b>	Zink

## Zusammenfassung

Schadstoffeinträge von Niederschlagsabflüssen werden im Vergleich zu anderen Quellen wie z. B. von kommunalen Kläranlagen bundesweit als zunehmend relevant für Oberflächengewässer eingestuft. Viele dieser Schadstoffeinträge (z. B. Schwermetalle und Polyzyklische Aromatische Kohlenwasserstoffe) werden überwiegend an Partikel assoziiert transportiert, insbesondere an den Feinanteilen mit geringen Korngrößen. Aus diesem Grund wurde der Parameter „Feine Feststoffe“, definiert als „Abfiltrierbare Stoffe mit einer Korngröße von  $> 0,45 \mu\text{m}$  bis  $\leq 63 \mu\text{m}$  (AFS63)“, in Deutschland als potenzieller Träger von Schadstoffen als wichtiger neuer Bewertungsparameter im Bereich der Niederschlagswasserbehandlung z. B. in die Arbeitsblatt- und Merkblattreihe DWA-A/M 102; BWK-A 3 (2020) eingeführt.

Zur Behandlung von verschmutzten Niederschlagabflüssen von kleineren Flächen (etwa  $500 \text{ m}^2$  bis  $5.000 \text{ m}^2$ ) können alternativ zu zentralen Bauwerken dezentrale Behandlungsanlagen eingesetzt werden. Das Merkblatt DWA-M 179 wird derzeit (2022) erarbeitet und wird Bemessungshinweise mittels verfahrenstechnischer Kenngrößen für dezentrale Sedimentations- und Filteranlagen geben. Die Wirksamkeit einer Vielzahl von technischen dezentralen Behandlungsanlagen mit z. B. Einbauten zur verbesserten Sedimentation oder mit einer Kombination aus Sedimentations- und Filtrationseinheiten lässt sich jedoch nicht mittels einfacher Kenngrößen beschreiben. Die Überprüfung der Wirksamkeit des Stoffrückhaltes dieser dezentralen Behandlungsanlagen kann über ein Laborprüfverfahren erfolgen. Dies wird für Anlagen zur Einleitung in das Grundwasser auf Bundesebene bereits seit vielen Jahren durch das Deutsche Institut für Bautechnik (DIBt) praktiziert. Ein an die Vorgaben des DWA-A/M 102 (2020) angepasstes Prüfverfahren zum Rückhalt von AFS63 aus Niederschlagsabflüssen bei Einleitung in Oberflächengewässer fehlt bislang, ein Vorschlag dafür wurde im Rahmen des vorliegenden Forschungsvorhabens entwickelt.

Als Grundlagen für die Entwicklung des Prüfverfahrens werden in diesem Vorhaben die legislativen Anforderungen an die Einleitung von Niederschlagswasser in Oberflächengewässer, technische Regelwerke sowie bereits bestehenden Prüfverfahren mit dem Fokus auf Deutschland beschrieben.

Für Verkehrsflächen zur Einleitung in das Grundwasser sind Zulassungsverfahren beim Deutschen Institut für Bautechnik (DIBt 2017) angesiedelt. Für das Behandeln und anschließende Versickern von Metaldachabflüssen hat das Landesamt für Umwelt (LfU) Bayern ein Verfahren entwickelt. In NRW schließlich gibt es ein Bewertungsverfahren, anhand dessen Anlagen auf einer Liste beim Landesamt für Natur, Umwelt und Verbraucherschutz (LANUV) geführt werden, die in NRW genehmigungsfähig für die Einleitung in ein Oberflächengewässer sind. Die Prüfverfahren beinhalten Nachweise über die Reinigungsleistung, die Umweltverträglichkeit der eingesetzten Materialien oder Aussagen über erforderliche Wartungs- und Kontrollmechanismen.

International existieren Prüfverfahren in der Schweiz, in Österreich, in Großbritannien und den Niederlanden sowie außereuropäisch in den USA, in Kanada, in Australien sowie in Neuseeland. Den meisten Prüfverfahren gemeinsam ist die Feststoffprüfung anhand eines mineralischen Prüfstoffes, in Deutschland Millisil W 4 mit einem Korngrößenspektrum von  $0$  bis  $250 \mu\text{m}$ , international finden sich auch variierende Korngrößenbereiche.

Um zutreffende Frachten und die Anforderungen an einen Prüfstoff festzulegen, wurden Aufkommen und Zusammensetzung von Niederschlagsabflüssen mit dem Fokus auf die absetzrelevanten Eigenschaften von Feststoffen mit folgenden Ergebnissen recherchiert:

- ▶ Dachabflüsse fallen bezogen auf ihr Feststoffaufkommen in einen Bereich, der nach DWA-A 102 nicht behandlungsbedürftig ist.
- ▶ Das Feststoffaufkommen in Verkehrsflächenabflüssen führt oft zu deren Behandlungsbedürftigkeit. Insbesondere kleine Herkunftsflächen sind besonders hoch mit Feststoffen belastet.
- ▶ In Verkehrsflächenabflüssen haben sich die im Arbeitsblatt DWA-A 102 angegebenen Schwerpunktbereiche bestätigt. Aufgrund bislang uneinheitlicher Bestimmungsmethoden für den AFS63 lassen sich hier noch keine belastbaren Vergleichswerte aus veröffentlichten Studien ableiten. Partikelgrößenverteilungen in Straßenabflüssen deuten jedoch mit einem AFS63-Anteil zwischen 30 - 90 % auf eine relativ breite Verteilung hin.
- ▶ Der AFS63 stellt hinsichtlich der Schwermetalle wie auch des Mikroplastiks einen sinnvollen Leitparameter für partikuläre Schadstoffe dar. Durch ein Prüfverfahren zum Feststoffrückhalt von AFS63 werden beide Stoffe als Surrogatparameter abgebildet.

Bezüglich der absetzrelevanten Eigenschaften von Partikeln im Verkehrsflächenabfluss lassen sich folgende Aussagen ableiten:

- ▶ Die Partikelgrößenverteilung von Verkehrsflächenabflüssen ist relativ heterogen mit einer sicheren Datenbasis zu abflusswirksamen Anteilen  $< 250 \mu\text{m}$ .
- ▶ Die organischen Anteile in Zuflüssen zu dezentralen Anlagen liegen im Median bei ca. 26 % GV, mit in der Tendenz geringeren organischen Anteilen in feinen Feststoffen AFS63.
- ▶ Die Dichte von abflusswirksamen Partikeln in Verkehrsflächenabflüssen liegt in einem Bereich zwischen  $1,8 - 2,5 \text{ g/cm}^3$ , für AFS63 im Schwerpunkt bei  $2,2 \text{ g/cm}^3$
- ▶ Die Formen von Partikeln im Straßenabfluss sind amorph, kantig bis faserig. Die mittlere Zirkularität ( $\Psi_{\text{Riley}}$ ) von Straßenabflusspartikeln beträgt – wie von Millisil auch -  $\Psi_{\text{Riley}} = 0,8$ .

Absetzversuche mit unterschiedlichen Fragestellungen wurden in Laborabsetzsäulen durchgeführt. Diese führten zu wichtigen Erkenntnissen für das Prüfverfahren:

- ▶ Der Einfluss der Zugabe von Salzen in üblichen Konzentrationen von Straßenabflüssen im Winter stellte sich für die Sedimentationswirkung in den Absetzsäulen als unbedeutend dar.
- ▶ Als deutlicher erwies sich der Einfluss der Temperatur beim Absetzen von Feststoffen: Eine Temperaturdifferenz von  $10 \text{ }^\circ\text{C}$  veränderte die Absetzwirkung um etwa 5 %. Als Schlussfolgerung wurde gezogen, dass ein zulässiger Temperaturbereich für die Prüfung angegeben werden sollte; z. B. unterhalb  $T = 18^\circ\text{C}$ .
- ▶ Bei der Verwendung der Prüfmaterialien ist auf die Einhaltung der vorgegebenen Korngrößenverteilung zu achten. Eine Verschiebung der feinen und groben Anteile von der Sollverteilung macht sich deutlich in der Absetzwirkung bemerkbar.

- ▶ Der Zusammenhang zwischen organischem Anteil in der Messprobe und dem Absetzverhalten konnte zwar nach  $t = 4$  min als statistisch signifikant gezeigt werden. Nach einer Absetzzeit von bereits 8 min hob sich dieser Zusammenhang jedoch wieder auf und nach 81 min setzten sich sogar etwa 5 bis 10 % mehr Masse der organikhaltigen Stäube (Glühverlust ca. 25 %) ab als eines mineralischen Prüfstoffes der gleichen Korngrößenzusammensetzung. Dies wird damit begründet, dass der Anteil der Partikelgrößen  $< 10 \mu\text{m}$  (mittels DIA im Wasserprüflabor der FRA UAS bestimmt) in Millisil in der Fraktion 0 - 40  $\mu\text{m}$  deutlich höher als in den organikreichen Stäuben war.
- ▶ Die Konzentration des Prüfmehls bei Zugabe in die Absetzsäule erwies sich als relevant für die Absetzwirkung insbesondere im Bereich der theoretischen Absetzgeschwindigkeit von Partikeln mit einer Größe von 63  $\mu\text{m}$  ( $v_s = 11 \text{ m/h}$ ,  $t = 4 \text{ min}$ ). Dieser Aspekt konnte bei einer Variation der Prüfstoffkonzentration im Bereich von 250 mg/l bis 4000 mg/l in zwei realen Sedimentationsanlagen nicht bestätigt werden. Gewählt wurde schließlich eine Zulaufkonzentration von  $c = 1.000 \text{ mg/l}$ , die einerseits noch den oberen Bereich von realen Konzentrationen abdeckt, andererseits Ablaufkonzentrationen im Bereich der Bestimmungsgrenze ergibt.

Abgeleitet aus den Erkenntnissen der theoretischen Betrachtungen sowie der Absetzversuche wurde das Prüfkonzept entwickelt. Als Prüfstoff wurde aufgrund seiner Korngrößenverteilung, der gleichbleibenden Verfügbarkeit sowie eines ähnlichen Absetzverhaltens nach einer Aufenthaltszeit von mehr als 8 min im Vergleich zu realen Straßenstäuben das quarzhaltige Millisil W 4 ausgewählt.

Die Recherche über die auf dem deutschsprachigen Markt angebotenen dezentralen Behandlungsanlagen für Niederschlagsabflüsse im März 2021 ergab etwa 140 Anlagentypen von 28 Herstellern. Werden Baugrößen eines Typs oder Anlagen, die projektspezifisch ausgelegt werden, mitgerechnet, waren es etwa 350 verschiedene Anlagen. Die Anlagen unterscheiden sich in Größe, baulicher Gestaltung und Verfahrenstechnik. Zur Verifizierung der Prüfmethode wurden vier Anlagen unterschiedlicher Verfahrenstechnik ausgewählt:

- ▶ Sedimentationsanlage
- ▶ Lamellenklärer
- ▶ Hydrozyklon mit anschließendem Filter
- ▶ Substratrinne

Die zwei beauftragten Prüfstellen, zum Zeitpunkt des Beginns des Forschungsvorhabens die einzigen vom DIBt ernannten Prüfstellen in Deutschland,

- ▶ IKT (Institut für Unterirdische Infrastruktur gGmbH), Exterbruch 1, 45886 Gelsenkirchen sowie bei der
- ▶ TRLP (TÜV Rheinland TRLP Products GmbH), Dreikronenstraße 31, 97082 Würzburg

waren maßgeblich beteiligt bei der Auswahl und Beschaffung der Anlagen, bei der Durchführung der Versuche und Optimierung des Prüfverfahrens. Ein Versuchssetup wurde vergleichend in den zwei Prüfstellen an einer Anlage durchgeführt, um die Wiederholbarkeit der Prüfung nachzuweisen. Im weiteren Verlauf der Prüfungen zeigte sich, dass eine Vorbelastung vor den eigentlichen Prüfungen sinnvoll ist. Das Prüfkonzept wurde dahingehend abgewandelt. Das schließlich gewählte Prüfsetup wurde an drei Anlagen getestet.

Es ist nachfolgend beispielhaft für eine Anlage mit einer Anschlussfläche von  $A = 1.000 \text{ m}^2$  dargestellt:

**Tabelle: Prüfprozedere für eine Anlage der Flächenkategorie II mit einer Anschlussfläche von  $A = 1.000 \text{ m}^2$  mit einer Teilbeladung an Tag 1 mit 51% der Jahresfracht (Un-genauigkeiten durch Rundungsfehler)**

		Prüfregen-spenden	Prüf-dauer	Nieder-schlags-volumen	Durchfluss	Millisil-Zugabe	Millisil-Konzentration	Probe-nahme
		[l/(s · ha)]	[h]	[m <sup>3</sup> ]	[m <sup>3</sup> /h]	[kg]	[mg/l]	
Tag 1	Beladung	6,0	7,7	16,6	2,16	49,9	3.000	keine
Tag 2	TP1	2,5	8,0	7,2	0,9	7,2	1.000	je 5 A- und B-Proben auf AFS63
Tag 3	TP2	6,0	3,33	7,2	2,16	7,2	1.000	
	TP3	25,0	0,8	7,2	9,0	7,2	1.000	
		Summe TP1 bis TP3		21,6	21,6			
	Beladung	6,0	4,0	8,6	2,16	25,9	3.000	keine
Summe Prüfdauer Tag 3			8,1					
Wartezeit 16 bis 24 h								
Tag 4	TP4	1,2 · 25,0	15 min	2,7	10,8	0,0	0	15 Proben AFS63
Gesamtsumme Millisilzugabe						97,4		

Die Jahresfracht ergibt sich aus den flächenspezifischen Stoffabtrag je Flächenkategorie nach DWA A 102, hier 90 % für Flächenkategorie II mit  $530 \text{ kg}/(\text{ha} \cdot \text{a})$ . Die 90 % wiederum ergeben sich aus dem Ansatz, dass 10 % des Jahresvolumens und der Jahresfracht mit dem Drosseln auf eine kritischen Regenspende  $r_{\text{krit}}$  von  $15 \text{ l}/(\text{s} \cdot \text{ha})$  unbehandelt an der Anlage vorbeigeführt werden dürfen. Die kritische Regenspende wird für dezentrale Anlagen erhöht auf  $r_{\text{krit}} = 25 \text{ l}/(\text{s} \cdot \text{ha})$ .

Bei der Bewertung der Prüfung sind

- ▶ der Feinanteil < 63 µm im Prüfstoff für die Wirksamkeit der drei Teilprüfungen mit unterschiedlichen Regenintensitäten,
- ▶ der Feinanteil < 63 µm im Prüfstoff für die Wirksamkeit des Spülstoßes,
- ▶ der unbehandelte Bypass von 10 %

zu berücksichtigen.

Mit der Durchführung der Prüfungen konnten verschiedene Aspekte gezeigt werden:

- ▶ Der Vergleich zwischen den Prüfstellen mit dem gleichen Prüfsetup ist gelungen. Die Durchführung der Prüfung an derselben Anlage ergab exakt den gleichen Wirkungsgrad. Die Prüfung ist somit objektiv und wiederholbar durchführbar.
- ▶ Anlagen mit Schwächen in der Rückhalteleistung und Neigung zur Remobilisierung werden identifiziert und erreichen nur einen schlechten Wirkungsgrad, auch geringer als der Wirkungsgrad theoretischer Bemessungswerte.
- ▶ Eine Vorbeladung mit einer Halbjahresfracht vor der eigentlichen Prüfung bewirkt nur einen geringen Rückgang des Wirkungsgrades bei leistungsstarken, gut konzipierten Anlagen.
- ▶ Anlagen mit guter Wirksamkeit und vor allem, diejenigen, die unempfindlich gegen Remobilisierungen sind, können den nach DWA-A 102 erforderlichen AFS63-Systemwirkungsgrad erreichen.

Es liegt nun ein Vorschlag für ein robustes Prüfverfahren zur Bestimmung eines AFS63-Wirkungsgrades für dezentrale Anlagen unter Laborbedingungen vor, mit dem die Eignung zur Einleitung in Oberflächengewässer durch von den Wasserbehörden zugelassene Prüfstellen festgestellt werden kann.

Soll das Prüfverfahren beim DIBt angesiedelt werden, so ist eine Änderung der Landesverordnungen zur Feststellung der wasserrechtlichen Eignung von Bauprodukten und Bauarten (WASBauPVO) erforderlich, so dass das DIBt eine Rechtsgrundlage zur Prüfung dieser Anlagen hat. Derzeit sind für das DIBt nur dezentrale Anlagen zur Einleitung in das Grundwasser relevant, da sie auch auf MKW geprüft werden und somit der in der WASBauPVO aufgeführten Anlagen zur Begrenzung von Kohlenwasserstoffen in mineralöhlhaltigen Abwässern entsprechen.

Das Prüfverfahren wurde an Anlagen mit unterschiedlicher Verfahrenstechnik validiert. Eine mögliche Formulierung als Zulassungsgrundlage als Anlage D beigefügt. Mit dem Verfahren können schließlich die Entwicklung von neuen oder verbesserten Technologien zur Entlastung der Oberflächengewässer gefördert und ein Wildwuchs an nicht gut funktionierenden Techniken verhindert werden.

## Summary

Pollutant inputs from stormwater runoff are considered increasingly relevant to surface waters nationwide compared to other sources such as municipal wastewater treatment plants. Many of these pollutant inputs (e.g., heavy metals and polycyclic aromatic hydrocarbons) are predominantly transported associated to particles, especially to the fine fractions with small grain sizes. For this reason, the parameter "fine solids", defined as "filterable substances with a particle size of  $> 0.45 \mu\text{m}$  to  $\leq 63 \mu\text{m}$  (AFS63)," as a potential carrier of pollutants has been identified as an important new valuation parameter in the field of precipitation water treatment in Germany, e.g., introduced in the technical worksheet series DWA-A/M 102; BWK-A 3 (2020).

For the treatment of polluted stormwater runoff from smaller areas (about  $500 \text{ m}^2$  to  $5,000 \text{ m}^2$ ), decentralized treatment plants can be used as an alternative to centralized structures. The technical worksheet DWA-M 179 is currently (2022) being developed and will provide design information by means of process engineering parameters for decentralized sedimentation and filtration plants. However, the effectiveness of a large number of technical decentralized treatment plants, with e.g. internals for improved sedimentation or with a combination of sedimentation and filtration units, cannot be described by means of simple parameters. A laboratory test procedure can be used to verify the effectiveness of the material retention of these decentralized treatment plants. This has already been practiced for many years at the federal level by the Deutsche Institut für Bautechnik (German Institute for Building Technology) (DIBt) for plants discharging into groundwater. A test procedure adapted to the requirements of DWA-A/M 102 (2020) for the retention of AFS63 from precipitation runoff when discharged into surface waters is missing to date; this was developed as part of the present research project.

As a basis for the development of the test procedure, the legislative requirements for the discharge of precipitation water into surface waters, technical regulations as well as already existing test procedures with the focus on Germany are described.

Approval procedures for traffic surfaces for discharge into groundwater are located at the Deutsches Institut für Bautechnik (DIBt 2017). For the treatment and subsequent infiltration of metal roof runoff, the Bavarian State Office for the Environment (LfU) has developed a procedure. Finally, in North Rhine-Westphalia (NRW) there is an evaluation procedure by means of which facilities are included on a list at the State Office for Nature, Environment and Consumer Protection (LANUV) that are approvable for discharge into a surface water body in NRW. The test procedures include evidence of the purification performance, the environmental compatibility of the materials used or statements about required maintenance and control mechanisms.

Internationally, test procedures exist in Switzerland, Austria, Great Britain and the Netherlands, and outside Europe in the USA, Canada, Australia and New Zealand. What most test methods have in common is the testing of solids on the basis of a mineral test material. In Germany, Millisil W 4 with a grain size range of 0 to  $250 \mu\text{m}$  is used, but internationally, grain size ranges also vary.

In order to determine applicable loads and the requirements for a test material, the occurrence and composition of precipitation runoff with a focus on the sedimentation relevant properties of solids were researched with the following results:

- In terms of their solids content, roof runoff falls into a range that does not require treatment according to DWA-A 102.

- ▶ The amount of solids in traffic area runoff often leads to their need for treatment. In particular, small source areas are especially highly polluted with solids.
- ▶ In traffic area runoff, the focal areas specified in worksheet DWA-A 102 have been confirmed. Due to inconsistent determination methods for the AFS63, no reliable comparative values can yet be derived from published studies. Particle size distributions in road runoff indicate a relatively broad distribution with an AFS63 fraction between 30 - 90 %.
- ▶ With regard to heavy metals as well as microplastics, the AFS63 provides a useful guiding parameters for particulate pollutants. By means of a test procedure for the retention of AFS63, both substances are represented as surrogate parameters.

With regard to the settling relevant properties of particles in traffic area runoff the following statements are derived:

- ▶ The particle size distribution of traffic area runoff is relatively heterogeneous with a reliable data base on runoff impacting fractions  $< 250 \mu\text{m}$ .
- ▶ The median organic content in influents to decentralized plants is about 26 % loss on ignition, with a tendency toward lower organic content in fine solids AFS63.
- ▶ The density of runoff active particles in traffic area runoff is in a range between 1.8 - 2.5  $\text{g}/\text{cm}^3$ , for AFS63 on average 2.2  $\text{g}/\text{cm}^3$ .
- ▶ The shapes of particles in road runoff are amorphous, angular to fibrous. The average circularity ( $\Psi_{\text{Riley}}$ ) of road runoff particles is - as of Millisil also -  $\Psi_{\text{Riley}} = 0.8$ .

Settling tests with different questions were carried out in laboratory settling columns. These led to important findings for the test procedure.

- ▶ The influence of the addition of salts in usual concentrations from road runoff in winter turned out to be insignificant on the settling of solids in the settling columns.
- ▶ The influence of temperature on the settling of solids proved to be more significant: A temperature difference of 10 °C changed the settling effect by about 5 %. It was concluded that a permissible temperature range for the test should be specified; e.g. below  $T = 18 \text{ °C}$ .
- ▶ When using the test materials, the specified particle size distribution must be observed. A shift in the fine and coarse fractions from the nominal distribution is clearly noticeable in the settling effect.
- ▶ The correlation between the organic content in the test sample and the settling behavior was shown to be statistically significant after  $t = 4 \text{ min}$ . After a settling time of 8 min, however, this correlation disappeared again and after 81 min even about 5 % to 10 % more mass of the organic containing dusts (loss on ignition approx. 25 %) settled than a mineral test material of the same particle size composition. This is explained by the fact that the proportion of particle sizes  $< 10 \mu\text{m}$  (determined by means of DIA in the FRA UAS water testing laboratory) in Millisil in the fraction 0 - 40  $\mu\text{m}$  was significantly higher than in the organic rich dusts.
- ▶ The concentration of the testing material when added to the sedimentation column proved to be relevant for the sedimentation effect, especially in the range of the theoretical sedimentation velocity of particles with a size of 63  $\mu\text{m}$  ( $v_s = 11 \text{ m/h}$ ,  $t = 4 \text{ min}$ ). This aspect could not be confirmed when the test substance concentration was varied in the

range of 250 mg/l to 4000 mg/l in two real sedimentation plants. Finally, an inlet concentration of  $c = 1,000$  mg/l was selected, which on the one hand still covers the upper range of real concentrations, but on the other hand gives effluent concentrations in the range of the limit of quantification.

The test procedure was developed on the basis of the findings of the theoretical considerations and the settling tests. Due to its particle size distribution, constant availability and similar settling behavior after a residence time of more than 8 min in comparison with real road dusts, the quartzous Millisil W 4 was selected.

The research on the decentralized treatment plants offered on the German speaking market for precipitation runoff in March 2021 resulted in about 140 types of plants from 28 manufacturers. If sizes of one type or plants that are designed project specifically are included, there were about 350 different plants. The plants differ in size, structural design and process technology. To verify the test method four plants with different process technologies were selected:

- ▶ Sedimentation plant
- ▶ Lamella clarifier
- ▶ Hydrocyclone with subsequent filter
- ▶ Filter substrate channel

The two commissioned accredited test institutes, which were the only testing laboratories appointed by the DIBt in Germany at the time of the start of the research project, are:

- ▶ IKT (Institute for Underground Infrastructure gGmbH), Exterbruch 1, 45886 Gelsenkirchen, Germany, and at the
- ▶ TRLP (TÜV Rheinland TRLP Products GmbH), Dreikronenstraße 31, 97082 Würzburg, Germany

were instrumental in selecting and procuring the equipment, conducting the tests and optimizing the test procedure. A test set-up was carried out comparatively in the two test facilities on one system in order to demonstrate the repeatability of the test. In the further course of the tests, it became apparent that a preloading prior to the actual tests would be useful. The test concept was modified accordingly. The test setup finally selected was tested on three plants.

It is shown below as an example for a plant with a connection area of  $A = 1,000$  m<sup>2</sup>:

The annual load results from the area specific material removal per area category according to DWA A 102, here 90 % for area category II with 530 kg/(ha · a). The 90 % in turn results from the assumption that 10 % of the annual volume and annual load can be reduced by throttling to a critical intensity of rainfall  $r_{krit}$  of 15 l/(s · ha) may be allowed to pass the plant untreated. The critical intensity of rainfall is increased for decentralized systems to  $r_{krit}$  of 25 l/(s · ha).

**Table: Test procedure for a plant of area category II with a connection area of A = 1,000 m<sup>2</sup> with a partial loading on day 1 with 51 % of the annual load (inaccuracies due to rounding errors)**

		Intensity of rainfall	Test duration	Precipitation volume	Flow rate	Millisil-addition	Millisil concentration	Sampling
		[l/(s · ha)]	[h]	[m <sup>3</sup> ]	[m <sup>3</sup> /h]	[kg]	[mg/l]	
Day 1	Load	6.0	7.7	16.6	2.16	49.9	3,000	none
Day 2	TP1	2.5	8.0	7.2	0.9	7.2	1,000	5 A- and B-samples according AFS63, each
Day 3	TP2	6.0	3.33	7.2	2.16	7.2	1,000	
	TP3	25.0	0.8	7.2	9.0	7.2	1,000	
	<i>Sum TP1 to TP3</i>				21.6	21.6		
	Load	6.0	4.0	8.6	2.16	25.9	3,000	none
<i>Sum test duration day 3</i>			8.1					
<i>Waiting time 16 to 24 h</i>								
Day 4	TP4	1.2 · 25.0	15 min	2.7	10.8	0.0	0	15 samples according AFS63
<i>Sum Millisil load</i>						97.4		

In the evaluation of the test are:

- ▶ the fine content < 63 µm in the test material for the effectiveness of the three partial tests with different rain intensities,
- ▶ the fine content < 63 µm in the test material for the effectiveness of the scour test,
- ▶ the untreated discharge via the bypass of 10 %

to be taken into account.

With the implementation of the tests, various aspects could be shown:

- ▶ The comparison between the test sites with the same test setup was successful. The test on the same system resulted in exactly the same efficiency. The test is therefore objective and repeatable.
- ▶ Plants with weaknesses in retention performance and propensity for remobilization are identified and achieve only poor efficiency, also lower than the efficiency of theoretical design values.
- ▶ Pre-loading with a six-month load prior to the actual test causes only a slight decrease in efficiency for high-performance, well-designed plants.

- Systems with good efficiency and, above all, those that are insensitive to remobilization can achieve the AFS63 system efficiency required by DWA-A 102.

A proposal is now available for a robust test method to determine an AFS63 efficiency for decentralized facilities under laboratory conditions that can be used to determine suitability for discharge to surface waters by commissioned accredited test institute approved by the water authorities.

If the testing procedure is to be located at DIBt, an amendment to the state ordinances for determining the suitability of construction products and types of construction under water law (WASBauPVO) is required so that DIBt has a legal basis for testing these systems. Currently, only decentralized systems for discharging into groundwater are relevant for DIBt, as they are also tested for petroleum-derived hydrocarbons and thus fall under the scope of the WASBauPVO plants for the limitation of hydrocarbons in wastewater containing mineral oils.

The test method was validated on plants with different process technology. A possible formulation as a basis for approval is attached to this report as Appendix D. Finally, the procedure can be used to promote the development of new or improved technologies for the relief of surface waters and to prevent a proliferation of technologies that do not work well.

## 1 Einleitung

Schadstoffeinträge von Niederschlagsabflüssen werden im Vergleich zu anderen Quellen wie z. B. von kommunalen Kläranlagen bundesweit als zunehmend relevant für Oberflächengewässer eingestuft (Böhm et al. 2001; Umweltbundesamt 2017; MUNLV 2018). Viele dieser Schadstoffeinträge (z. B. Schwermetalle und Polyzyklische Aromatische Kohlenwasserstoffe) werden überwiegend an Partikel assoziiert transportiert, insbesondere an den Feinanteilen mit geringen Korngrößen (Huber et al. 2016; Hilliges et al. 2017; Baum et al. 2021; Xanthopoulos und Hahn 1990; Zhao et al. 2010; Sansalone und Kim 2008; Krein und Schorer 2000). Aus diesem Grund wurde der Parameter „Feine Feststoffe“, definiert als „Abfiltrierbare Stoffe mit einer Korngröße von  $> 0,45 \mu\text{m}$  bis  $\leq 63 \mu\text{m}$  (AFS63)“, als potenzieller Träger von Schadstoffen als wichtiger neuer Bewertungsparameter im Bereich der Niederschlagswasserbehandlung eingeführt.

Im Rahmen der Abwasserverordnung (AbwV) soll ein Anhang erstellt werden, der die Anforderungen an Niederschlagswasserabflüsse mit dem Parameter AFS63 als wichtige Bewertungsgröße definiert und die AbwV so erweitert, dass bundeseinheitliche Mindestanforderungen geschaffen werden. Auch in der neuen Arbeitsblatt- und Merkblattreihe DWA-A/M 102 der Deutschen Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall - DWA-A 102 „Grundsätze zur Bewirtschaftung und Behandlung von Regenwetterabflüssen zur Einleitung in Oberflächengewässer“ – ist der AFS63 die zentrale Bewertungsgröße (DWA-A/M 102 2020).

Grundsätzlich können belastete Niederschlagsabflüsse zentral oder dezentral behandelt werden. Zentral können für die Behandlung von Niederschlagsabflüssen von größeren Einzugsgebieten Regenklärbecken für eine Sedimentation sowie Retentionsbodenfilter für eine weitergehende Behandlung mittels Filtration eingesetzt werden. Die Dimensionierung erfolgt über die bestehenden Regelwerke (z. B. DWA-A 166 (2013), DWA-A 178 (2019)).

Zur Behandlung von verschmutzten Niederschlagsabflüssen von kleineren Flächen (etwa  $500 \text{ m}^2$  bis  $5.000 \text{ m}^2$ ) können alternativ dezentrale Behandlungsanlagen eingesetzt werden. Die klassische Behandlungsmethode bei Einleitung in das Grundwasser ist die Versickerung (z. B. in Mulden), deren Umsetzung im DWA-A 138 (2005) geregelt ist. Das Arbeitsblatt wird derzeit überarbeitet und zukünftig vom DWA-A 138-1 (Entwurf 2020) abgelöst.

Relativ neu sind technische Behandlungsanlagen, bei denen unterschiedlichste Verfahrenstechniken eingesetzt werden, oft in einer Kombination aus (erweiterter) Sedimentation und Filtration mit verschiedenen Substraten als Filtermedium. Des Weiteren gibt es Systeme, die das Verfahren von Nassgullies aufgreifen und weiterentwickelt haben und so mit einem geringen Bauvolumen auskommen. Ferner sind am Markt Systeme verfügbar, die die Sedimentation und Filtration durch Substrate in Form von Entwässerungsrinnen verfahrenstechnisch abbilden (DIBt 2021; LANUV 2021).

Die Überprüfung der Wirksamkeit des Stoffrückhaltes dieser dezentralen Behandlungsanlagen kann über ein Laborprüfverfahren erfolgen. Auf Bundesebene entwickelt das DIBt seit 2005 Zulassungsgrundsätze für das Einleiten von Verkehrsflächenabflüssen in das Boden- und Grundwassersystem (DIBt 2017). Grundlage dieser Zulassungsgrundsätze für Filtersysteme ist eine zeitgeraffte Prüfung auf die Rückhalteleistung von Feststoffen, Mineralölkohlenwasserstoffe (MKW) und ausgewählten Schwermetallen (DIBt 2017). Ein Notüberlauf oder Bypass sind nicht zugelassen. Übergangsweise hat das Land Nordrhein-Westfalen dieses Verfahren für den Nachweis des Feststoffrückhalts für Anlagen zur Einleitung in das Oberflächengewässer übernommen (LANUV 2012; StEB 2011).

Ein an die Vorgaben des DWA-A/M 102 (2020) angepasstes Prüfverfahren zum Rückhalt von AFS63 aus Niederschlagsabflüssen bei Einleitung in Oberflächengewässer fehlt bislang, dies wurde im Rahmen des vorliegenden Forschungsvorhabens entwickelt.

In Kapitel 2 werden die legislativen Anforderungen an die Einleitung von Niederschlagswasser in Oberflächengewässer sowie die technischen Regelwerke beschrieben.

Kapitel 3 widmet sich den bereits bestehenden Prüfverfahren mit dem Fokus auf Deutschland.

Aufkommen und Zusammensetzung von Niederschlagsabflüssen werden in Kapitel 4 beschrieben. Hier wird der Fokus auf die absetzrelevanten Eigenschaften von Feststoffen in Niederschlagsabflüssen gelegt.

Die offenen Fragestellungen für das zu entwickelnde Prüfkonzept werden in Kapitel 5 detailliert beleuchtet. Hierzu zählen u. a. der Geltungsbereich des Prüfkonzeptes, eine Anpassung der einzusetzenden Fracht an die Vorgaben der DWA-A 102, die Bewertung eines Bypasses oder die von einem Prüfstoff zu erfüllenden Eigenschaften.

Die Versuchsergebnisse in Absetzsäulen mit mineralischen Prüfstoffen und organikhaltigen Stäuben sowie die daraus abgeleiteten wichtigen Erkenntnisse für das Prüfverfahren werden in Kapitel 6 beleuchtet.

Abgeleitet aus den Erkenntnissen der theoretischen Betrachtungen sowie der Absetzversuche wird das Prüfkonzept in Kapitel 7 vorgestellt. Hier werden auch die Auswahl der Behandlungsanlagen für die Durchführung der Prüfungen und Vorversuche zur Auswahl der Zulaufkonzentration beschrieben. Die Grundlage der Auswahl war eine detaillierte Recherche über auf dem deutschen Markt verfügbare Anlagen mit dem Stand März 2021. Die Ergebnisse dazu befinden sich in einer Anlage E. Die Versuche wurden im IKT (Institut für Unterirdische Infrastruktur gGmbH), Exterbruch 1, 45886 Gelsenkirchen sowie bei der TRLP (TÜV Rheinland TRLP Products GmbH), Dreikronenstraße 31, 97082 Würzburg durchgeführt.

Die Durchführung der Prüfungen und die Erkenntnisse daraus werden in Kapitel 8 detailliert dargestellt. Zusatzinformationen zu den Prüfungen befinden sich in den Anlagen A bis C.

Im Kapitel 10 sind alle Erkenntnisse sowie offenen Punkte zusammengefasst.

Die verwendete Literatur befindet sich in Kapitel 11.

Eine mögliche Formulierung des Prüfverfahrens als Zulassungsgrundlage ist schließlich als Anlage D beigefügt.

## 2 Anforderungen an die Einleitung von Niederschlagswasser in Oberflächengewässer

Die Wasserrahmenrichtlinie (WRRL) der Europäischen Union gibt Bewirtschaftungsvorgaben zum Schutz der Gewässer vor schädlichen Einleitungen vor (2000/53/EG 2000; 2008/105/EG 2008; 2013/39/EU 2013). Diese beinhalten Vorgaben für Grundwasser und Oberflächengewässer. Die WRRL sieht ein Verschlechterungsverbot und eine gleichzeitige Verpflichtung zur Verbesserung der Gewässersituation hin zu einem guten chemischen Zustand vor. Die Umsetzung muss jeder Mitgliedsstaat selbst verantworten. In Deutschland wurden diese Vorgaben mit der Anpassung des Wasserhaushaltsgesetzes (WHG) in nationales Recht umgesetzt (WHG 2009). In der Oberflächengewässerverordnung (OGewV) werden die Vorgaben der WRRL zu Umweltqualitätsnormen (UQN) für prioritäre Stoffe umgesetzt, die in Oberflächengewässern nicht überschritten werden dürfen (OGewV 2016).

Niederschlagswasser wird nach WHG (2009) als Abwasser definiert (§54). Abwasser ist vor einer Einleitung in ein Gewässer nach den besten verfügbaren Techniken zu behandeln, wenn es nicht schadlos eingeleitet werden kann und Überschreitungen der UQN anzunehmen sind. In der Abwasserverordnung (AbwV) werden hierzu Mindestanforderungen für das Einleiten von Abwasser in Gewässer in Anhängen verschiedener Abwasserarten definiert (BJV 2004). Der Anhang Niederschlagswasser der AbwV wird derzeit in der Bund-Länder-Arbeitsgruppe (BLAG) 2008) erarbeitet.

Derzeit geben die technischen Regelwerke des Fachverbandes „Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall e.V. (DWA)“ den Stand der Technik der Behandlung von Niederschlagswasser vor. Für die Ableitung von Niederschlagswasser in Oberflächengewässer werden im Arbeitsblatt „Grundsätze zur Bewirtschaftung und Behandlung von Regenwetterabflüssen zur Einleitung in Oberflächengewässer“ (DWA-A 102-2 2020; DWA-A 102-1 2020) die wesentlichen Grundlagen zur Bewertung des Behandlungsbedarfs für die Niederschlagsabflüsse für Trenn- und Mischwasserabflüsse in Siedlungsgebieten festgelegt. Für die Entwässerungsplanung von Straßen außerhalb geschlossener Ortstraßen gilt parallel dazu die Richtlinien für die Entwässerung von Straßen (REwS 2021).

Die Umsetzung der Niederschlagswasserbehandlung wird in weiteren technischen Regelwerken festgelegt (DWA-A 178 2019; DWA-A 166 2013). Für die Planung und den Betrieb von dezentralen Anlagen zur Niederschlagswasserbehandlung in Oberflächengewässer und Grundwasser ist gerade ein neues Merkblatt DWA-M 179 in Bearbeitung und wird für die Entwicklung eines Prüfverfahrens für dezentrale Anlagen weiterhin eine wesentliche Vorgabe schaffen.

Nachfolgend werden die wichtigsten Grundsätze des Entwurfs „Anhang Niederschlagswasser“ sowie der Regelwerke DWA-A/M- 102 (2020) und DWA-M 179 (in Bearbeitung) hinsichtlich der für die Entwicklung einer Prüfvorschrift wesentlichen emissionsseitigen Zielgrößen für die Bewertung von Behandlungsmaßnahmen von Niederschlagswasser von Siedlungsgebieten bei Einleitung in Oberflächengewässer erläutert.

### 2.1 Entwurf Anhang Niederschlagswasser

Der Parameter AFS63 soll auch in einen Anhang Niederschlagswasser der AbwV als Bewertungsgröße für Niederschlagswasser zur Einleitung in Oberflächengewässer und Grundwasser eingeführt werden (Klepiszewski 2020). Der neuste Stand ist der, dass der AFS63 als Leitparameter für ein Abtragungspotenzial gering, mäßig und stark belasteter Herkunftsflächen dienen soll. Erforderliche Wirkungsgrade für eine Behandlung sollen (analog zum DWA-A 102)

aus dem Zielwert für geringe Belastung abgeleitet werden. Offene Punkte sind weiterhin die an bereits bestehende Anlagen zu stellenden Anforderungen sowie eine generell mögliche Kontrolle von Niederschlagseinleitungen, da ein Bestimmungsverfahren für den Parameter AFS63 nach wie vor fehlt. Für die Einhaltung der Rechtssicherheit wird in dieser Gruppe auch das Erfordernis von DIBt-Prüfverfahren für die bauaufsichtliche Zulassung von dezentralen Behandlungsanlagen zur Einleitung in Oberflächengewässer diskutiert (Klepiszewski 2020).

## **2.2 DWA-A/M 102 – Grundsätze zur Bewirtschaftung von Regenwetterabflüssen zur Einleitung in Oberflächengewässer (2020)**

Die neue Arbeitsblatt- und Merkblattreihe DWA-A/M 102 (BWK-A 3) ist ein emissions- und immissionsbezogenes Regelwerk für Misch- und Niederschlagswassereinleitungen aus Siedlungen in Oberflächengewässer. Aktuell sind die Teile 1 und 2 im Weißdruck (DWA-A 102-1 2020; DWA-A 102-2 2020) und Teil 4 im Gelbdruck (DWA-M 102-4 Entwurf 2020) erschienen. Das Regelwerk ersetzt die Arbeits- und Merkblätter ATV-A 128 (1992), ATV-DVWK-M 177 (2001), DWA-M 153 (2007), BWK-M3 (2001) sowie BWK-M7 (2007). Für die Entwicklung eines Prüfverfahrens für dezentrale Anlagen ist im wesentlichen *Teil 2: Emissionsbezogene Bewertungen und Regelungen* heranzuziehen (DWA-A 102-2 2020).

### **2.2.1 Wesentliche Eingangsgrößen**

Ausgangsgröße für die Ermittlung der Emissionen sind Jahreswerte für das Regenwasserabflussvolumen und den Stoffabtrag.

#### Stoffbezogene Zielgröße abfiltrierbare Feststoffe 0,45 - 63 µm (AFS63)

Da ein großer Teil der nach OGewV relevanten Schadstoffe in Niederschlagsabflüssen in partikulärer Form als organische Schadstoffe wie beispielsweise Polyzyklische Aromatische Kohlenwasserstoffe (PAK) oder als Schwermetalle wie beispielsweise Blei, Zink oder Kupfer vorliegen (Huber et al. 2016; Gnecco et al. 2019; Grotehusmann und Kornmayer 2018), werden als Referenzparameter in der Bewertung von Niederschlagsabflüssen häufig die abfiltrierbaren Stoffe eingesetzt. Wegen der besonders hohen Schadstoffkonzentrationen im feinen Anteil der Feststoffe wurde mit dem neuen Arbeitsblatt der Referenzparameter AFS63 (Feststoffe mit einer Korngröße 0,45 µm bis 63 µm) für die Bewertung des Behandlungsbedarfs von Niederschlagsabflüssen eingeführt. Als Bewertungsmaßstab wird der Verschmutzungsgrad der jeweiligen Herkunftsfläche zugrunde gelegt.

Abgeleitet aus bekannten Wertespektren werden drei Belastungskategorien mit geringer, mittlerer und hoher AFS63-Belastung definiert (Tabelle 1).

Flächen der Belastungskategorie I werden als nicht behandlungsbedürftig eingestuft. Von diesen Flächen wird mit einer mittleren Konzentration von 50 mg/l AFS63 bei einem langjährigen Jahresregenabfluss von 560 mm/a gerechnet. Daraus resultiert ein flächenspezifischer Stoffabtrag von 280 kg/(ha · a), der als zulässige Emission von Regenwasserabflüssen in ein Oberflächengewässer definiert wird. Abflüsse von Flächen mit einem höheren Stoffabtrag (Kategorie II und III oder Mischflächen verschiedener Kategorien) müssen daher grundsätzlich behandelt werden.

**Tabelle 1: Rechenwerte zu mittleren Konzentrationen im Regenwasserabfluss und flächenspezifischem jährlichem Stoffabtrag  $b_{R,a,AFS63}$  für AFS63 der Belastungskategorien I bis III (DWA-A 102-2 2020)**

Bezugsgrößen: angeschlossene befestigte Fläche  $A_{b,a}$ ; abflusswirksamer Niederschlag  $\cdot h_{Na,eff} = 560 \text{ mm/a}$

Kategorie	Mittlere Konzentration $C_{R,AFS63}$ im Jahresregenwasserabfluss in mg/l	Flächenspezifischer Stoffabtrag $b_{R,a,AFS63}$ in kg/(ha · a)
Kategorie I	50	280
Kategorie II	95	530
Kategorie III	136	760

### Flächenermittlung

Die Ermittlung der abflusswirksamen Flächen ist wesentlich für die Bewertung des Stoffaufkommens im Niederschlagsereignis. Für die Bilanzierung des Wasserhaushaltes gilt die gesamte kanalisierte Einzugsgebietsfläche  $A_{E,k}$ . Für die Zuordnung von Belastungskategorien nach Flächentypen, ist die angeschlossene, befestigte Fläche  $A_{b,a}$  die wesentliche Bewertungsgrundlage. Diese ist außerdem wesentlich für die Berechnung der Abflussgrößen  $Q_R$  (Regenwasserabfluss, l/s) und  $V_R$  (jährliches Regenabflussvolumen,  $\text{m}^3$ ). Abgekoppelte Flächen werden nicht berücksichtigt. Zu ihnen zählen beispielhaft durchlässige Flächenbeläge mit einem Aufnahmevermögen bis zu  $300 \text{ l/(s} \cdot \text{ha)}$  und Teilflächen, die nachweislich bei Wiederkehrhäufigkeiten von z. B. 3 a bis 5 a keinen Abflussbeitrag in das Entwässerungssystem leisten. Flächen, die an dezentrale Behandlungsmaßnahmen angeschlossen sind, können darüber hinaus bei der stofflichen Betrachtung des gesamten Einzugsgebietes ausgenommen werden.

### Herkunftsflächen

Die maßgeblichen Flächen sind im Anhang A der DWA-A 102-2 in Gruppen eingestuft und bezüglich der Nutzung beschrieben. Hierzu zählen z. B. Dach (D), Verkehrsflächen (V), landwirtschaftliche Hofflächen (L), Betriebsflächen (B) oder Flächen mit besonderer Belastung (S).

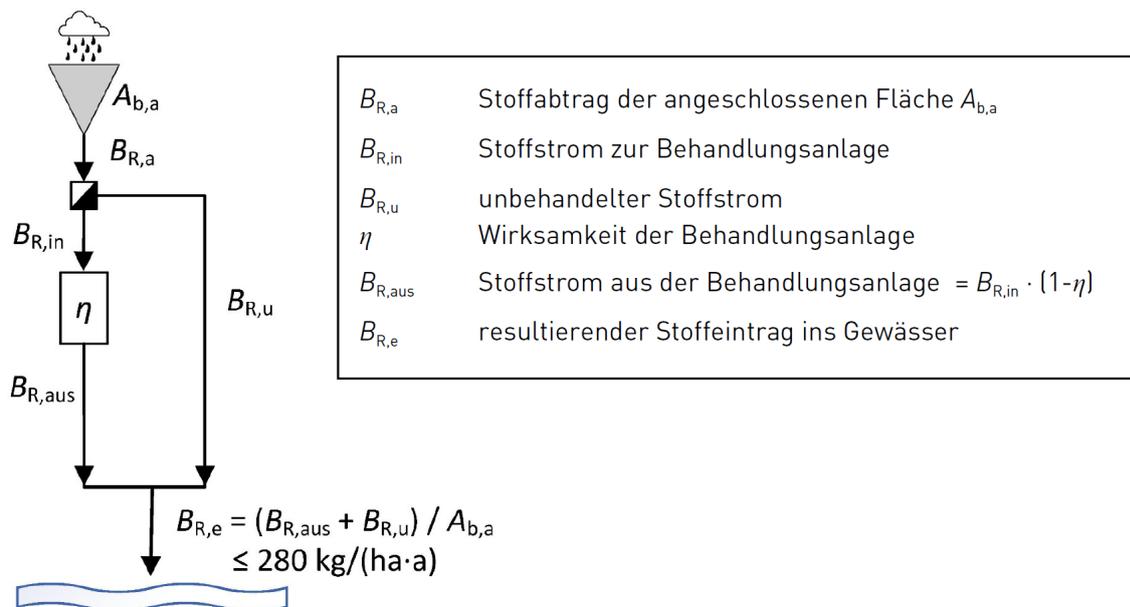
Die Flächen werden jeweils in den oben genannten Belastungskategorien von I bis III eingeordnet (Tabelle 1). Niederschlagsabfluss von Flächen der Kategorie I bedarf keiner Behandlung, dazu zählen i. d. R. Dachflächen so wie Hof-, Wege-, und Wohnstraßen mit geringer zu erwartender Verkehrsbelastung (durchschnittliche tägliche Verkehrsbelastung (DTV)  $< 300$  (Kfz/24h)). Die Verkehrsflächen der Kategorie II und III werden anhand ihrer DTV (300 - 15.000 respektive  $> 15.000$ ) aufgrund der zu erwartenden Belastung und des möglichen Harvarierisikos als mäßig bis stark belastet eingestuft. Betriebs- und Sonderflächen beziehen sich insbesondere auf Gleis- und Flughafen- oder Dachflächen mit besonderer Belastung (z. B. Metalleindeckung). Diese werden ebenfalls in die Kategorien II oder III eingeordnet. Wenn diese Flächen mit spezifischer und in der Regel gelöster stofflicher Belastung stoffspezifisch vorbehandelt werden, dann gelten sie für die weitere stoffliche Belastung an AFS63 als Kategorie I.

Für einige Abflüsse der Kategorie III sind Belastungen zu erwarten, die nicht immer nur mit dem AFS63 zutreffend abgebildet werden können. Hier ist zusätzlich mit Belastungen aus gelösten Bestandteilen zu rechnen, die im Einzelfall zu bewerten sind.

## 2.2.2 Anforderungen an den AFS63-Stoffrückhalt

Der Zufluss zu dezentralen Behandlungsanlagen kann nach jetzigem Kenntnisstand auch auf eine für die Dimensionierung von zentralen Anlagen übliche kritische Regenspende von  $r_{\text{krit}} = 15 \text{ l}/(\text{s} \cdot \text{ha})$  begrenzt werden (DWA-A 102-2 2020). Der gegebenenfalls im Bypass geführte unbehandelte Teilstrom ist bei der Bilanzierung zu berücksichtigen (Abbildung 1).

**Abbildung 1: Schemadarstellung zur Bilanzierung des resultierenden Stoffaustrages für Behandlungsanlagen mit Zuflussbegrenzung („Teilstrombehandlung“)**



Quelle: DWA-A 102-2 2020

Für den Stoffabtrag  $B_{R,a}$  (kg/a) einer Fläche  $A_{b,a}$  (ha) muss nachgewiesen werden, dass dieser in der Summe aus der im Stoffstrom aus einer Behandlungsanlage  $B_{R,aus}$  und gegebenenfalls den im Bypass vorbeigeführten, unbehandelten Stoffstrom  $B_{R,u}$  den zulässigen jährlichen Stoffaustrag von 280 (kg/(ha·a)) einhalten kann.

In Anwendungsbeispielen zur Arbeits-/Merkblattreihe DWA-A/M 102 werden zwei Anwendungsfälle der Behandlung, einmal dezentral ohne Bypass oder zentral mit Bypass, vorgestellt (DWA-A/M 102 2020). Es wird davon ausgegangen, dass dezentrale Behandlungsanlagen mit Bypass analog zu zentralen Anlagen zu bewerten sind.

Der erforderliche Wirkungsgrad  $\eta_{\text{erf, AFS63}}$  einer Behandlungsanlage, die den kompletten Stoffstrom behandelt (ohne Bypass,  $B_{R,u}$ ) ergibt sich aus dem zulässigen flächenspezifischen jährlichen Stoffaustrag AFS63 durch Regenwasserabflüsse  $b_{R,e,zul,AFS63}$  von 280 kg/(ha · a) und dem flächenspezifischen Stoffabtrag AFS63 des betrachteten Gebietes  $b_{R,a,AFS63}$  kg/(ha · a) aus nachfolgender Gleichung:

$$\eta_{\text{erf, AFS63}} = (1 - b_{R,e,zul,AFS63} / b_{R,a,AFS63}) \cdot 100 \text{ in } (\%)$$

Der erforderliche Gesamtwirkungsgrad einer Behandlungsanlage mit Bypass berücksichtigt den unbehandelten Stoffstrom  $B_{R,u}$  in der Berechnung pauschal.  $B_{R,u}$  wird, bezogen auf den Stoff- und Volumenstrom, vereinfacht in gleicher Höhe angenommen. Es wird angenommen, dass mit  $r_{\text{krit}} = 15 \text{ l}/(\text{s} \cdot \text{ha})$  90 % des Volumenstroms behandelt werden. Damit gilt per Konvention auch 90 % des Stoffstroms als behandelt. Der übrige Volumenstrom von 10 %, der im

Bypass an der Anlage vorbeigeleitet wird, enthält entsprechend 10 % des Stoffstroms. Für den erforderlichen Wirkungsgrad der Anlage wird der Frachtanteil des unbehandelten Stoffstroms  $b_{R,u,AFS63}$  (entspricht  $0,1 \cdot b_{R,a,AFS63}$ ) rechnerisch mitberücksichtigt.

$$\eta_{ges., AFS63} = 1 - (b_{R,e,zul,AFS63} - b_{R,u,AFS63}) / (b_{R,a,AFS63} - b_{R,u,AFS63}) \cdot 100 \text{ in } (\%)$$

Bezogen auf den Feststoffrückhalt aus Anlagen der Flächenkategorie II und III ergeben sich daraus folgende Wirkungsgrade (Tabelle 2).

**Tabelle 2: Anforderungen an den AFS63 Rückhalt**

Kategorie	erforderliches $\eta_{AFS63}$ am Standort zur Erreichung der Zielgröße (10 % Bypass berücksichtigt)	erforderliches $\eta_{AFS63}$ in der Behandlungsanlage
Kategorie I (280 kg/(ha · a)), Zielgröße	0 %	0 %
Kategorie II (530 kg/(ha · a))	47,2 %	52,4 %
Kategorie III (760 kg/(ha · a))	63,2 %	70,2 %

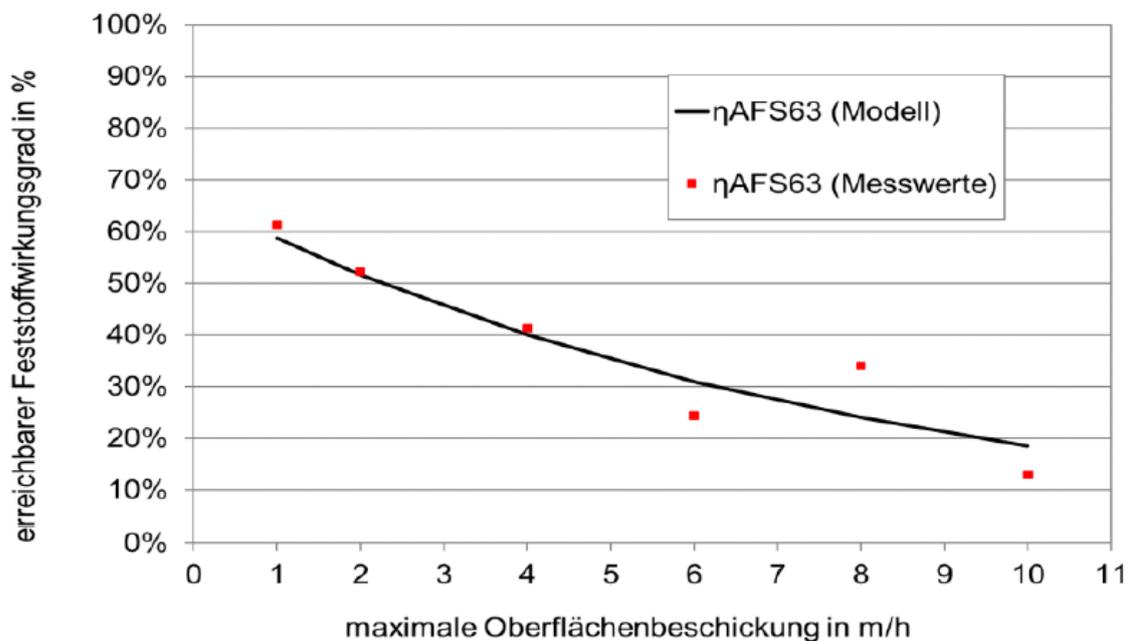
Dezentrale Behandlungsanlagen, die industriell oder gewerblich gefertigt werden, müssen laut DWA-A 102 anhand einer Konformitätsbescheinigung die Baugleichheit sowie ihre Reinigungsleistung nachweisen. Für weitergehende Regelungen hierzu wird auf das DWA-M 179 (in Bearbeitung) hingewiesen.

### 2.3 DWA-M 179 – Planung und Betrieb dezentraler Regenwasserbehandlungsanlagen (in Bearbeitung)

Das Merkblatt ist derzeit (Stand September 2022) noch in Bearbeitung. Es wird Bemessungshinweise und -anleitungen für die Planung von dezentralen Anlagen mit einer üblichen angeschlossenen Fläche von  $\leq 5.000 \text{ m}^2$  vorrangig zur Behandlung von Einzelflächen im Trennsystem und aus der Straßenentwässerung enthalten. Der Geltungsbereich umfasst die Einleitung in Oberflächengewässer und in das Grundwasser.

Feststoffwirkungsgrade für Sedimentationsanlagen werden mittels einer maximalen Oberflächenbeschickung beschrieben, vgl. Abbildung 2.

**Abbildung 2: Erreichbarer Feststoffabscheidewirkungsgrad in Abhängigkeit von der Oberflächenbeschickung bei dezentralen Sedimentationsanlagen**



Quelle: Fuchs 2021

Bei einer Oberflächenfiltration mit einer Filtergeschwindigkeit von  $v_f \leq 5$  m/h und einem Verhältnis von Filterfläche zu Einzugsgebietsfläche  $A_F/A_{b,a} \geq 0,5$  % bis 1,5 % wird ein AFS63-Rückhalt von 95 % postuliert.

Über die Flächenbilanz und den erforderlichen Wirkungsgrad kann somit der Anteil des zu behandelnden mittleren jährlichen Niederschlagsabflusses berechnet werden (siehe hierzu auch Abbildung 1).

Weiterhin werden Hinweise zu Besonderheiten von dezentralen Behandlungsstrategien gegeben, die eine intensive Befassung mit dem Gebiet bzw. der Planungsaufgabe erfordern. So sind bei besonderen Verkehrsverhältnissen wie Kreisverkehr, Ampelanlagen, hohem Schwerlastverkehr, regelmäßigen Stoffeinträgen aus der Vegetation oder der Landwirtschaft mit erhöhtem AFS63-Aufkommen zu rechnen. Bei häufiger Straßenkehrung, Feststoffrückhalt entlang des Fließweges oder sonstigen mindernden Faktoren kann dagegen mit geringerem AFS63-Aufkommen gerechnet werden (Fuchs 2021).

## 3 Bestehende Prüfverfahren für dezentrale Regenwasserbehandlungsanlagen

Im Folgenden wird im Vorgriff zur Entwicklung des Prüfverfahrens von dezentralen Anlagen zur Einleitung in Oberflächengewässer (Arbeitspaket 2.2) eine Übersicht über bereits existierende Prüfverfahren international und national gegeben. Der Blick in andere Länder und deren Strategien zur Prüfung von dezentralen Anlagen kann möglicherweise eine Quelle an Inspirationen für vorliegendes Forschungsvorhaben darstellen.

### 3.1 Übersicht der Prüfverfahren weltweit

Weltweit gibt es mittlerweile einige verschiedenartige Prüfverfahren für Regenwasserbehandlungsanlagen (Lucke et al. 2017). Etablierte Laborprüfverfahren mit dem Fokus auf Prüfung des Feststoffrückhaltes gibt es außerhalb Deutschlands in Österreich, der Schweiz, in Großbritannien, in den USA, in Kanada sowie in den Niederlanden als inoffizieller Vorschlag (Tabelle 3). In Australien und Neuseeland befinden sich die Prüfvorschriften noch in einem frühen Stadium der Entwicklung mit noch geringen Erfahrungswerten (Dierkes 2021).

Es kann grundsätzlich zwischen Feld- und Laborprüfungen unterschieden werden. In Laborprüfungen zum Feststoffrückhalt werden in der Regel typische Regenspenden und Feststoffkonzentrationen eines inerten, mineralischen Prüfmaterials in eine Anlage gebracht (Tabelle 4). Die Anlagen müssen dann einen gewissen Prozentsatz des Prüfmaterials zurückhalten. In den USA und den Niederlanden wird mit realen Feststoffkonzentrationen von Abflüssen im Bereich 100 bis 400 mg/l geprüft. In Deutschland und Österreich wird bei Anlagen zur Einleitung in das Grundwasser (z. B. DIBt), die überwiegend mit Filtern ausgestattet sind, eine auf die Feststoffe bezogene Jahresfracht mit einer erhöhten Feststoffkonzentration bis über 2.000 mg/l appliziert. Dadurch soll zum einen eine mögliche Kolmation eines Filters nachgebildet und zum anderen bei einem finalen Spülstoß die Remobilisierung der Feststoffe ermittelt werden.

Die bislang eingesetzten Prüfmaterialien sind Quarzmehle mit einer Dichte von 2,65 g/cm<sup>3</sup> und einer definierten Partikelgrößenverteilung, die sich von Prüfverfahren zu Prüfverfahren unterscheiden können. Sie basieren meistens auf den Erkenntnissen von Literaturstudien.

In Deutschland wird als Prüfstoff überwiegend Millisil® W 4 verwendet, welches eine Korngrößenverteilung im Wesentlichen bis etwa 250 µm aufweist und zu 49 % aus Partikeln < 63 µm (entsprechend des AFS63) besteht (eingetragene Marke, nachfolgend zur verbesserten Lesbarkeit als Millisil W 4 bezeichnet) (Quarzwerte GmbH 2014). Die Korngrößenverteilung des Prüfmaterials wurde ursprünglich für die DIBt-Zulassungsgrundsätze anhand der Verteilung von Schadstoffen in Straßenabflüssen gewählt (Dierschke et al. 2010). Das für die österreichische Norm zu verwendende Prüfmehl soll 50 % Bestandteile < 63 µm enthalten, wobei als Beispiel hier ebenfalls Millisil W 4 genannt wird. Das in den USA verwendete Prüfmaterial (Tape-Verfahren) ist ebenfalls ein Quarzmehl (SIL-CO-SIL® 106), jedoch insgesamt feiner als 100 µm mit einem höheren Anteil < 63 µm von etwa 90 %. Das in den USA parallel angewendete NJDEP-Verfahren und das in Kanada angewendete Verfahren sehen ein gröberes Quarzmehl bis 1.000 µm mit einem Anteil feiner Feststoffe < 75 µm von 50 % vor.

**Tabelle 3: Prüfverfahren international**

Land	Herkunft der Fläche	Einleitung in	Feldprüfung	Laborprüfung	Quelle
Deutschland	Verkehrsfläche	GW	-	AFS, MKW, Cu, Zn	DIBt (2017)
Deutschland, Bayern	Metалldach	GW/ OGW	Cu, Zn, Pb (CSB, BSB für OGW)	AFS, Cu, Zn (Vorschlag)	LfU (2011) Welker et al. (2012)
Deutschland, NRW	Verkehrsfläche	OGW	für Ableiten von Wartungshinweisen	AFS	StEB (2011) LANUV (2012)
Österreich	Befestigte Flächen, Metалldach	GW	-	AFS, MKW, Cu, Zn, Pb	Austrian Standards (2018)
Schweiz	Vielzahl von verschiedenen Anwendungsfällen		GUS, Zn, Cu, MCPP, Diuron oder andere	Zn, Cu, MCPP, Diuron; Test zur Eignung des Substrates	(Burkhardt 2019) VSA-Merkblatt (2019)
Großbritannien	Offen	Offen	-	Wie DIBt, aber ohne festgelegten Rückhalt	Dierkes (2021)
Niederlande	Offen, nur Sedimentationsanlage	Offen	-	AFS (inoffizieller Vorschlag)	Boogaard (2015)
USA (TARP) Kalifornien, Massachusetts, Maryland, New Jersey (NJDEP), Pennsylvania, Virginia	Verschiedene Anwendungsfälle	OGW	AFS	AFS dient als Zwischenzertifikat	TARP (2003) NJDEP (2021)
USA (TAPE) State Washington	Verschiedene Anwendungsfälle	GW/ OGW	nach Anwendungsfall AFS, P, SM, MKW in bestimmten Niederschlagscharakteristiken	Art des Tests offen, dient zur Vorlage beim Antrag AFS: $\rho = 2,65 \text{ g/cm}^3$	WashDoE (2018, 2011)
Kanada	Verschiedene Anwendungsfälle	OGW	-	AFS, MKW	Toronto and Region Conservation Authority (2014)

Land	Herkunft der Fläche	Einleitung in	Feldprüfung	Laborprüfung	Quelle
Australien	Verschiedene Anwendungsfälle	Offen	2 Jahre, in festgelegten Niederschlagscharakteristiken (n = 15) pH, el. LF, AFS, N, P, PSD	Test in Entwicklung: P, N, AFS	Stormwater Australia (2018)
Neuseeland	Wohngebiet, Gewerbe- oder Industriegebiet und Höhe der Verkehrsbelastung	Offen	Zulaufkonzentrationen mindestens 50 mg/l AFS, 100 µg/l Zn <sub>ges</sub> , 16 µg/l Cu <sub>ges</sub> oder 0,3 mg/l P <sub>ges</sub> und 1,4 mg/l TN	-	Lucke et al. (2017)

AFS: Abfiltrierbare Stoffe, deren Korngrößenbereich sich aus dem eingesetzten Prüfstoff ergeben; Cu: Kupfer; GUS: gesamte ungelöste Stoffe; GW: Grundwasser; MCPP: Meta-Chlorphenyl-Piperazin; MKW: Mineralöl-Kohlenwasserstoffe; N: Stickstoff; OGW: Oberflächengewässer; P: Phosphor; Pb: Blei; PSD: particle size distribution; SM: Schwermetalle; Zn: Zink

**Tabelle 4: Details zum AFS-Rückhalt in internationalen Laborprüfverfahren**

Land	Prüfanordnung zum Rückhalt von Feststoffen	Prüfmateriale	Regenspenden	Konzentration	Anforderungen (Rückhalt)	Qualifikation Prüfstelle (Labor)
<b>Deutschland DIBt</b> (DIBt 2017)	AFS-Prüfung an Originalanlage	Millisil W 4 ( $< 250 \mu\text{m}$ , AFS63-Anteil: 49 %)	2,5, 6, 25 l/(s·ha), 100 l/(s·ha) für Remobilisierung	erhöht (Jahresfrachtkonzept, 50 g/m <sup>2</sup> )	AFS250 <sub>Millisil</sub> : $\geq 92 \%$	benannt
<b>Deutschland, LfU Bayern</b> (Vorschlag: Welker et al. (2012))	AFS-Prüfung an Originalanlage	Millisil W 4 (s.o.)	2,5, 6, 25 l/(s·ha), 100 l/(s·ha) für Remobilisierung	erhöht (Jahresfrachtkonzept, 50 g/m <sup>2</sup> )	AFS250 <sub>Millisil</sub> : $\geq 80 \%$	akkreditiert
<b>Deutschland, NRW</b> (LANUV 2012; StEB 2011)	wie DIBt	Millisil W 4 (s.o.)	2,5, 6, 25 l/(s·ha), 100 l/(s·ha) für Remobilisierung	erhöht (Jahresfrachtkonzept, 50 g/m <sup>2</sup> )	AFS250 <sub>Millisil</sub> : $\geq 50 \%$	keine Anforderungen

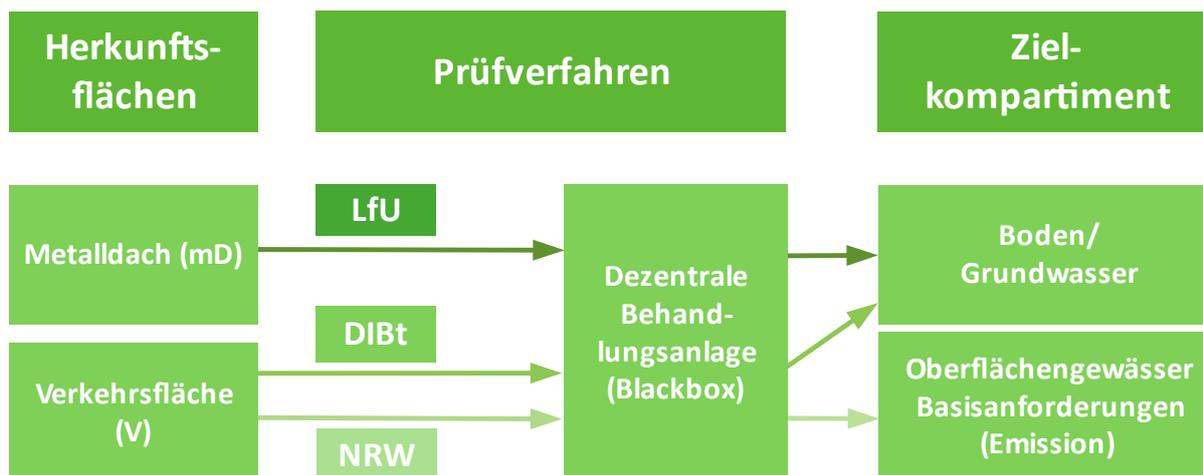
Land	Prüfanordnung zum Rückhalt von Feststoffen	Prüfmateriale	Regenspenden	Konzentration	Anforderungen (Rückhalt)	Qualifikation Prüfstelle (Labor)
<b>Österreich</b> (Austrian Standards 2018) Angaben für As : $A_{red} = 1 : 15$ ; bei geringeren Anschlussflächen angepasste Frachten	Filtersäule D = 100 mm H = 300 mm	Quarzmehl 50 % < 63 $\mu\text{m}$ z. B. Millisil W 4	-	3 · 10 g (4-Jahresfracht) auf 42 l; 2 · 10 g auf 42 l; Remobilisierung	AFS250: $\geq 80 \%$	Prüfstellen im In- und Ausland
<b>Niederlande</b> (Boogaard 2015) Vorschlag für Sedimentationsanlagen	AFS-Prüfung an Originalanlage	Millisil W 4 (s.o.)	drei verschiedene, maximal 30 l/(s · ha)	50 mg/l	Messung PSD; über Rückhalt jeder Partikelgröße wird $v_{sed}$ und schließlich Oberfläche des Reaktors berechnet	keine Angabe
<b>USA</b> (TARP 2003)	AFS-Prüfung an Originalanlage	Sil-Co-Sil® 106 Quarzmehl (< 150 $\mu\text{m}$ ) mit Nachweis	25, 50, 75, 100 und 125 % vom zuvor ermittelten maximalen Behandlungszufluss	50 und 100 mg/l	AFS150: $\geq 80 \%$	Qualifikation des Gutachters muss von Zertifizierungsstelle zugestimmt werden
<b>USA</b> (NJDEP 2021)	AFS-Prüfung an Originalanlage	Quarzmehl (< 1000 $\mu\text{m}$ , 50 % AFS75) mit Nachweis	10, 25, 50, 75, 100, 125 und 150 % vom zuvor ermittelten maximalen Behandlungszufluss	200 mg/l	$\geq 50 \%$	Qualifikation des Gutachters muss von Zertifizierungsstelle zugestimmt werden
<b>Kanada</b> (Toronto and Region Conservation Authority 2014)	AFS- und MKW-Prüfung an Originalanlage	Quarzmehl (< 1000 $\mu\text{m}$ , 50 % AFS75) mit Nachweis	40, 80, 200, 600, 1000 und 1400 l/(min · m <sup>2</sup> )	200 mg/l	Berechnung mittels zurückgehaltenem Sediment in der Anlage im Verhältnis zu eingetragenen Sediment, PSD-Bestimmung	Unabhängiges Labor, Überwachung von der Umweltbehörde Canadian ETV (Environmental Technology Verification)

## 3.2 Übersicht der Prüfverfahren in Deutschland

Im Folgenden werden die derzeit in Deutschland existierenden Prüfverfahren für dezentrale Niederschlagswasserbehandlungsanlagen und deren Zulassungsgrundsätze vorgestellt (Abbildung 3).

**Abbildung 3: Prüfverfahren für dezentrale Behandlungsanlagen in Deutschland**

mD: Metalldach; V: Verkehrsfläche, LfU: Landesamt für Umweltschutz Bayern, DIBt: Deutsches Institut für Bautechnik; alle Prüfungen mit Millisil, AFS250



Quelle: eigene Darstellung, Frankfurt University of Applied Sciences 2022

Dezentrale, technische Niederschlagswasserbehandlungsanlagen werden in Deutschland ergänzend zu zentralen Bauwerken der Regenwasserbehandlung seit etwa 15 Jahren eingesetzt. Um negative Folgen bei der Einleitung von behandlungsbedürftigen Abflüssen von z. B. Verkehrsflächen oder Metalldächern in Gewässer durch unzureichend funktionierende Anlagen zu vermeiden, haben sich verschiedene Zulassungsverfahren bzw. vergleichbare Untersuchungen etabliert. Diese beinhalten Nachweise über die Reinigungsleistung, die Umweltverträglichkeit der eingesetzten Materialien oder Aussagen über erforderliche Wartungs- und Kontrollmechanismen. Für Verkehrsflächen zur Einleitung in das Grundwasser sind Zulassungsverfahren beim Deutschen Institut für Bautechnik (DIBt 2017) angesiedelt. Länderspezifische Regelungen sind insbesondere in den Bundesländern NRW und Bayern zu finden. Für das Behandeln und anschließende Versickern von Metalldachabflüssen hat das Landesamt für Umwelt (LfU) Bayern ein Verfahren entwickelt. In NRW schließlich gibt es ein Bewertungsverfahren, anhand dessen Anlagen auf einer Liste beim Landesamt für Natur, Umwelt und Verbraucherschutz (LANUV) geführt werden, die in NRW genehmigungsfähig für die Einleitung in ein Oberflächengewässer sind. Das DIBt- und LfU-Prüfverfahren sowie die Vorgaben des Landes NRW werden nachfolgend kurz beschrieben.

### 3.2.1 DIBt-Prüfverfahren für dezentrale Regenwasserbehandlungsanlagen zur Einleitung in das Grundwasser

Auf Bundesebene entwickelt das DIBt seit 2005 Grundsätze für die Prüfung dezentraler Anlagen zum Einleiten von Verkehrsflächenabflüsse in das Boden- und Grundwassersystem mit dem Ziel einer bauaufsichtlichen Zulassung. Die Grundsätze zur Prüfung werden fortlaufend dem aktuellen Kenntnisstand angepasst. Derzeit existieren zwei Zulassungsgrundsätze für Anlagen (DIBt

2017) und durchlässige Flächenbeläge (DIBt 2012). In Erweiterung der Zulassungsgrundsätze gibt es Hinweise für die Prüfung von Filterrinnen, die aufgrund ihrer Bauart besonderen Anforderungen in der Prüfung unterliegen (DIBt 2019). Die derzeit bauaufsichtlich zugelassenen Anlagen werden aktuell online durch das DIBt veröffentlicht (DIBt 2021).

Grundlage aller drei Methoden ist eine zeitgeraffte Prüfung auf die Rückhalteleistung von Feststoffen, MKW und ausgewählten Schwermetallen. Ein Notüberlauf oder Bypass ist nicht zugelassen. Sollte es zum Einstau kommen, staut sich das Wasser auf die Fläche zurück und signalisiert dadurch Handlungsbedarf an diesem Betriebspunkt. Neben der Laborprüfung zur Wirksamkeit des stofflichen Rückhalts stellen

- ▶ bauliche Anforderungen (z. B. Umweltverträglichkeit),
- ▶ betriebliche Anforderungen (z. B. Reinigungsfähigkeit Flächenbeläge),
- ▶ sonstige Anforderungen (z. B. Übereinstimmungsnachweise),
- ▶ Salzprüfung und
- ▶ Standzeitprüfung des Filtermaterials

weitere wichtige Kriterien der Zulassung dar.

Der erforderliche Wirkungsgrad für Filtersysteme, Flächenbeläge und Rinnen (abgeleitet jeweils aus Vergleich Belastung Verkehrsflächenabflüsse mit Werten aus der BBodschV) beträgt:

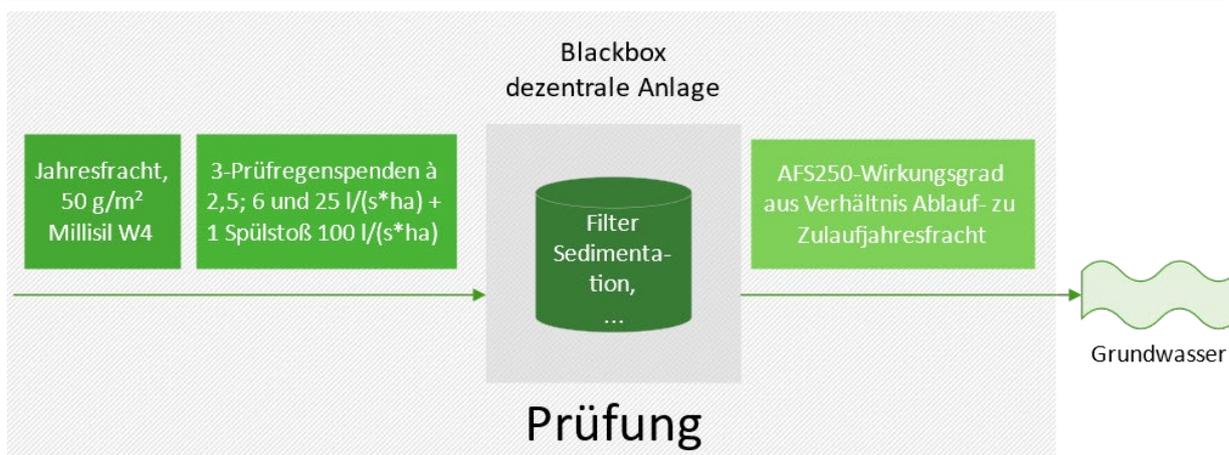
AFS <sub>(250)</sub> :	92 %
MKW:	80 %
Kupfer:	70 %
Zink:	80 %

Die Prüfung von Flächenbelägen ist für die Einleitung in ein Oberflächengewässer nicht relevant und wird daher nicht weiter beschrieben.

Die DIBt-Feststoffprüfung ist in Abbildung 4 schematisch dargestellt. Die Jahresfracht an feinen Feststoffen (Millisil W 4) von 50 g/m<sup>2</sup> Anschlussfläche wird in drei Prüfrengspenden von je 2,5, 6 und 25 l/(s · ha) im Verhältnis von 3:2:1 (Fracht in kleinster Prüfrengspende beträgt das Dreifache von Fracht in größter Prüfrengspende) auf die Anlage gebracht. Im Anschluss daran erfolgt ein feststofffreier Spülstoß mit der Intensität von 100 l/(s · ha), um mögliche Remobilisierungen des zurück gehaltenen Materials zu erfassen. Die Dauern der Prüfungen betragen 480, 200 und 48 min sowie 15 min für den Spülstoß. Wird das 2-fache des Austauschvolumens bei den einzelnen Feststoffprüfdurchgängen während dieser Zeit nicht erreicht, wird die Dauer entsprechend verlängert.

Der Ablauf wird in mehreren, in der Anzahl und zeitlichen Abfolge festgelegten Stichproben hinsichtlich abfiltrierbarer Stoffe (Gesamtgehalt) beprobt. Die daraus ermittelte Gesamtablauffracht wird ins Verhältnis zur Zulauffracht gesetzt. Aus dem Verhältnis von Ablauf- zu Zulauffracht ergibt sich der AFS<sub>Millisil</sub>-Wirkungsgrad der Anlage, wobei der Spülstoß dabei nur zur Hälfte bewertet (Festlegung DIBt-Zulassungsgrundsätze) wird.

**Abbildung 4: Schematische Darstellung der DIBt-Feststoffprüfung**



Quelle: eigene Darstellung, Frankfurt University of Applied Sciences 2022

### 3.2.2 Nachweis der Vergleichbarkeit dezentraler und zentraler Regenwasserbehandlungsanlagen in NRW (2012)

Die Anforderungen an die Niederschlagsentwässerung im Trennverfahren wurden in Nordrhein-Westfalen (NRW) durch den Runderlass vom 26.5.2004 (sogenannter Trennerlass) formuliert. Unter Ziffer 3 bzw. in Anlage 2 des Trennerlasses werden die möglichen Behandlungsverfahren für Verkehrsflächenabflüsse, die in ein Oberflächengewässer einleiten dürfen, aufgeführt. Den aufgeführten Möglichkeiten zur Niederschlagswasserbehandlung stehen technische Lösungen gleich (z. B. dezentrale Anlagen), die hinsichtlich des Schadstoffrückhalts und des dauerhaften Betriebs gleich gut funktionieren. Dies ist mit einem Nachweis der Vergleichbarkeit zu zeigen und von der zuständigen Wasserbehörde zu prüfen (MUNLV 26.05.2004).

Der Nachweis kann mit dem Prüfverfahren des DIBt erfolgen (LANUV 2012; StEB 2011). Im Gegensatz zu Anlagen, die ins Grundwasser einleiten, sind hier Bypässe erlaubt ( $> 15 \text{ l}/(\text{s} \cdot \text{ha})$ ), wobei die Anlagen aber mit einer Alarm- oder Meldevorrichtung (z. B. LED-Chip) ausgerüstet sein müssen, um z. B. Kolmationen, die zu einem regelmäßigen Umfahren von Anlagenteilen führen können, festzustellen. Die Zulassung schließt eine

- ▶ hydraulische Überprüfung im Labor zur Feststellung des maximalen Durchflusses bis zum Anspringen des Bypasses,
- ▶ eine Laborprüfung ähnlich der DIBt-Prüfung bezüglich des Parameters  $\text{AFS250}_{\text{Millisil}}$  und ergänzend Sink- und Schwebstoffe sowie
- ▶ eine ein Jahr dauernde Feldüberwachung, um die Anforderungen zu Kontrollen im Betrieb festzustellen

ein. Der erforderliche Wirkungsgrad bezüglich  $\text{AFS250}_{\text{Millisil}}$  beträgt  $\geq 50 \%$ .

### 3.2.3 LfU Metaldachprüfung

Das LfU in Bayern entwickelte in den Jahren 2008 bis 2012 in Zusammenarbeit mit der TU Kaiserslautern ein zu den DIBt-Zulassungsgrundsätzen vergleichbares Labor-Prüfverfahren für dezentrale Anlagen für Metaldachabflüsse (Welker et al. 2008b, 2008a, 2012).

Die Feststoffprüfung gleicht der DIBt-Prüfung mit dem Unterschied, dass die Gesamtjahresfracht von  $40 \text{ g}/\text{m}^2$  (Millisil W 4) gleichförmig auf die drei feststoffhaltigen Prüfregenspenden aufge-

teilt wird und eine Wirksamkeit von 80 % erreicht werden muss. Kernstück der gesamten Prüfung ist hier allerdings der Nachweis des Schwermetallrückhaltes (gelöst) in einer Filtersäule sowie der Nachweis der Standzeit des Filtermaterials.

Die Laborprüfung wurde erfolgreich einem Praxistest unterzogen (Welker et al. 2012). Eine Umsetzung erfolgte jedoch vor dem Hintergrund der Novellierung des Grundwasser- und Bodenschutzrechts bisher nicht. Alternativ werden Behandlungsanlagen für Metalldachabflüsse vorläufig mittels „Prüfkriterien zur vorläufigen Beurteilung von Versickerungsanlagen zum Rückhalt von Metallionen aus Niederschlagsabflüssen von Metalldächern“ (LfU 2011) in einem recht aufwändigen Feldtest beurteilt.

Das vorläufige Prüfverfahren sieht die Beprobung von zwanzig repräsentativen Niederschlagsereignissen im Untersuchungszeitraum von einem Jahr vor. Nach der einjährigen Beprobungsphase wird der Filterkörper in abgestuften Filterschichttiefen beprobt und auf Kupfer bzw. Zink analysiert, um die Standzeit abzuschätzen.

Weitergehende Informationen zum Prüfverfahren sowie zu dessen Ergebnissen sind in Helmreich und Horn (2010) zu finden.

## 4 Aufkommen und Zusammensetzung von Feststoffen im Niederschlagsabfluss

In der nachfolgenden Literaturstudie werden das Aufkommen und die Zusammensetzung von Feststoffen in Niederschlagsabflüssen vorgestellt. Kenntnisse hierzu sind wichtig für die Auswahl geeigneter Prüfmaterialien und zur Bestätigung der Zulaufsignale für die Prüfung. Dabei werden wesentliche, für die Prüfung relevante Herkunftsflächen eingegrenzt.

Niederschlagsabfluss aus Siedlungsgebieten wird insbesondere von Verkehrs- und Dachflächen gebildet.

Auf Dachflächen kommen erfahrungsgemäß, zusammen mit Dachabrieben und Staubbiederschlag, meist nur geringfügige Feststoffmassen auf (Gromaire-Mertz et al. 1999; Brodie und Dunn 2009; Dierschke und Welker 2013). Die Konzentration gelöster Metalle von Dachflächenabflüssen von Metalldachflächen kann höher sein als von Verkehrsflächen (Gromaire et al. 2001; Yu et al. 2017). Diese gelten daher als Sonderflächen mit vornehmlich gelösten Stoffen, deren Abflüsse spezifisch behandelt werden müssen. Auf Verfahren zur Zulassung von Anlagen der Behandlung von Metalldachabflüssen wird an dieser Stelle verwiesen (LfU 2011), vgl. Kap. 3.2.3.

Durch die Fahrtätigkeit auf Verkehrsflächen deponiert dort ein höheres Aufkommen an Fest- und partikulären Schadstoffen (Ma et al. 2018) als auf Dachflächen und ist daher für den für Oberflächengewässer eingeführten Parameter AFS63 von maßgeblicher Relevanz. Die Bedeutung des Verkehrsflächenabflusses im Bereich der Forschung zu Oberflächenabflüssen zeichnet sich auch anhand der reinen Anzahl an internationalen Studien im Vergleich zu Dachabflüssen ab (Tabelle 5).

**Tabelle 5: Anzahl an Studien (research items) zu den Schlagworten Straßen- und Dachabfluss (road runoff, roof runoff) in [www.sciencedirect.com](http://www.sciencedirect.com), [scholar.google.com](http://scholar.google.com), [www.tandfonline.com](http://www.tandfonline.com)**

Literatur-Datenbank	Straßenabfluss (road runoff)	Dachabfluss (roof runoff)
Science Direct	26.839	6.231
Google Scholar	ca. 361.000	ca. 62.900
Taylor and Francis online	8.073	1.905

Keine Filter eingestellt, Zugriff am 05.02.2021

Das Aufkommen von Feststoffen im Niederschlagsabfluss wird in Kapitel 4.1 nach verschiedenen Herkunftsflächen ausgewertet.

Die partikuläre Schadstoffbelastung wird im Bereich AFS63 anhand von Metallen und Mikroplastik zusammengefasst (Kap. 0), wobei darauf hingewiesen wird, dass die Bewertung nicht abschließend sein kann, da es noch Harmonisierungsbedarf bei der Bestimmung des Parameters AFS63 gibt, vgl. Kap. 4.1.3.

Die für die Sedimentation der Partikel wesentliche Zusammensetzung, die insbesondere für den Rückhalt von Feststoffen in Behandlungsanlagen von Bedeutung sind (Dichte, Organik, Partikelgröße), werden weiter anhand einer Literaturstudie ausgewertet (Kapitel 0).

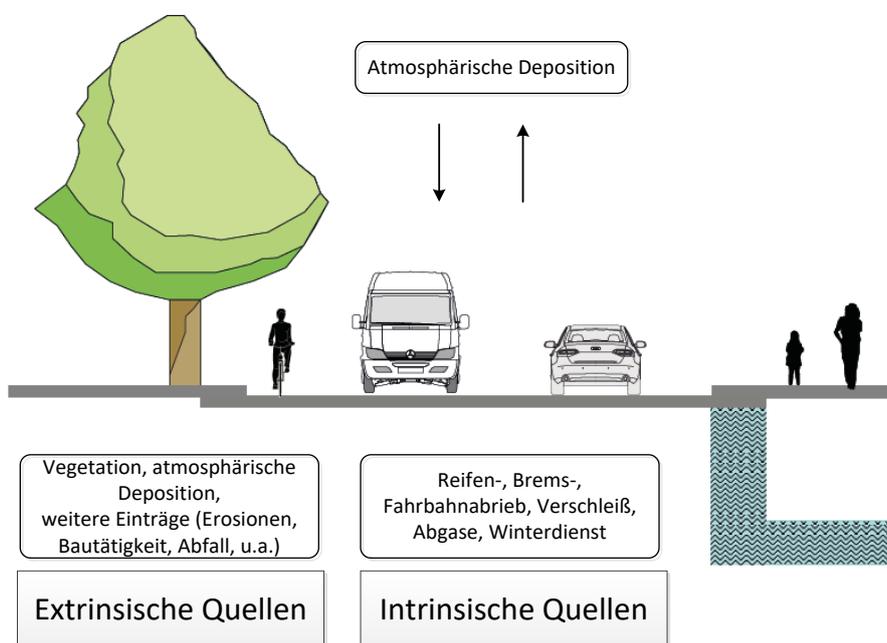
## 4.1 Feststoffaufkommen

### 4.1.1 Feststoffquellen auf Dach- und Verkehrsflächen

Das Feststoffaufkommen auf Dach- und Verkehrsflächen ist gleichermaßen durch den Staubbiederschlag aus der Atmosphäre beeinflusst. Auf Dachflächen können außerdem Abriebe und Korrosionsprodukte von Dacheindeckungen akkumulieren (Dierschke und Welker 2013).

Bei der Betrachtung möglicher Quellen an Feststoffen im Verkehrsflächenabfluss kann zwischen extrinsischen und intrinsischen Quellen unterschieden werden (Loganathan et al. 2013). Extrinsische Quellen werden von außen eingetragen, intrinsische Quellen entstehen auf der Verkehrsfläche selbst beispielsweise durch die Fahrtätigkeit (Abbildung 5).

**Abbildung 5: Feststoffquellen für den Verkehrsflächenabfluss**



Quelle: Gelhardt 2020

Intrinsische Quellen beinhalten im weitesten Sinne Rückstände des Verkehrs (Fahrbahn-, Brems- und Reifenabriebe, Verschleiß, Abgase) sowie Einträge durch den Winterdienst. Insbesondere Reifen- und Bitumenabriebe wurden in der Mikroplastikforschung als wesentlicher Eintragungspfad von Mikroplastik in die Gewässer identifiziert (siehe hierzu Kapitel 4.2.2). Als extrinsische Quellen an Feststoffen gelten beispielsweise Einträge aus der Landwirtschaft und durch Bautätigkeit im Einzugsgebiet. Als weitere Feststoffquellen sind die Vegetation und die atmosphärische Deposition (Staubbiederschlag) zu nennen (Vesting 2018). Die Vegetation am Standort liefert insbesondere saisonal Feststoffe in Form von Pollen, Laub und Ästen (Dierschke 2014b; DWA-M 378 2008). Vegetationsbestandteile enthalten je nach Zusammensetzung sowohl Zehrstoffe, Nährstoffe wie Stickstoff und Phosphor, als auch Spurenstoffe und Metalle (Bartsch und Röhrig 2016).

### 4.1.2 Standortspezifische Randbedingungen und Dargebot an Feststoffen

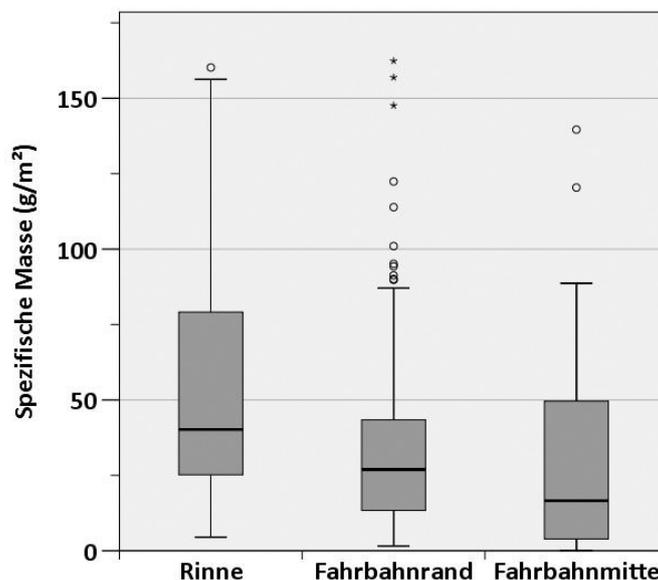
Standortbedingt kann es zu stark variierenden Feststoffaufkommen auf der Fläche und im Abfluss kommen. Für Bewertung von Studien zum Feststoffaufkommen sind Kenntnisse der standortspezifischen Randbedingungen für Feststoffe wichtig. Diese werden im Folgenden erläutert.

Der Fahrbahnbelag wurde als Rückhaltevolumen für den Abfluss der Feststoffe identifiziert, von Betonfahrbahnen können dabei mehr Feststoffe abfließen als von Asphaltfahrbahnen (Fuchs et al. 2019a; Zhao et al. 2018a; Wicke et al. 2012). Auf Asphaltfahrbahnen mit stark ausgefahrenen Spurrinnen und dadurch bedingt geringeren Profiltiefen sammeln sich ebenfalls weniger Feststoffe als in den unbefahrenen Zwischenräumen (Gustafsson et al. 2019). Die Feststoffdepositionen auf Verkehrsflächen liefern das für den Abfluss verfügbare Dargebot, welches somit das Aufkommen im Abfluss beeinflusst.

Die Akkumulation von Feststoffen wird u. a. durch Randbebauungen als Barrieren, wie beispielsweise Bordsteine oder Lärmschutzwände (Trocmé et al. 2013; Sartor und Boyd 1972; Dierschke 2014b), begünstigt. Feststoffe akkumulieren außerdem nicht gleichförmig über den Straßenquerschnitt, sondern insbesondere am Fahrbahnrand bedingt durch die Querneigung der Verkehrsfläche, durch Wind- und Regenverfrachtungen sowie Bordsteine (Zafra et al. 2008; Muthusamy et al. 2018; Deletic und Orr 2005; Sartor und Boyd 1972; Grottker 1987; Neupert et al. 2021). Diese Beobachtung konnten auch in eigenen Untersuchungen bestätigt werden (Abbildung 6). Es wurde gezeigt, dass die spezifische Masse von der Fahrbahnmitte in Richtung der Rinne statistisch signifikant zunimmt (Gelhardt 2020). In Rinne, Fahrbahnrand und -mitte wurden in der zentralen Tendenz über einen langen Beobachtungszeitraum von einem Jahr Werte von 40, 27 respektive 17  $\text{g}/\text{m}^2$  gefunden. Feststoffe in der Rinne stehen im Niederschlagsabfluss unmittelbar zu Verfügung.

#### Abbildung 6: Box-Plots – Verteilung der spezifischen Massen ( $\text{g}/\text{m}^2$ ) über den Straßenquerschnitt

Rinne = 0 bis 0,25 m (n = 126), Fahrbahnrand = 0,25-0,5 m (n = 138) und Fahrbahnmitte ca. 2 m ab Bordsteinkante (n = 50) an verschiedenen Standorten in Frankfurt am Main, 2018



Quelle: Gelhardt 2020

Reduzierend auf das Feststoffaufkommen wirken sich Entnahmen durch die Straßenreinigung (Kim und Jeong 2014) sowie Resuspendierungen von feinen Feststoffen durch Wind und Turbulenzen erzeugt durch die Fahrtätigkeit aus (Ball et al. 1998). Dies zeigt sich auch in der Akkumulation während niederschlagsfreier Trockentage (Hichri et al. 2019; Zafra et al. 2008; Chow et al. 2015). Diese stagniert jedoch aufgrund der oben genannten Reduktion an Feststoffen nach fünf bis 14 Tagen (Egodawatta und Goonetilleke 2006; Chow et al. 2015; Li und Barrett 2008).

Saisonal gibt es außerdem Schwankungen im Feststoffaufkommen (Leutnant et al. 2016; Brezonik und Stadelmann 2002). Eine über mehr als zehn Jahre aufgezeichnete Messreihe im Straßenabfluss der Derchinger Straße in Augsburg hat gezeigt, dass es auch standortunabhängig zu starken Abweichungen im Feststoffaufkommen kommen kann (Nadler und Meißner 2007). Den hohen Schwankungen im Aufkommen wurden insbesondere winter- und landwirtschaftlich bedingte Feststoffeinträge zugeschrieben.

Der Abfluss von Feststoffen sowie deren Partikelgrößenanteile ist komplex und hängt von vielen Faktoren ab. Bezogen auf den Prozess der Reduktion von Feststoffen durch Niederschlagsabfluss, wurden insbesondere die Niederschlagsmenge, -dauer und -intensität sowie die vorangegangene Trockenperiode als Randbedingungen untersucht (Zuo et al. 2011; Muthusamy et al. 2018; Liu et al. 2013). Je nach Niederschlagsvariabilität und den auf der Fläche verfügbaren Feststoffen findet der Abfluss der Feststoffe entweder transport- oder ressourcenlimitiert statt. Zhao et al. (2016) dokumentierten für feine Feststoffe ( $< 150 \mu\text{m}$ ) einen ressourcenlimitierten und für gröbere Anteile ( $\geq 150 \mu\text{m}$ ) einen transportlimitierten Abfluss. Insbesondere schwache bis mäßige Regenereignisse wurden hier als transportlimitierend dokumentiert. Zafra et al. (2008) konnten in ihren Untersuchungen lediglich ressourcenlimitierten Abfluss feststellen.

Mit zunehmender Größe des Einzugsgebietes nimmt das Feststoffaufkommen aufgrund der langen Fließwege ab. Das bedeutet, dass abhängig von der Topographie und der Niederschlagsvariabilität Feststoffe auf den Flächen zurückbleiben und nicht abflusswirksam werden. Eine weitere Senke sind die Straßenabläufe und das Kanalsystem. Dies bedeutet, dass in dezentrale Anlagen vergleichsweise mehr Feststoffe mit einem geringeren Feinanteil eingetragen werden, während zentrale Anlagen mit geringeren und gleichbleibenden Feststofffrachten mit einem hohen Feinanteil (etwa 90 %) beaufschlagt werden (Fuchs et al. 2010; Eyckmanns-Wolters et al. 2013).

Alles in allem sind die standortspezifischen Einflussfaktoren vielfältig und die Feststoffbelastung pro Standort und Jahr aufgrund der beschriebenen Prozesse der Akkumulation und Reduktion variabel.

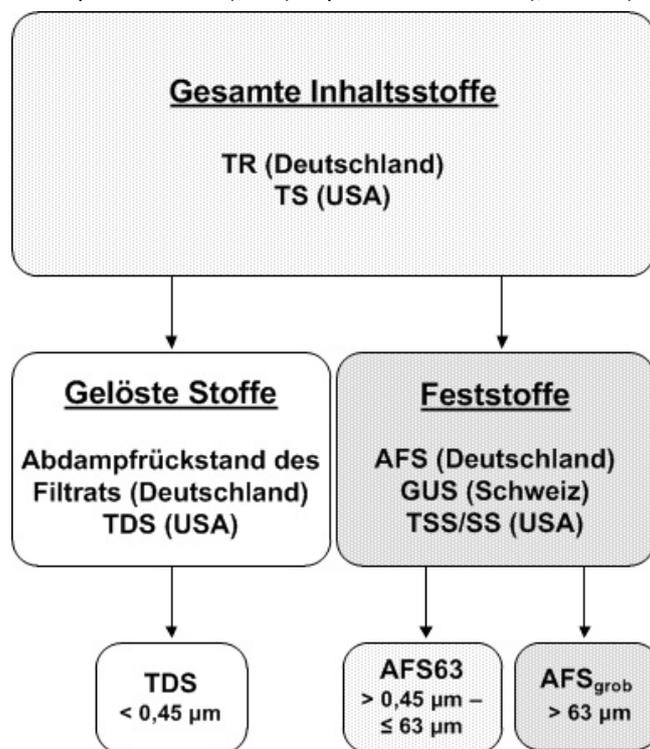
#### **4.1.3 Methodenspezifische Randbedingungen für die Probenahme, die Bestimmung und die Auswertung von Feststoffen im Abfluss**

Die abfiltrierbaren Stoffe (AFS) sind ein etablierter Summenparameter aller ungelösten Inhaltsstoffe (u. a. partikulärer Schadstoffe) im Abwasser und werden in Deutschland standardmäßig gemessen (DIN 38409-2 1987; DIN EN 872 2005). Die englischsprachige Äquivalentbezeichnung ist Total Suspended Solids oder Suspended Solids (TSS/SS), in der Schweiz gesamte ungelöste Stoffe (GUS) (Abbildung 7).

Konventionell wird der Anteil  $\leq 0,45 \mu\text{m}$  als gelöster Anteil (Total Dissolved Solids, TDS) und der Anteil  $> 0,45 \mu\text{m}$  als partikulärer Anteil definiert. In Deutschland wurde aufgrund der hohen Schadstoffkonzentrationen in feinen Feststoffen außerdem der Parameter AFS63 mit einer Unterteilung in die Anteile  $\leq 63 \mu\text{m}$  (AFS63) und  $> 63 \mu\text{m}$  (AFS<sub>grob</sub>) eingeführt. Probenahmeort, -art, -aufbereitung und Analytik des AFS tragen entscheidend zur Zusammensetzung der Proben bei (Dierschke 2014b). Je nach Fragestellung in einem Messprogramm werden unterschiedliche Untersuchungsziele verfolgt. Ergebnisse verschiedener Studien sind daher mitunter nur schwer vergleichbar. Im Folgenden werden daher Randbedingungen erläutert, die für die Interpretation der Ergebnisse eines Messprogrammes bedeutend sind.

**Abbildung 7: Bezeichnungen gelöster und ungelöster Anteile in Abwasser;**

TR (Trockenrückstand), TS (Total Solids), TDS (Total Dissolved Solids), AFS (abfiltrierbare Stoffe), GUS (gesamte ungelöste Stoffe), TSS (Total Suspended Solids), SS (Suspended Sediments), AFS63 (abfiltrierbare Stoffe  $\leq 63 \mu\text{m}$ )



Quelle: Dierschke und Welker 2015

Probenahmeorte zur Bestimmung der AFS in Niederschlagsabflüssen sind entweder der direkte Abfluss von der Verkehrsfläche (Straßenablauf oder Konstruktion für das Messprogramm) im Kanal oder der Zulauf von zentralen Behandlungsanlagen. Schwere, grobe Bestandteile können auf dem Weg voredimentieren, so dass bei der Bewertung von Studien auf den Ort der Probenahme zu achten ist. Für die Einschätzung der Belastung dezentraler Behandlungsanlagen, die direkt angrenzend an die Herkunftsfläche mit besonders kurzen Fließwegen beaufschlagt werden, sollten daher nur Studien berücksichtigt werden, in denen der Verkehrsflächenabfluss direkt beprobt wurde.

Für die Prüfung von Behandlungsanlagen im Labor ist oftmals die mittlere Jahresfracht relevant. Daher sind Aussagen aus Studien besonders wertvoll, die das gesamte Feststoffaufkommen eines Jahres darstellen. Häufig werden jedoch nur einige Ereignisse oder wenige Monate im Jahr beprobt. In vielen Studien wird ein EMC (*Event Mean Concentration*) angegeben. Dies ist die gesamte, gemessene Feststofffracht geteilt durch das gesamte Abflussvolumen eines Regenereignisses (Mosley und Peake 2001; Lindfors et al. 2020). Um eine Aussage über die Jahresfracht zu erhalten, sind allerdings möglichst alle Ereignisse eines Jahres, besser noch mehrerer Jahre, zu erfassen. Dies wird im englischen Sprachgebrauch als „Site Mean Concentration (SMC)“ ausgedrückt. In sehr ambitionierten Studien werden 70 % bis maximal 80 % der Jahresereignisse erfasst (Grotehusmann et al. 2017; Welker et al. 2018). Bei der Auswertung mehrerer, wenn auch nicht aller, Ereignisse wird häufig der Median aller als EMC erfassten Ereignisse dokumentiert. Damit werden Ausreißer eliminiert, was bei der Ermittlung einer Jahresfracht von Niederschlagsereignissen zu geringen Jahresfrachten führt. Der jahreszeitliche stark schwankende Verlauf von Frachten in Niederschlagsabflüssen ist charakteristisch gerade für kleinere Einzugsgebiete (Welker et al. 2018).

Bei der Analytik von (Teil-)proben ist auf eine ausreichende Homogenisierung und repräsentative Probenentteilung zu achten (Dierschke und Welker 2015). Für eine anschließende Untersuchung von Partikelgrößenanteilen hat sich gezeigt, dass eine Homogenisierung der Probe nur durch Schütteln oder Rühren nicht ausreicht, um Agglomerate aufzulösen und beispielhaft in die Korngrößenbereiche 0,45 µm bis 63 µm (AFS63) und  $\geq 63$  µm zu trennen (Welker et al. 2019a; Li et al. 2005). Die labortechnische Bestimmung des neuen Parameters AFS63 wird weiterhin noch untersucht (Baum et al. 2018; Welker et al. 2019a). Baum et al. (2018) haben anhand einer Literaturstudie gezeigt, dass die Bestimmung des AFS63 bislang noch uneinheitlich vorgenommen wird. Insbesondere stellt das Agglomerationsverhalten der Feststoffe ein Problem in der vergleichbaren Trennung der Anteile  $\leq$  und  $> 63$  µm dar. Eine Dispergierung der Suspension ist hierzu notwendig. Ein DIN-Ausschuss und ein Forschungsvorhaben in NRW beschäftigen sich aktuell mit dieser Fragestellung.

Im zu entwickelnden Prüfverfahren wird daher darauf geachtet, eine Probenentteilung zu vermeiden. Eine Dispergierung von definierten, inerten Standardmaterialien ohne Agglomerationsneigung hat bei der AFS63-Bestimmung keine Auswirkung und ist daher bei der Prüfung von dezentralen Anlagen nicht von Belang.

#### 4.1.4 Feststoffaufkommen im Niederschlagsabfluss - AFS und AFS63

Die Erkenntnisse zum Einfluss methoden- und standortspezifischer Randbedingungen auf die Variabilität der Messwerte sowie oft unzureichender Dokumentation der Randbedingungen wurden auch im neuen technischen Regelwerk DWA-A 102-2 (2020) zum Anlass genommen, keine statistischen Auswertungen des Feststoffaufkommens in Niederschlagsabflüssen vorzunehmen. Vielmehr wurden anhand des Forschungsstandes Bereiche der Zulässigkeit des Feststoffauftrags anhand von bekannten Wertespektren verdichtet und daraus standardisierte Rechenwerte für den neuen Referenzparameter AFS63 (Feststoffe mit einer Korngröße 0,45 µm bis 63 µm) abgeleitet (Schmitt et al. 2010; Welker 2004). Die Einschätzung zur Feststoffbelastung pro Fläche basiert auf Literatúrauswertungen des Feststoffaufkommens, die die Grundlage für die Annahmen des DWA-A 102 lieferte (Tabelle 6).

**Tabelle 6: Orientierungswerte - Stoffaufkommen AFS und AFS63 im Niederschlagsabfluss unterschiedlicher Herkunftsflächen**  
 („mittlere jährliche Verschmutzung“) (DWA-A 102-2 2020)

Abflussart / Herkunft	Abfiltrierbare Stoffe AFS (mg/l)	Feinanteil AFS63 (mg/l)
Dachabfluss	50	50
Verkehrsflächenabfluss	200	120
Mischflächenabfluss	150	85

Dachflächen sind demnach nur in sehr geringfügigem Ausmaß mit Feststoffen belastet und bestehen in der Regel gänzlich aus Feinanteilen  $< 63$  µm. Sie liegen damit ohnehin an der Schwelle der Behandlungsbedürftigkeit gemäß dem technischen Regelwerk (Tabelle 1). Verkehrsflächenabflüsse weisen insbesondere aufgrund des großen Dargebots an Feststoffen in Form von Straßenstaub auf der Verkehrsfläche ein hohes Feststoffaufkommen auf. Mischflächenabflüsse bestehen aus Dach- und Verkehrsflächenabflüssen sowie weiteren befestigten Flächen. Dieser liegt in der Regel in einem mittleren Bereich des Feststoffaufkommens. Bei beiden Abflussarten wird von Anteilen  $< 63$  µm und  $\geq 63$  µm ausgegangen.

Neben den für die Einführung des Parameters AFS63 durchgeführten Literaturstudien wurden insbesondere bis 2014 das Aufkommen für verschiedene Herkunftsflächen in Literaturreviews verglichen (Tabelle 7).

**Tabelle 7: Übersicht Literaturreviews zu AFS und AFS63 von verschiedenen Herkunftsflächen (in mg/l)**

Studie	Herkunftsfläche	Auswertemodus	AFS (mg/l)	AFS63 (mg/l)
Duncan (1999)	Stadtstraße (hoch)	Median	232	
	Stadtstraße (gering)	Median	64	
	Dachfläche	Median	41	
	Mischfläche	Median	152	
Brombach und Fuchs (2003)	Mischfläche	Median	141	
Dierschke (2014b)	Stadtstraße	Schwerpunktwerte	30-700	
	Parkplätze	Schwerpunktwerte	< 90	
	Autobahn	Schwerpunktwerte	40-700	62-177
	Dachfläche	Schwerpunktwerte	20-30 (Schwerpunkt ohne Pollen und Industrie)	

Auch in den hier aufgeführten Literaturstudien wurden Schwerpunktwerte in ähnlichen Größenordnungen wie in den für das Arbeitsblatt DWA-A 102 wesentlichen Bereichen herausgearbeitet (Tabelle 8).

Zur Erweiterung des Kenntnisstandes wurden neue Studien, in denen der AFS63 bestimmt wurde, ausgewertet. Straßen und Mischflächen liefern einen signifikanten Feststoffbeitrag im Abfluss, Dachflächen dagegen einen in der Regel sehr geringen Beitrag. Daher werden Dachflächen im Fortlaufenden nicht weiter betrachtet. Autobahnen und Außerortsstraßen sind nicht Umsetzungsgegenstand des neuen Arbeitsblattes und wurden daher ebenfalls nicht berücksichtigt.

AFS63 ist ein nur in Deutschland geläufiger Leitparameter, daher gibt es auch nur in Deutschland Studien, die sich explizit mit AFS63 befassen, siehe Tabelle 8. Insgesamt wird anhand der Tabelle deutlich, dass die wenigen Studien, in denen bislang AFS63 bestimmt wurde, sich deutlich hinsichtlich der Bestimmungsmethode unterscheiden. In den Studien wurden die Summen der EMC statistisch unterschiedlich ausgewertet u. a. Mittelwerte, 25 %-Quartil, Median, 75 %-Quartil, Minimum- und Maximumwerte. Eine eindeutige Ableitung von AFS63-Konzentrationen und -Anteilen oder gar eine Herleitung eines flächenspezifischen Abtrags sind mit der jetzigen Datenlage und ohne Normierung der Bestimmungsmethode nicht möglich. Die publizierten Konzentrationsbereiche werden im Weiteren trotzdem zusammengefasst.

Die Daten zum Gesamtfeststoffaufkommen in Abflüssen von Stadtstraßen bestätigen bekannte Messbereiche mit Mittelwerten von 79 - 210 mg/l AFS und Medianwerten von 77 - 188 mg/l AFS. Bislang unterschiedlich analytisch ermittelte AFS63-Konzentrationen liegen bei Mittelwerten zwischen 57 - 170 mg/l AFS63 und Medianwerten von 52 - 96 mg/l AFS63. Auf einem Parkplatz wurde ein Mittelwert von 248 mg/l AFS und 156 mg/l AFS63 gemessen.

**Tabelle 8: Literaturreview aktuelle Studien zu AFS und AFS63 im Straßenabfluss nach Herkunftsflächen in Deutschland**  
(eigene Auswertung, gruppiert nach Herkunftsflächen)

Studie	Herkunftsfläche	Au (ha)	DTV (Kfz/24h)	Anzahl Ereignisse (n)	AFS63-Bestimmungsmethode (Probenteilung, Filterarbeit, Dispergierung, u.a.)	Auswertemodus EMC aus n Ereignissen	AFS (mg/l)	AFS63 (mg/l)	AFS63 (% von AFS)	AFS, Min/Max (mg/l)
<b>Baum und Dittmer (2017)</b>	Industrie-/Gewerbegebiet	77		17	Dierschke und Welker (2015), Eyckmanns-Wolters et al. (2013) Dispergierung: <i>ND</i>	MW	56	21	37 %	
<b>Baum et al. (2021)</b>	Industrie-/Gewerbegebiet	77	9.000-17.000	23	Dierschke und Welker (2015) Dispergierung: <i>ND</i>	MW / Median	63 / 33	43 / 27	68 %	9-237 AFS63: 8-191
<b>Grüning und Uhl (2016)</b>	Mischfläche	4,7		39	Dierschke und Welker (2015) Dispergierung: <i>Homogenisierung mit Magnetrührer</i>	MW (25 %-Quartil /Median/75 %-Quartil)	114 (10/21/73)	18 (5/9/17)	47 %	1-3.645 AFS63: 0,3-374
<b>Fuchs et al. (2020)</b>	Mischflächen, Zulauf RKB	30/49	NB	19	<i>ND</i>	MW (25 %-Quartil /Median/75 %-Quartil)	37 (23/37/45)	31 (21/30/39)	81 %	10-84 AFS63: 9-65
<b>Grüning und Uhl (2016)</b>	Parkplätze	0,22		38	Dierschke und Welker (2015) Dispergierung: <i>Homogenisierung mit Magnetrührer</i>	MW (25 %-Quartil /Median/75 %-Quartil)	248 (59/169/335)	156 (41/94/179)	55 %	7-1.842 AFS63: 6-1.168
<b>Fettig und Pick (2020)</b>	Stadtstraße	0,03	12.000	69	<i>Gesamte Probe, Dispergierung: Schütteln, Glasfaserfilter**</i>	MW	205	132	64 %	
<b>Hilliges et al. (2017)</b>	Stadtstraße	0,02	9.690		Dierschke und Welker (2015) Dispergierung: <i>ND</i>	MW / Median	--	86 / 96	85 %	

Studie	Herkunftsfläche	Au (ha)	DTV (Kfz/24h)	Anzahl Ereignisse (n)	AFS63-Bestimmungsmethode (Probenteilung, Filterarbeit, Dispergierung, u.a.)	Auswertemodus EMC aus n Ereignissen	AFS (mg/l)	AFS63 (mg/l)	AFS63 (% von AFS)	AFS, Min/Max (mg/l)
<b>Grüning und Uhl (2016)</b>	Stadtstraße	2,38	30.000	17	Dierschke und Welker (2015) Dispergierung: <i>Homogenisierung mit Magnetrührer</i>	MW (25 %-Quartil /Median/75 %-Quartil)	79 (53/77/99)	57 (35/52/76)	67 %	3-237 AFS63: 3-168
<b>Barjenbruch et al. (2016)</b>	Stadtstraße	0,03	30.000	15	<i>DIN 38409-2 (1987)</i> Dispergierung: <i>ND Membranfilter</i>	MW (25 %-Quartil /Median/75 %-Quartil)*	210 (100/181/310)	170 (50/71/170)	MW: 56 % Median: 39 %	Max: 564 Max. AFS63: 443
<b>Rommel und Helmreich (2019)</b>	Stadtstraße	0,01-0,16	24.000	7	Rommel und Helmreich (2018) Dispergierung: <i>ND</i> AFS = < 1 mm	Median	--	--	83 %	

\*Werte abgelesen. \*\* Persönliche Mitteilung; Pick, 24.11.2020, DTV = durchschnittliche tägliche Verkehrsstärke (Kfz/24h), ND = nicht dokumentiert, MW = Mittelwert.

Mischflächenabflüsse werden häufig aus größeren Einzugsgebieten mit mehreren Hektar gemessen. Das Feststoffaufkommen ist hier aufgrund der längeren Fließwege und dem Rückhalt auf der Fläche in der Regel geringer (Fuchs et al. 2010; Dierschke 2014a). Dies zeigt sich auch in aktuellen Studien, in denen AFS- respektive AFS63-Mittelwertkonzentrationen von 37 - 114 mg/l AFS respektive 18 - 31 mg/l AFS63 dokumentiert wurden.

Es wurde jeweils ein Wertebereich für AFS und AFS63 in Oberflächenabflüssen von minimal – maximal 1 - 3.645 mg/l AFS respektive 0,3 - 1.168 mg/l AFS63 dokumentiert. Saisonal ist das Feststoffaufkommen im Winter im Bereich AFS und AFS63 erhöht (Monrabal-Martinez et al. 2019; Helmreich et al. 2010; Hilliges et al. 2017). Das zunehmende Aufkommen an Feststoffen wird u. a. mit Salzstreuung erklärt, da Salz als Dispergierungsmittel wirkt, aber auch zunehmender Korrosionsprodukte in feuchter, kalter Jahreszeit sowie dem Einsatz von Winterreifen (Hilliges et al. 2017; Monrabal-Martinez et al. 2019). Insgesamt wurden AFS63-Anteile von 37 - 85 % dokumentiert. Dieser Bereich ist aufgrund uneinheitlicher Bestimmungsmethoden jedoch kein verlässlicher Wert.

Für dezentrale Behandlungsanlagen im Bereich weniger hundert bis tausend Quadratmeter Anschlussfläche ist mit höheren Feststoffaufkommen im Bereich von Straßenabflüssen zu rechnen. Aufgrund der fehlenden Harmonisierung der Bestimmungsmethode des AFS63 lassen sich zum jetzigen Zeitpunkt keine belastbaren Feststoffaufkommen ableiten. Die angegebenen Schwerpunktbereiche des DWA-A 102 scheinen sich jedoch weiterhin zu bestätigen.

## **4.2 Zusammensetzung von Niederschlagsabfluss hinsichtlich partikulärer Schadstoffe**

Da partikulär assoziierte Schadstoffe wie Schwermetalle, aber auch organische Schadstoffe wie polyzyklische aromatische Kohlenwasserstoffe (Baum und Dittmer 2017; Becouze-Lareure et al. 2019) die Grundlage für die Auswahl des AFS63 als Leitparameter bilden, werden zur Bestätigung in diesem Kapitel beispielhaft Metalle und ihre Verteilung im Straßenstaub und –abfluss ausgewertet (Kapitel 4.2.1). Außerdem wird der Stand der Forschung zu Mikroplastik aus Reifen- und Bitumenabrieben als Bestandteil des Straßenabflusses vorgestellt (Kapitel 4.2.2) und die Schnittmenge zu dem Parameter AFS63 hergeleitet.

### **4.2.1 Metalle**

Im Straßenabfluss liegen Metalle sowohl in gelöster, aber abhängig vom Metall auch in überwiegend partikulärer Form vor (Gnecco et al. 2019; Huber et al. 2016; Becouze-Lareure et al. 2019; Monrabal-Martinez et al. 2019). Die partikulären Anteile können dabei als Abriebe und an Feststoffen assoziiert vorliegen (Valotto et al. 2019; Adamiec et al. 2016; Gunawardana et al. 2013). Sie können mittels Sorption oder Fällung an unterschiedliche Bindungspartner wie beispielhaft Organik, Karbonate, Eisen-/Manganoxide und Tone gebunden sein (Jayarathne et al. 2019a; Djukić et al. 2016). Die Auftretensform kann u. a. von der vorgefundenen Zusammensetzung, den zeitlichen Verwitterungsprozessen, dem pH-Wert oder den Oberflächenfunktionsgruppen abhängen (Jayarathne et al. 2019b; Jayarathne et al. 2018).

Huber et al. (2016) haben hierzu eine umfassende Metadatenstudie durchgeführt. In Tabelle 9 sind die statistischen Daten aus der Studie für gesamte und partikuläre Metallkonzentrationen für die drei Metalle Kupfer (Cu), Zink (Zn) und Blei (Pb) nach drei Klassen des durchschnittlichen täglichen Verkehrs (DTV) < 5.000, 5.000 - 15.000 und ≥ 15.000 DTV ausgewertet.

**Tabelle 9: Schwermetallkonzentrationen ( $\mu\text{g/l}$ ) für Cu, Zn und Pb in Verkehrsflächenabflüssen urbaner Straßen verschiedener durchschnittlicher täglicher Verkehrsstärken (DTV) (Daten aus Metastudie nach Huber et al. 2016)**

DTV-Kategorie	Wert	Cu	Zn	Pb
Stadtstraße, $\geq 15.000$ DTV	Gesamt, Min	26	120	6
	Gesamt, Max	288	1940	380
	Gesamt, Median	87	351	45
	Partikulär, Median	64	125	41
Stadtstraße, 5.000-15.000 DTV	Gesamt, Min	7	23	4
	Gesamt, Max	280	1.000	136
	Gesamt, Median	31	274	20
	Partikulär, Median	19	243	20
Stadtstraße, < 5.000 DTV	Gesamt, Min	6	25	2
	Gesamt, Max	180	940	152
	Gesamt, Median	48	149	27
	Partikulär, Median	37	124	27

Der partikuläre Anteil von Cu, Zn und Pb ist unabhängig von der DTV hoch und liegt in der Regel bei über 50 % der gesamten Metallgehalte. Es ist zu sehen, dass der Median der gesamten und der partikulären Schwermetallanteile nicht durchgängig mit steigender DTV zunimmt. Dies kann unter anderem bedingt sein durch variierendes Fahrverhalten, z. B. Bremsen und Beschleunigen an Kreuzungen (Huber et al. 2016; Horstmeyer et al. 2016), Windturbulenzen durch die Fahrzeuge (Ball et al. 1998) oder Windkanaleffekte in engen Stadtstraßen (Coceal und Belcher 2005; Mills 1997). Dadurch werden die feinen, hochbelasteten Anteile in die Luft resuspendiert und landen dann nicht am Ort des Entstehens im Abfluss. Der Einfluss der DTV auf die Schwermetallkonzentration im Straßenabfluss wurde bislang unterschiedlich bewertet. Drapper et al. (2000) konnten für Zink und AFS im Verkehrsflächenabfluss einen leicht positiv linearen Zusammenhang mit der DTV bestätigen. Davis und Birch (2010) haben die DTV wiederum nicht als Einflussfaktor für die Metallkonzentration in Straßenabfluss identifiziert. Durch Untersuchung des angrenzenden Bodens in Banketten konnte ein deutlicher Zusammenhang zwischen Zn und Cu zur DTV nachgewiesen werden (Tedoldi et al. 2020).

Die Metallkonzentrationen steigen in Straßenstaub und -abfluss mit abnehmender Partikelgröße tendenziell an (Lau und Stenstrom 2005; Sansalone und Tribouillard 1999; Ma et al. 2018; Baum und Dittmer 2019). Schwermetalle anthropogenen Ursprungs wie beispielsweise Zink, Kupfer, Blei aus Fahrtätigkeit sind insbesondere in den feinen Anteilen der Feststoffe im Abfluss angereichert (McKenzie et al. 2008). Oft enthält die feinste Siebfraktion (z. B. < 38  $\mu\text{m}$ , < 63  $\mu\text{m}$ , < 75  $\mu\text{m}$ ) die höchste Metallkonzentration und die Konzentration nimmt dann mit zunehmenden Partikelgrößen kontinuierlich ab (Zhu et al. 2008; Jayarathne et al. 2017; Aryal et al. 2014; Zhang et al. 2015). Es gibt auch Studien, die höhere Metallkonzentrationen in den direkt nachfolgenden Siebfraktionen (z. B. 38-75  $\mu\text{m}$ , 75-150  $\mu\text{m}$ ) dokumentieren (Lau und Stenstrom 2005; Li et al. 2015; Zanders 2005; Wang et al. 2020). Für Straßenstaub < 2.000  $\mu\text{m}$  wurde bereits gezeigt, dass deutlich mehr als 60 % der Metallfracht in den Fraktionen < 250  $\mu\text{m}$  gebunden sind (Shen et al. 2016; Zafra-Mejía et al. 2018; Yu et al. 2017; Zhao et al. 2018b; Sutherland 2003). Baum et al. (2021) dokumentieren für Straßenabfluss eine Metallfracht in AFS63 von 74-79 %. Dies ist der feineren Partikelgrößenverteilung im Straßenabfluss zuzuschreiben, die anteilig mehr Feststoffe < 63  $\mu\text{m}$  enthält als im Straßenstaub (siehe Kapitel 4.3.1). Sowohl Hilliges et al. (2017) als auch Baum et al. (2021) dokumentierten Korrelationen zwischen AFS63 und Schwermetallgehalten in Straßenabfluss. Hilliges et al.

(2017) wiesen auch im Winter sowohl höhere AFS63- als auch Schwermetallkonzentrationen nach. Diese werden erhöhten Feststoffeinträgen durch Frost, Salzeinträgen und mehr Individualverkehr aufgrund der Kälte zugeordnet (Dierschke 2014b). In Sedimentationsversuchen wurde mit verkehrsflächenbürtigen Feststoffen außerdem gezeigt, dass unter Laborbedingungen diskretes Absetzverhalten der Partikel vorliegt und es daher einen starken positiven Zusammenhang zwischen der Absetzbarkeit von Partikeln und an ihnen assoziierten Metallen gibt (Gelhardt 2020).

#### 4.2.2 Mikroplastik

12 - 20 % des gesamten Reifenabriebs von Straßen in Deutschland gelangt trotz Rückhalts in Böden oder durch Behandlungsanlagen analog zu den Feststoffen in die Oberflächengewässer (Baensch-Baltruschat et al. 2021). Dies unterstreicht die Notwendigkeit, sich mit dem Aufkommen und den Auswirkungen von Mikroplastik in Niederschlagsabflüssen zu befassen. Die Fragestellungen zur Bestimmung, Quantifizierung und den Auswirkungen von Mikroplastik auf die Umwelt sind noch relativ neu und werden derzeit in verschiedenen Forschungsvorhaben bearbeitet (Hartmann et al. 2019; Braun und Bannick 2019). In Deutschland werden hierzu Verbundforschungsprojekte unter anderem über den Forschungsschwerpunkt „Plastik in der Umwelt“ des Bundesministeriums für Bildung und Forschung (BMBF) durchgeführt. Die ersten Forschungsvorhaben endeten im Dezember 2020 und werden neue Erkenntnisse zu diesen Fragestellungen liefern. Wesentliche Verbundprojekte hieraus beschäftigen sich u. a. mit Reifenabrieb in der Umwelt (RAU) oder der Entwicklung von repräsentativen Untersuchungsverfahren zur Bestimmung von Mikroplastik in Abwasser (Projekt RUSEKU). Aufgrund variierender Probenahme, -aufbereitung, Bestimmungsmethoden, Partikelgrößenbereichen und Mikroplastiksorten herrscht nach wie vor ein großer Harmonisierungsbedarf für die vergleichbare Bestimmung des Aufkommens von Mikroplastik (Braun und Bannick 2019; Hartmann et al. 2019).

Unter dem Begriff „Mikroplastik“ werden alle synthetischen Polymere subsumiert (Braun und Bannick 2019). Partikel von 1 bis 1.000 µm Größe werden als Mikroplastik definiert (Braun und Bannick 2019; Hartmann et al. 2019), Partikel von 1.000 bis 5.000 µm Größe werden als grobes Mikroplastik eingestuft (Braun und Bannick 2019).

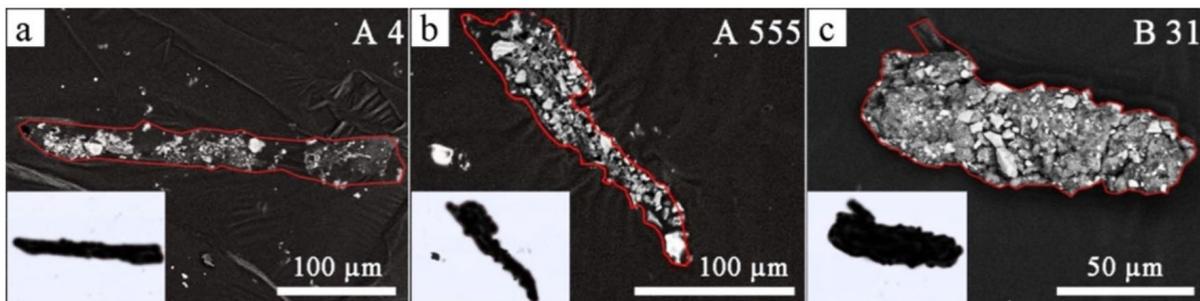
Niederschlagsabflüsse von Verkehrsflächen stellen einen wesentlichen Eintragspfad von Mikroplastik in die Umwelt dar (Bertling et al. 2018; Boucher und Friot 2017; Baensch-Baltruschat et al. 2020). Zu den wesentlichen Quellen zählen hier insbesondere Abriebe von Fahrzeugen und Fahrbahnen.

Mikroplastik von Fahrzeugen ist im Wesentlichen Reifenabrieb. Reifen bestehen zum größten Teil aus natürlichem Kautschuk, aber auch synthetischen Kautschuk wie Styrol-Butadien-Kautschuk oder Polybutadiene (Vogelsang et al. 2019). Außerdem werden Reifenmischungen Mineralöle, Ruß oder alternativ zunehmend Silikate und Mineralöle sowie u. a. Zinkoxide für die Vulkanisierung sowie weitere Füllstoffe zugesetzt (Krömer et al. 1999; Kole et al. 2017; Vogelsang et al. 2019). Reifenabrieb ist besonders mit Zink belastet (Councell et al. 2004; Kreider et al. 2010; Alves et al. 2020). Ein Zusammenhang zwischen der Verkehrsstärke (DTV) und Zinkkonzentration im Straßenabfluss wurde durch Drapper et al. (2000) gefunden.

Mikroplastik aus Fahrbahnabrieb kann aus Bitumen, aber auch aus Fahrbahnmarkierungen und -farben bestehen (Bertling et al. 2018; Vogelsang et al. 2019). Bitumen ist ein Mineralölprodukt, das als Bindemittel zur Herstellung von Asphaltfahrbahnen eingesetzt wird. Bitumen wird in der Regel mit synthetischen Polymeren modifiziert (Vogelsang et al. 2019; Awwad und Shbeeb 2007; Hinisloglu und Agar 2004). Fahrbahnmarkierungen sind in der Regel mit synthetischen Polymeren versetzt. In Deutschland kommen entweder vorgefertigte (Folien, Thermoplastiken, u. a.) oder nicht vorgefertigte (Farben, Spritzplastiken, u. a.) Polymere zum Einsatz (Frank und Reinsberg 2014).

Die genannten Mikroplastikbestandteile liegen jedoch nicht als einzelne Komponenten, sondern vielmehr als Heteroagglomerate aus Reifen- und Fahrbahnabrieb und sonstigen feinen Abrieben wie beispielhaft von Bremsen vor (TRWP, tire and road wear particles) (Kreider et al. 2010). Die gebildeten Heteroagglomerate sind letztlich ein Gemisch aus organischen (Mikroplastik-) Komponenten und mineralischen Fahrbahnabrieben (Sommer et al. 2018). TRWP bilden in der Regel eher längliche Strukturen aus (Abbildung 8) und weisen eigene physikalische Eigenschaften – abweichend zu ihren Einzelkomponenten – auf. Wesentliche Partikelgrößen wurden als kleiner 500 µm mit einem Schwerpunkt zwischen 50 - 500 µm dokumentiert (Kreider et al. 2010; Klöckner et al. 2019; Klöckner et al. 2020; Vogelsang et al. 2019).

**Abbildung 8:** TRWP-Aufnahmen erzeugt mittels Durchlichtmikroskopie und Rasterelektronenmikroskopie (REM) kombiniert mit energiedispersiver Röntgenanalyse (EDA)



Quelle: Sommer et al. 2018

Die Dichten der Einzelkomponenten des Vielstoffgemischs TRWP unterscheiden sich von der Dichte des in Niederschlagsabflüssen hauptsächlich auftretenden TRWP. In reinen Reifenabrieben wurden Dichten von 1,13 - 1,17 g/cm<sup>3</sup> gemessen (Rhodes et al. 2012; Banerjee et al. 2016). Bitumen hat eine Dichte von 1,0 - 1,1 g/cm<sup>3</sup> (Bertling et al. 2018). Die Dichte der TRWP wurden dagegen höher im Bereich von 1,26 - 2,20 g/cm<sup>3</sup> verortet (Baensch-Baltrusch et al. 2020; Sommer et al. 2018). Schwerpunktmäßig wurde eine Dichte von etwa 1,9 g/cm<sup>3</sup> der TRWP dokumentiert, wobei gealterte Partikel aufgrund möglicher weiterer Aggregation mit mineralischen Komponenten noch höhere Dichten aufweisen können (Klöckner et al. 2019).

Die im Straßenstaub deponierten Abriebprodukte können im Niederschlagsereignis abflusswirksam werden und in die Gewässer gelangen (Vogelsang et al. 2019). Der Anteil an TRWP an den gesamten organischen Bestandteilen im Niederschlagsabfluss ist derzeit noch unklar. Vogelsang et al. (2019) haben in einer einfachen Hochrechnung aus gesamtem Reifenverschleiß und Feststoffaufkommen abgeschätzt, dass 78 % der Feststoffe im Straßenabfluss aus Mikroplastik bestehen. Dieser Wert erscheint recht hoch mit Blick auf die bekannten organischen Anteile im Straßenabfluss gemessen als Glühverlust mit ca. 25 - 30 %, in denen zusätzlich die Vegetationsbestandteile enthalten sind (siehe dazu Kapitel 4.3.2). Es kann angenommen werden, dass in der Hochrechnung von Vogelsang et al. (2019) die in Kapitel 4.1.2 beschriebene Prozesse der Feststoffreduktion und -resuspension durch Straßenreinigung und Windturbulenzen möglicherweise keinen Eingang gefunden haben. In der Trockenperiode kann Mikroplastik, z. B. durch Wind und Verkehrstätigkeit, in die Luft resuspendiert werden (Panko et al. 2013; Rogge et al. 1993). Rogge et al. (1993) haben daher auch nur etwa 4 % Massenanteil von Reifenabrieb im Straßenstaub ermittelt. Es fehlen somit weitere Untersuchungen, um diesen Anteil am Feststoffaufkommen im Abfluss sicher zu quantifizieren.

Zusammenfassend kann gesagt werden, dass Mikroplastik aus Reifenabrieb wesentlicher Bestandteil von Feststoffen in Niederschlagsabflüssen von Verkehrsflächen ist. Dabei ist das Vorkommen insbesondere als das Heteroagglomerat TRWP bedeutend. Dieses weist im Wesentlichen Korngrößen von 50 - 500 µm auf und ist damit schwerpunktmäßig größer als der Parameter AFS63. Bei der

ausgewiesenen Dichte von 1,3 bis 2,2 g/cm<sup>3</sup> sollte von einer Absetzbarkeit der TRWP in Wasser ausgegangen werden.

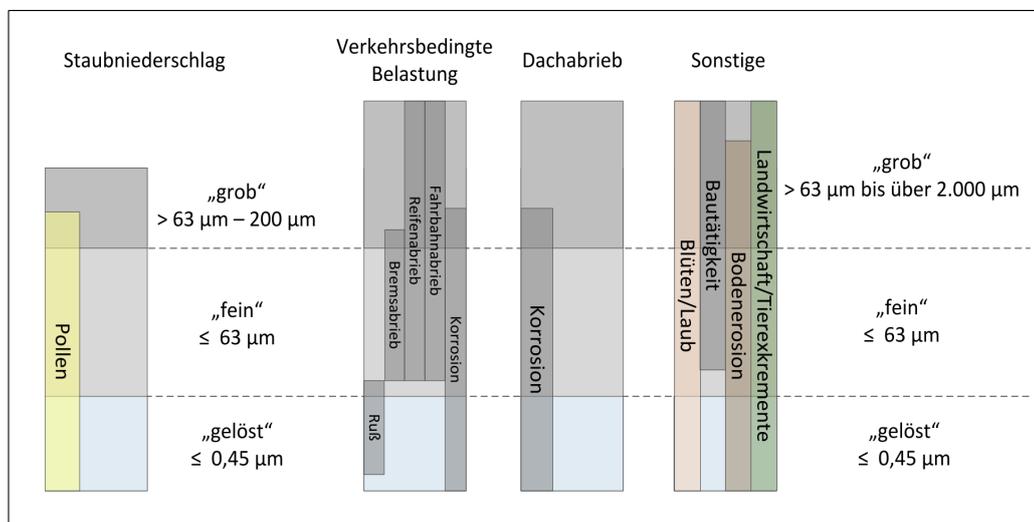
### 4.3 Zusammensetzung von Niederschlagsabfluss hinsichtlich absetzrelevanter Kenngrößen

Nachfolgend werden Feststoffe im Straßenabfluss insbesondere hinsichtlich der für die Sedimentation wesentlichen Kenngrößen Partikelgröße, Dichte und Form dargestellt. Im Wesentlichen spielen für die Absetzbarkeit von Feststoffen die Partikelgröße und -dichte sowie die Fluidichte eine Rolle, vgl. auch Kap. 6.1. Kenntnisse hinsichtlich absetzrelevanter Kenngrößen in verkehrsflächenbürtigen Feststoffen sind wichtig für die Auswahl repräsentativer Testmaterialien für das zu entwickelnde Prüfverfahren. Die wichtigsten absetzrelevanten Kenngrößen werden im Folgenden beschrieben, wobei auf den Unterschied dieser Kenngrößen bei „Straßenstaub“ und „Straßenabfluss“ hingewiesen wird.

#### 4.3.1 Partikelgrößenverteilung und Abflusswirksamkeit der Partikel

Komponenten im Niederschlagsabfluss lassen sich in grobe Korngrößenbereiche ihrer Erscheinungsform einteilen (Abbildung 9). Im partikulären Bereich < 63 µm finden sich insbesondere Pollen und weitere Bestandteile des Staubsiederschlags, u. a. aus Verbrennungen der Industrie und Straßenverkehr, Abriebe der verkehrsbedingten Belastung, insbesondere Brems- und Fahrbahnabriebe sowie Vegetationsbestandteile und Einträge aus Landwirtschaft, Bautätigkeit oder Tierausscheidungen und Bodenerosionen.

**Abbildung 9: Korngrößen von Einträgen in Niederschlagsabflüsse (qualitativ)**

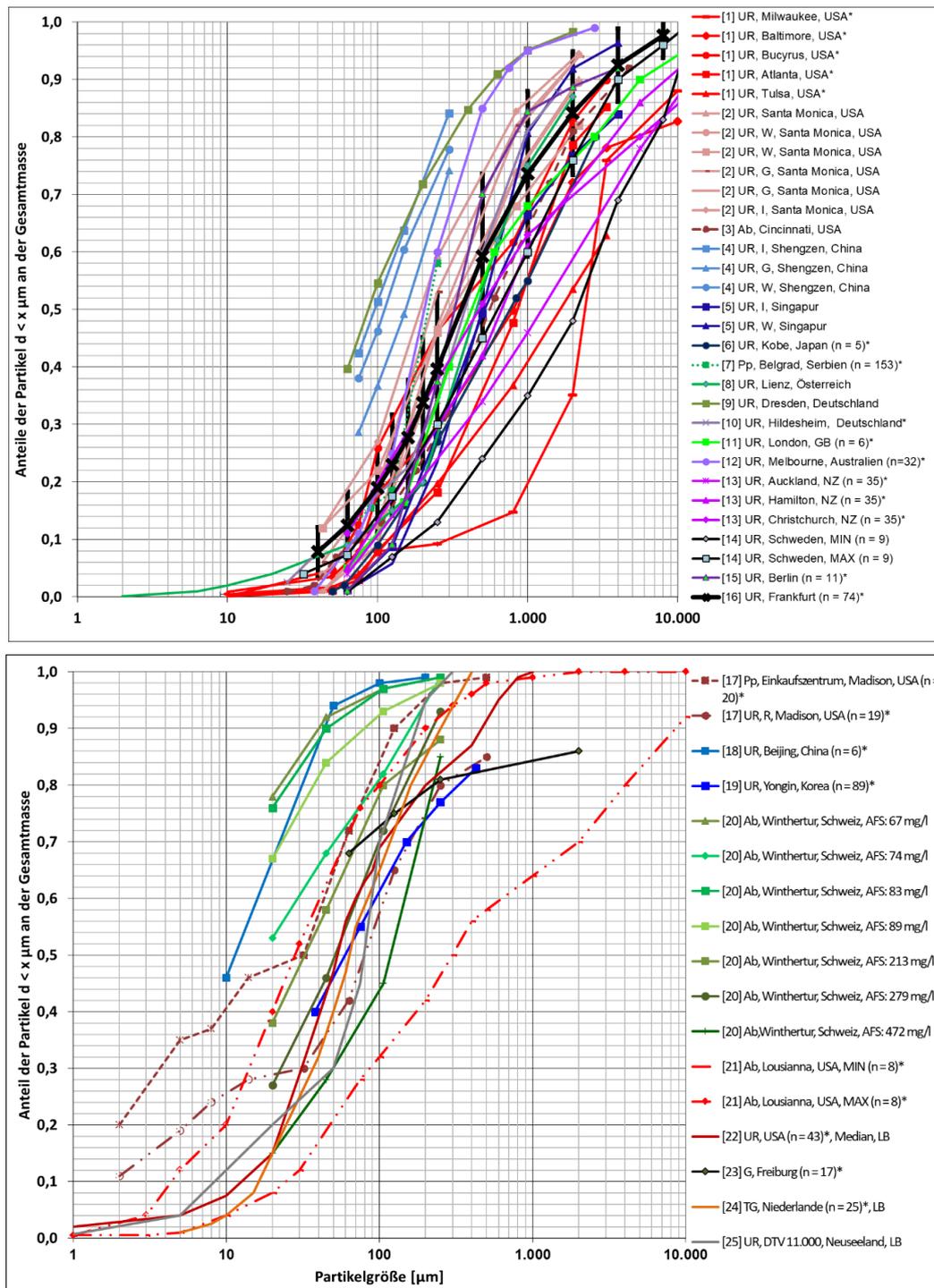


Quelle: Dierschke 2014b

Die Partikelgrößenverteilung (Englisch: Partikel-size distribution, PSD) wurde für Feststoffe im Straßenabfluss und Straßenstaub vergleichend ausgewertet (Abbildung 10). Die verwendeten Siebweiten sind mit Datenpunkten in den PSD-Kurven markiert. Feinere Anteile sind ohne Datenpunkte dargestellt und wurden durch Laserbeugung, Filtration, Coulter Counter oder Schlämmlung ermittelt. Sie liefern als Volumenanteile zusätzliche Informationen in feinsten Messbereichen. Diese Kurven wurden weitgehend durch Siebung erzeugt. Die mittlere Partikelgröße  $d_{50}$  beträgt zwischen 90 und 2.000 µm, schwerpunktmäßig zwischen 100 und 1.000 µm. Die Kurvenschar für Straßenstaub (oben) liegt vergleichsweise nah zusammen und ist gleichförmig.

**Abbildung 10: Partikelgrößenverteilungen – oben: Straßenstaub; unten: Straßenabfluss**

UR = Urban Road, durchgezogene Linie, Pp = Parkplatz, fein gestrichelte Linie, Ab = Autobahn, grob gestrichelte Linie, G = Gewerbegebiet, I = Industriegebiet, W = Wohngebiet, TG = Trenngebiet, LB = gemessen mit Laserbeugung, \* Mittelwerte abgelesen/Mischproben ([1] Sartor und Boyd (1972), [2] Lau und Stenstrom (2005), [3] Sansalone und Tribouillard (1999), [4] Zhao et al. (2017), [5] Yuen et al. (2012), [6] Adachi und Tainosho (2005), [7] Djukić et al. (2016), [8] Haile et al. (2016), [9] Zhang et al. (2016), [10] Grottker (1987), [11] Butler et al. (1992), [12] Vaze und Chew (2002), [13] Depree (2008), [14] Polukarova et al. (2020), [15] Barjenbruch et al. (2018), [16] Gelhardt (2020), [17] Selbig et al. (2016), [18] Wu et al. (2015), [19] Yun et al. (2010), [20] Furumai et al. (2002), [21] Kim und Sansalone (2008), [22] Winston et al. (2015), [23] Baum et al. (2021), [24] Boogaard et al. (2014), [25] Charters et al. (2015))



Quelle: eigene Darstellung, Frankfurt University of Applied Sciences; erweitert nach (Gelhardt 2020)

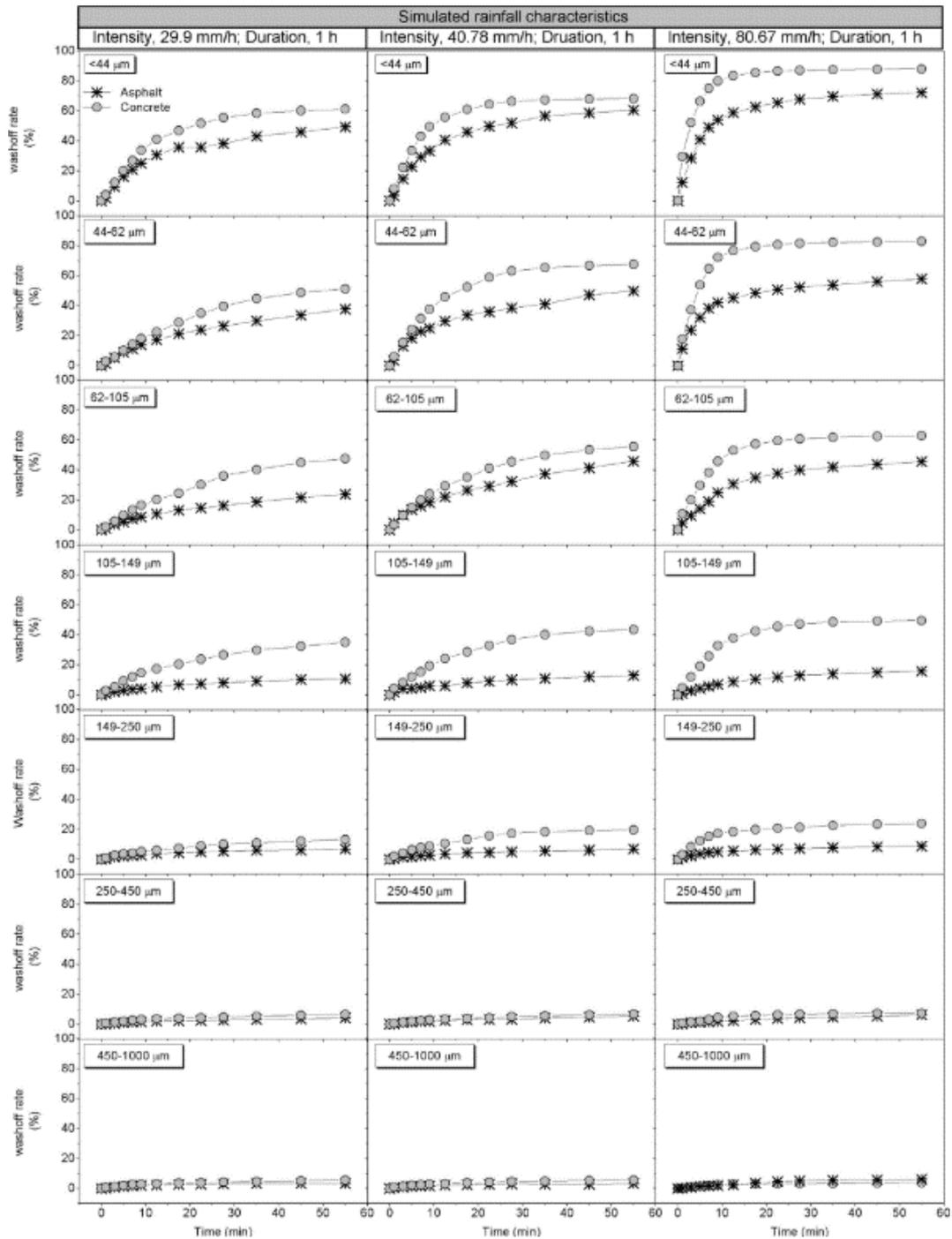
Diese standortunabhängigen ähnlichen PSDs konnten in eigenen umfangreichen Studien in Frankfurt bestätigt werden (schwarze Kurve). Im Straßenabfluss sind die PSDs weitgehend feiner aber auch heterogener verteilt (unten). Die mittlere Partikelgröße  $d_{50}$  liegt zwischen 10 und 800  $\mu\text{m}$ . Besonders grobe PSD-Bereiche [hellrot gestrichelter Bereich, 21] mit hohen mittleren Partikelgrößen  $d_{50} \geq 100 \mu\text{m}$  wurden im Abfluss ausschließlich in mit Feststoffsammlern beprobten Abflüssen und nach Trockensiebungen der eingedampften Proben gemessen. Hier sind grobe Partikel durch Agglomerate wahrscheinlicher. Der AFS63-Anteil liegt in den übrigen Studien schwerpunktmäßig in einem Bereich von 30-90 %. Dies untermauert die Erkenntnisse aus der Literaturstudie in Kapitel 4.1.4. Winston und Hunt (2017) fanden in ihrer Literaturlauswertung zu Straßenstaub und -abfluss ebenfalls eine deutlich feinere Verteilung im Abfluss (Straßenstaub:  $d_{50}$ : 250  $\mu\text{m}$ , Straßenabfluss:  $d_{50}$ : 44-80  $\mu\text{m}$ ).

Eine Studie von Zhao et al. (2018b) zeigte insbesondere die Abflusswirksamkeit von verschiedenen Partikelgrößenfraktionen auf Beton- und Asphaltflächen unter Beregnungsanlagen mit variierenden Regenintensitäten (Abbildung 11). Partikel  $\geq 250 \mu\text{m}$  werden in diesem Versuch, unabhängig von Fahrbahnoberfläche und Regenintensität, nicht in den Abfluss bewegt. Es ist davon auszugehen, dass für durchschnittliche Niederschlagsereignisse diese groben Partikel eher nicht in den Abfluss gelangen.

Aufgrund der geringen Feststoffmassen in Straßenabfluss wird bei der Bestimmung der Partikelgrößen häufig auf sogenannte Partikelanalyser ausgewichen. Insbesondere Laserbeugung, aber auch Partikelzähler kommen hier zum Einsatz (Tabelle 10). Der  $d_x$  entspricht dem Äquivalentdurchmesser in  $\mu\text{m}$  mit  $\leq x \%$  der Gesamtmassenanteile (hier ausgewertet:  $d_{10}$ ,  $d_{50}$ ,  $d_{90}$ ). Es ist zu beachten, dass hier häufig der Grobanteil vor der Messung abgesiebt wurde, da die Küvetten der Geräte i. d. R. nur Anteile  $< 2.000 \mu\text{m}$  messen können. Dennoch verdichten sich auch hier Schwerpunktwerte für Niederschlagsabflüsse insbesondere von Straßenabflüssen von einem  $d_{50} < 100 \mu\text{m}$  und einem  $d_{90} < 250 \mu\text{m}$ .

- Nach Auswertung des Forschungsstandes haben sich Materialien  $< 250 \mu\text{m}$  als besonders abflusswirksam in Niederschlagsabflüssen herausgestellt. Größere Anteile im Abfluss sind möglich, stellen aber für einen Rückhalt in einer Behandlungsanlage keine Schwierigkeit dar.

**Abbildung 11: Vergleich der Abflusswirksamkeit einzelner Partikelgrößenfraktionen auf Asphalt und Beton bei unterschiedlichen Niederschlagsintensitäten (Beregnung im Labor)**



Quelle: Zhao et al. 2018b

**Tabelle 10: Partikelgrößenkenngrößen  $d_{10}$ ,  $d_{50}$ ,  $d_{90}$  ( $\mu\text{m}$ ) in Niederschlagsabfluss (eigene Auswertung)**

Studie	Länder	Herkunftsfläche	Auswertemodus	Messprinzip PSD	Größtkorn ( $\mu\text{m}$ )	$d_{10}$ ( $\mu\text{m}$ )	$d_{50}$ ( $\mu\text{m}$ )	$d_{90}$ ( $\mu\text{m}$ )
Winston und Witter (2019)	USA	Autobahn	Median, EMC	Laserbeugung		3-17	25-72	90-200
Charters et al. (2015)	Neuseeland	Dachfläche	EMC	Laserbeugung		18-30	61-72	162-277
Boogaard et al. (2014)	Niederlande	Mischgebiet	EMC	Partikelzähler (HRLD-400HC)		20*	70*	200*
Ball und Abustan (1995)	Australien	Mischgebiet	Median	Laserbeugung	600	5-17	39-73	116-279
Goncalves und van Seters (2012)	Kanada	Mischgebiet	Mittelwert	Laserbeugung		3-6	13-24	47-66
Drapper (2014)	International	Mischgebiet	Median	Siebung, Laserbeugung, Coulter Counter	500	2-90*	20-300*, Median 80-100	60-500*
Goncalves und van Seters (2012)	Kanada	Parkplatz	Mittelwert	Laserbeugung		4	15-16	50-61
Fettig und Pick (2020)	Deutschland	Stadtstraße	Mittelwert, 4 Quartale	Laserbeugung	2.000	6	31	200
Drapper et al. (2000)	Australien	Stadtstraße	Median, EMC	Laserbeugung		3-39	28-148	80-460
Aryal et al. (2017)	Australien	Stadtstraße	Median	Laserbeugung			75	
Charters et al. (2015)	Neuseeland	Stadtstraße	EMC	Laserbeugung		23	72	177
Dierschke (2014b)	Deutschland, Australien, Schweiz, USA	Straßen	Schwerpunktwerte	Literaturreview		10-75*	10-90*	50-3.000*
Winston und Hunt (2017)	USA	Straßen	Median, EMC	Laserbeugung	2.000	9-31	32-167	72-591
Monrabal-Martinez et al. (2019)	Norwegen	Straßen	Median, EMC	Laserbeugung		1-11	5-12	19-92

\* Werte abgelesen.

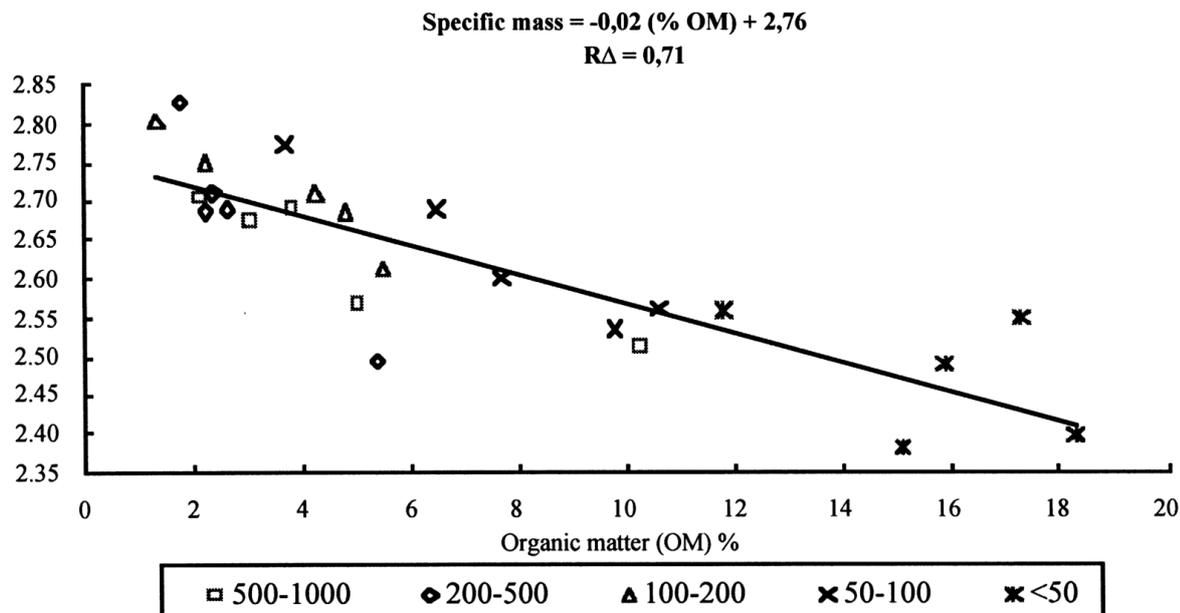
### 4.3.2 Dichte und organischer Anteil

Die Dichte wurde in den Vielstoffgemischen im Straßenstaub und Straßenabfluss bislang nicht sehr umfassend gemessen.

Dichten in Straßenstaub wurden in neun Studien aus sechs Arbeitsgruppen im Bereich von 1,55 – 3,10 g/cm<sup>3</sup> angegeben (Bäckström 2002; Butler et al. 1992; Cristina et al. 2002; Glenn und Sansalone 2002; Kayhanian et al. 2012; McKenzie et al. 2008; Sansalone und Tribouillard 1999; Zanders 2005; Zhao et al. 2009). In Straßenabfluss wurden durch Fettig und Pick (2020) Dichten von 1,72-1,98 g/cm<sup>3</sup> dokumentiert. In weiteren sechs Studien aus vier Arbeitsgruppen wurden in Kanalsedimenten und Feststoffen aus Regenrückhaltebecken Dichten von 1,55 - 2,27 g/cm<sup>3</sup> dokumentiert (Andral et al. 1999; Roger et al. 1998; Kayhanian et al. 2008; Kayhanian et al. 2012; Jacopin et al. 1999; Karamalegos et al. 2005). Die vornehmliche Methode zur Bestimmung der Dichte war die Kapillarpiknometrie mit Wasser, Diesel oder Isopropanol. Hierfür wird eine Mindestmasse von mehreren Gramm benötigt, die in Straßenabflussproben schwer zu erfassen ist.

Roger et al. (1998) zeigten einen negativ linearen Zusammenhang zwischen Dichte und organischem Anteil (Glühverlust) in Kanalsedimenten an Autobahnen (Abbildung 12).

**Abbildung 12: Dichte und organischer Anteil in Kanalsedimenten, n = 25**

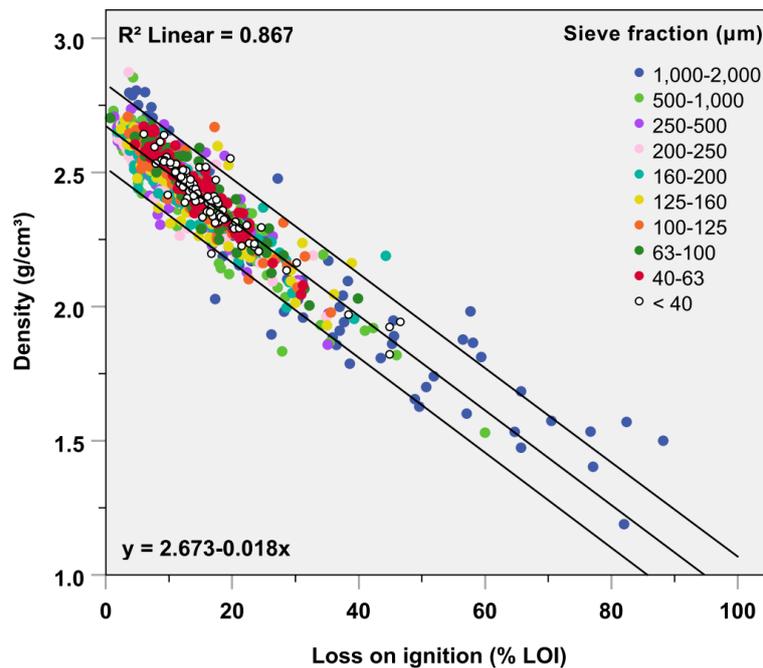


Quelle: Roger et al. 1998

Dieser Zusammenhang wurde für Straßenstaub mit einer Korngröße von bis zu 2.000 μm in einem mehrjährigen Untersuchungsprogramm an elf Standorten in Frankfurt am Main untersucht (Abbildung 13) (Gelhardt et al. 2021; Gelhardt 2020). Es konnte bestätigt werden, dass der Zusammenhang zwischen Dichte und organischem Anteil (gemessen als Glühverlust, GV) unabhängig von Partikelgröße und Standort streng negativ linear ist. Im Mittel wurden in Straßenstaub Dichten von 2,38 g/cm<sup>3</sup> (SD: 0,16 g/cm<sup>3</sup>, Median: 2,40 g/cm<sup>3</sup>) respektive Glühverluste von 14 % (SD: 7 % GV, Median: 13 % GV) gefunden. Die Messwerte von Roger et al. (1998) aus Abbildung 12 liegen im Bereich des 95 %-Vertrauensbereichs der Messwerte aus Frankfurt.

### Abbildung 13: Glühverlust (% GV) und Dichte $\rho$ ( $\text{g}/\text{cm}^3$ ) in Straßenstaub aus Frankfurt am Main

Siebfraktionen < 40 bis 1.000 - 2.000  $\mu\text{m}$ ,  $n = 848$ ) Streudiagramm, lineare Regressionsgerade und 95 %-Vertrauensbereiche



Quelle: Gelhardt et al. 2021

Der Glühverlust kann also nach bisherigen Erkenntnissen als Surrogatparameter für die Einschätzung der Dichte in den Vielstoffgemischen angenommen werden.

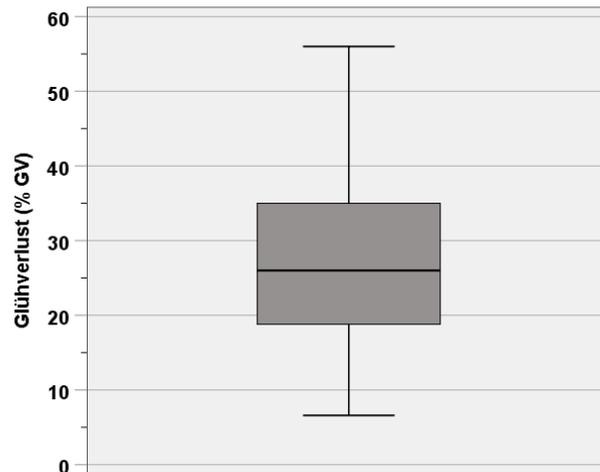
Da die Dichte in Straßenabflüssen aufgrund der geringen Massen bislang nur selten und hilfswise häufig aus Sedimenten von Kanälen oder Behandlungsanlagen bestimmt wurde, wird nachfolgend eine Metadatenauswertung um Messkampagnen zu organischen Anteilen (GV) in Straßenabflüssen aus Gelhardt (2020) erweitert. Der GV ist ein etablierter, kostengünstig und einfach zu messender Summenparameter. Aus diesem Grund ist die Datengrundlage zum GV wesentlich umfassender.

Für die Metadatenauswertung wurden nur Studien, die Einzelmesswerte zu AFS und Glühverlusten in AFS (VSS, volatile suspended solids) angeben, inkludiert. Insgesamt wurden neun Studien ausgewertet (Barrett et al. 1995; Horwath und Bannerman 2012; Kobriger und Geinopolos 1984; Lygren et al. 1984; Sansalone et al. 1998; Steinman 2017; Ying und Sansalone 2008; Zarezadeh et al. 2018; Polukarova et al. 2020). Es handelte sich um 246 Einzelmessdaten ( $n = 246$ ) aus Mischgebieten, Autobahnen und einem Parkplatz. Einschränkungen gab es außerdem bei der Bestimmungsgrenze von AFS und VSS. Aufgrund der häufig geringen Probenvolumina und der geringen absoluten Massen auf dem Filter und den noch auswägbaren Glührückständen wurden Messwerte ausgeschlossen, die eine vertretbare Bestimmungsgrenze von AFS: 40  $\text{mg}/\text{l}$  und VSS: 20  $\text{mg}/\text{l}$  unterschritten. Dadurch reduzierte sich der Datensatz auf 154 Messwerte. Das Box-and-Whisker-Diagramm der Literaturdaten zum Glühverlust im Niederschlagswasserabfluss von Autobahnen, städtischen Gebieten und Parkplätzen zeigt einen Median von 26 % GV (Abbildung 14). Der Mittelwert liegt bei 27 % GV (SD: 12 % GV) mit einem Minimum und Maximum von 7 bzw. 56 % GV.

Brezonik und Stadelmann (2002) berichteten über ähnliche Größenordnungen im Niederschlagsabfluss in Minneapolis, USA. Mittlere Glühverluste zwischen 20 und 33 % GV wurden auch in anderen Studien und Literaturzusammenfassungen dokumentiert (Schmitt et al. 2010; Sansalone und Tittlebaum 2001; Brodie 2007; Lambert 2010; Monrabal-Martinez et al. 2019).

**Abbildung 14: Whisker-Box-Plot – Glühverlust (% GV) im AFS<sub>ges</sub> von Niederschlagsabflüssen**

n = 154



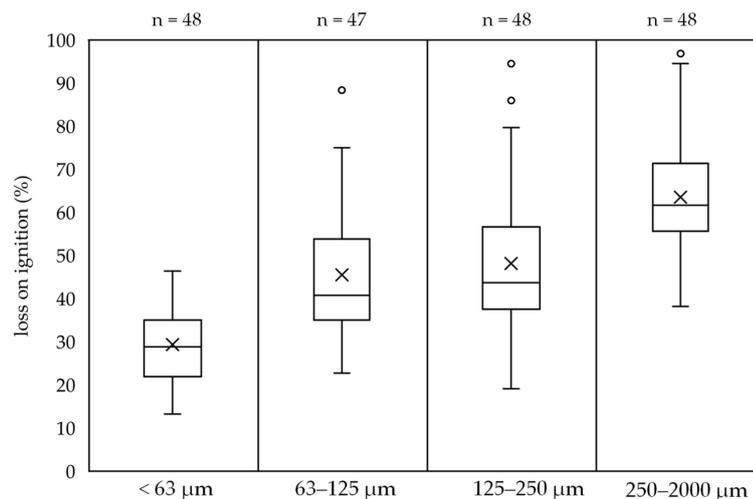
Quelle: eigene Darstellung, Frankfurt University of Applied Sciences, erweitert nach (Gelhardt 2020) (Barrett et al. 1995; Horwath und Bannerman 2012; Kobriger und Geinopolos 1984; Lygren et al. 1984; Sansalone et al. 1998; Steinman 2017; Ying und Sansalone 2008; Zarezadeh et al. 2018; Polukarova et al. 2020)

Im AFS63 wurden bislang organische Anteile von 22 bis 43 % GV dokumentiert (Fuchs et al. 2020; Brodie 2007; Baum et al. 2021; Grotehusmann et al. 2017; Baum und Dittmer 2017; Fuchs et al. 2019b; Fettig et al. 2020).

Es scheint einen Zusammenhang zwischen Korngröße und organischem Anteil zu geben. Baum et al. (2021) bestimmten den organischen Anteil in unterschiedlichen Siebfraktionen aus Feststoffsammlern in einem Industriegebiet in Freiburg mit einer befestigten Fläche von ca. 70 ha. Aus Abbildung 15 ist erkennbar, dass der Glühverlust mit Abnahme der Partikelgröße sinkt.

**Abbildung 15: Whisker-Box-Plots des organischen Anteils (loss on ignition, %) in Siebfraktionen von Oberflächenabfluss eines Industriegebietes in Freiburg**

A < 70 ha, x = Mittelwert



Quelle: Baum et al. 2021

Grobe Anteile 250 – 2.000 µm wiesen häufig deutlich höhere organische Anteile aus. Diese wurden auch in Straßenstaub als besonders hoch und deutlich von der Vegetation beeinflusst identifiziert (Welker et al. 2019b; Barjenbruch et al. 2018; Gelhardt 2020). Fettig et al. (2020) fanden in den von

7/2018 bis 3/2020 beprobten Abflüssen ( $n = 650$ ) eines vegetationsreichen Straßenabschnittes mit  $420 \text{ m}^2$  ebenfalls geringere Glühverluste in den feinen Anteilen  $< 63 \mu\text{m}$  (im Mittel 34 % in den feinen Anteilen  $< 63 \mu\text{m}$  und 49 % in den groben Anteilen  $> 63 \mu\text{m}$ ). (Kemper und Fuchs 2018) fanden im Median von 27 Zuläufen eines Schrägklärers im Trennsystem 41 % GV in den Fraktionen  $63 \mu\text{m}$  bis  $2 \text{ mm}$  und 30 % GV in den Fraktionen  $< 63 \mu\text{m}$ .

Überträgt man den Bereich von 15 - 40 % GV auf die starke negative Korrelation mit der Dichte, ist anhand der Auswertung der Glühverluste in Feststoffen von Niederschlagsabflüssen von Bereichen von etwa  $1,8 - 2,5 \text{ g/cm}^3$  mit einem Schwerpunkt um  $2,2 \text{ g/cm}^3$ , im AFS63 eher von einer etwas höheren Dichte auszugehen. Zur Absicherung wären jedoch noch weitere Studien erforderlich, zumal ein Manko vieler Studien ist, dass die Art der Dichte (Roh-, Skelett- oder Feststoffdichte) und die Art der Bestimmung nicht angegeben werden.

- ▶ Für das Zulaufsignal zu dezentralen Behandlungsanlagen ist aufgrund der geringen angeschlossenen Flächen und reduzierten Fließwege tendenziell mit organischen Anteilen im Bereich zwischen Straßenstaub (Median  $< 2 \text{ mm}$ : 13 % GV) und Abflüssen aus Mischgebieten (Median: 26 % GV) zu rechnen. Die Dichte von abflusswirksamen Partikeln liegt damit in einem Bereich zwischen  $1,8 - 2,5 \text{ g/cm}^3$ .
- ▶ Der Glühverlust in den feineren Anteilen  $< 63 \mu\text{m}$  ist tendenziell geringer als in den gröberen Anteilen. Damit ist gleichzeitig die Dichte bei Partikeln  $< 63 \mu\text{m}$  höher als in gröberen Anteilen, für AFS63 im Schwerpunkt bei  $\rho = 2,2 \text{ g/cm}^3$ .

### 4.3.3 Partikelform

Aufgrund der vielfältigen Feststoffquellen sind auch die Formen der Feststoffe, die im Niederschlagsabfluss landen können, amorph, faserig, kantig bis rundlich (Abbildung 16 und Abbildung 17).

**Abbildung 16: Aufnahmen von Straßenstaubpartikeln**

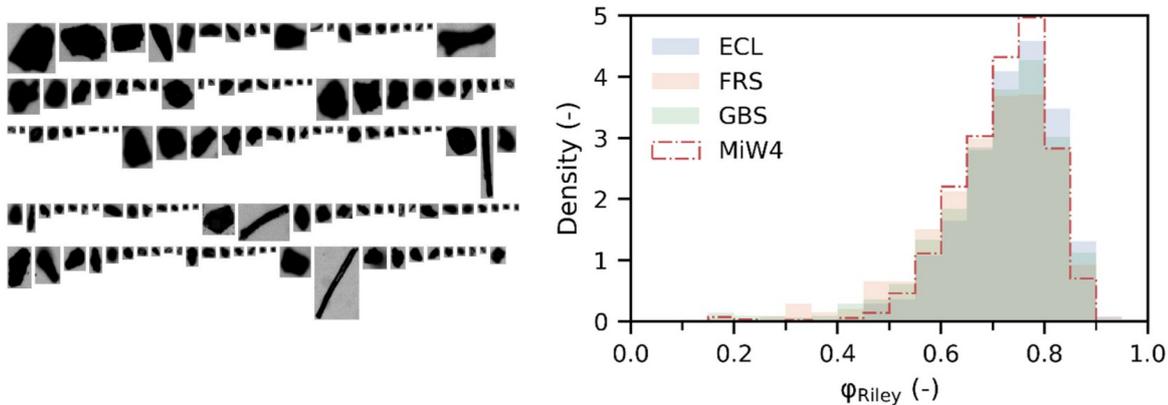


Quelle: links und Mitte: Gelhardt 2020; rechts: Sommer et al. 2018

In Abbildung 17, rechts, ist die Zirkularität der Partikel ( $\Psi_{\text{Riley}}^1$ ) von drei Straßenstäuben und dem bisher für die Prüfung von dezentralen Behandlungsanlagen zur Einleitung in das Grundwasser eingesetzten Quarzmehl Millisil W 4 bei gleicher PSD dargestellt (Rommel et al. 2020). Straßenstäube weisen eine unregelmäßigere Form auf als Quarzmehl, der Schwerpunkt der Riley-Zirkularität liegt jedoch bei aller Unregelmäßigkeit jeweils bei 0,8.

<sup>1</sup>  $\Psi_{\text{Riley}}$  Zirkularität beschreibt den größten inneren Kreis im Verhältnis zum kleinsten umfassenden Kreis; bei einem Kreis ist das Verhältnis 1

**Abbildung 17: Aufnahmen von Straßenstaubpartikeln aus der digitalen Bildanalyse (links), Auswertung der Form nach Unregelmäßigkeit  $\phi_{\text{Riley}}$  von 3 Straßenstäuben und Millisil W 4 (rechts)**



Quelle: Rommel et al. 2020

#### 4.4 Zusammenfassendes Fazit

Zur Einordnung und Bestätigung bisheriger Forschung wurde das Aufkommen von Fest- und ausgewählter Schadstoffe so wie die für die Behandlung absetzrelevanter Kenngrößen: Partikelgröße, Dichte, organischer Anteil und Form ausgewertet. Zusammengefasst wurden für Niederschlagsabflüsse folgende Schwerpunktwerte verdichtet:

- ▶ Dachabflüsse fallen bezogen auf ihr Feststoffaufkommen in einen Bereich, der nach DWA-A 102 nicht behandlungsbedürftig ist.
- ▶ Das Feststoffaufkommen in Verkehrsflächenabflüssen führt oft zu deren Behandlungsbedürftigkeit. Insbesondere kleine Herkunftsflächen sind besonders hoch mit Feststoffen belastet.
- ▶ In Verkehrsflächenabflüssen haben sich die im Arbeitsblatt DWA-A 102 angegebenen Schwerpunktbereiche bestätigt. Aufgrund bislang uneinheitlicher Bestimmungsmethoden für den AFS63 lassen sich hier noch keine belastbaren Vergleichswerte aus veröffentlichten Studien ableiten. Partikelgrößenverteilungen in Straßenabflüssen deuten jedoch mit einem AFS63-Anteil zwischen 30 - 90 % auf eine relativ breite Verteilung hin.
- ▶ Der AFS63 stellt hinsichtlich der Schwermetalle wie auch des Mikroplastiks (vgl. Kap. 4.2) einen sinnvollen Leitparameter für partikuläre Schadstoffe dar. Durch ein Prüfverfahren zum Feststoffrückhalt von AFS63 werden beide Stoffe als Surrogatparameter abgebildet.

Bezüglich der absetzrelevanten Eigenschaften von Partikeln im Verkehrsflächenabfluss lassen sich folgende Aussagen ableiten:

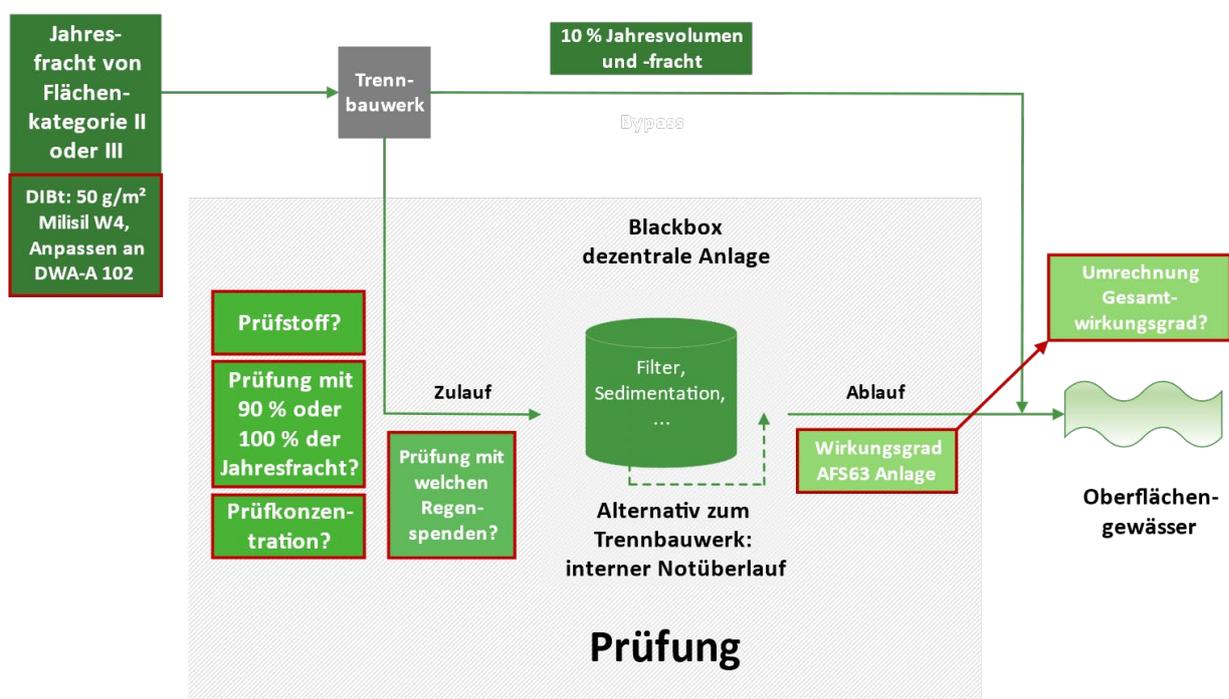
- ▶ Die Partikelgrößenverteilung von Verkehrsflächenabflüssen ist relativ heterogen mit einer sicheren Datenbasis zu abflusswirksamen Anteilen < 250  $\mu\text{m}$ .
- ▶ Die organischen Anteile in Zuflüssen zu dezentralen Anlagen liegen im Median bei ca. 26 % GV, mit in der Tendenz geringeren organischen Anteilen in feinen Feststoffen AFS63.
- ▶ Die Dichte von abflusswirksamen Partikeln in Verkehrsflächenabflüssen liegt in einem Bereich zwischen 1,8 - 2,5  $\text{g}/\text{cm}^3$ , für AFS63 im Schwerpunkt bei 2,2  $\text{g}/\text{cm}^3$
- ▶ Die Formen von Partikeln im Straßenabfluss sind amorph, kantig bis faserig. Die mittlere Zirkularität ( $\Psi_{\text{Riley}}$ ) von Straßenabflusspartikeln beträgt – wie von Millisil auch -  $\Psi_{\text{Riley}} = 0,8$ .

## 5 Überlegungen zum Prüfkonzept

Die Zulassungsprüfung für dezentrale Regenwasserbehandlungsanlagen für die Behandlung von Verkehrsflächenabflüssen zur Versickerung in Boden und Grundwasser wurde in Deutschland bereits häufig durchgeführt und hat sich dort etabliert (DIBt 2012, 2017). Einige Randbedingungen daraus lassen sich auf das Prüfverfahren zur Einleitung in Oberflächengewässer übertragen. Viele Bedingungen sind jedoch anders und müssen hinsichtlich der Vorgaben der technischen Regelwerke DWA-A 102 und M 179 (Entwurf) sowie der Feststellung eines Gesamtwirkungsgrades durchdacht und angepasst werden.

Offene Fragen sind in Abbildung 18 als „rot“ umrandete Kästen dargestellt.

**Abbildung 18: Schematische Darstellung einer Feststoffprüfung für Anlagen zur Einleitung in das Oberflächengewässer mit offenen Fragestellungen**



Quelle: eigene Darstellung, Frankfurt University of Applied Sciences 2022

Eine dezentrale Anlage wird bei der Prüfung, wie beim DIBt-Verfahren auch, als „Blackbox“ in den Prüfstand eingebaut.

Die erste Frage betrifft die relevanten Flächen (Kapitel 5.1), aber auch die aufzubringende Jahreszufracht in die Anlage. Die Jahresfracht in Höhe von 50 g/m<sup>2</sup> Millisil, mit der die Anlagen zur Einleitung in Grundwasser geprüft werden, bedarf einer Anpassung an die Vorgaben des Arbeitsblattes DWA-A 102. Da Anlagen zur Einleitung in Oberflächengewässer mit einem Bypass ausgestattet werden dürfen, kann die Prüfung möglicherweise mit einer geringeren als der gesamten Jahresfracht geprüft werden (Kapitel 5.2).

Die Möglichkeit eines Bypasses oder internen Notüberlaufs erfordert die Feststellung der hydraulischen Leistungsfähigkeit. Während Anlagen zur Einleitung in das Grundwasser mit einer geringen hydraulischen Leistungsfähigkeit bei der Prüfung leicht identifiziert werden (Rückstau bei Spülstoß mit  $r = 100 \text{ l}/(\text{s} \cdot \text{ha})$ ), muss der maximale Durchfluss festgestellt bzw. die Angaben des Herstellers überprüft werden. Weiterhin ist die Frage nach den zu verwendenden Regenpenden offen (Kap. 5.3).

Der Wirkungsgrad des Gesamtsystems aus Anlage und Bypass muss schließlich auf den Gesamtwirkungsgrad des Systems umgerechnet werden.

Das quarzhaltige Prüfmehl Millisil W 4 wird in vielen Prüfverfahren angewendet und hat sich bewährt. Trotzdem soll noch einmal die Eignung hinterfragt werden und Alternativen, z. B. Stoffe mit einer geringeren Dichte oder einer anderen Korngrößenzusammensetzung, recherchiert werden (Kap. 5.4).

Versuche in Absetzsäulen, die einige der oben genannten Punkte tangieren, werden in Kapitel 6 beschrieben.

Die Vorgehensweise der Auswahl der Behandlungsanlagen zur Prüfung im Labor sowie erste Versuchskonzepte werden in Kapitel 7 beschrieben.

## 5.1 Relevante Flächen

In einem ersten Schritt ist zu prüfen, für welche Flächen das Prüfverfahren entwickelt werden soll.

Der Anwendungsbereich gemäß Arbeitsblatt DWA-A 102 beschränkt sich explizit auf Siedlungsgebiete. Die emissionsseitige Bewertung von Verkehrsflächen außerhalb von Siedlungen werden in der REwS (2021) und zusätzlich in Wasserschutzgebieten in der RiStWag (2016) geregelt, dezentrale Behandlungsanlagen sind im Normalfall hierfür nicht vorgesehen. Regelfall ist die Entwässerung und Behandlung über die sogenannte Schulter oder das Zusammenführen und Behandeln in zentralen Bauwerken.

Für einige Industriearten gelten für verunreinigte Niederschlagsabflüsse Anforderungen nach den Anhängen der Abwasserverordnung (BJV 2004), die im Rahmen des vorliegenden Forschungsvorhabens nicht berücksichtigt werden. An Lösungen zur Behandlung von herbizidbelasteten Gleisabwässern wird vor allem in der Schweiz intensiv geforscht (Burkhardt et al. 2018). Für diese gibt es jedoch noch keine seriengefertigten Behandlungsanlagen. Auch für enteisungsmittelhaltige Niederschlagswässer aus Flughäfen mit einem hohen Gehalt an gelöstem CSB existieren keine seriengefertigten dezentralen Behandlungsanlagen. Abhängig von den jeweiligen Randbedingungen werden diese Abwässer entweder nach einer Zwischenspeicherung in einer Kläranlage oder in Retentionsbodenfiltern (mit-)behandelt oder versickert.

Die maßgeblichen Flächen sind im Anhang A der DWA-A 102-2 in Gruppen eingestuft und bezüglich der Nutzung beschrieben. Hierzu zählen z. B. Dach (D), Verkehrsflächen (V), landwirtschaftliche Hofflächen (L), Betriebsflächen (B) oder Flächen mit besonderer Belastung (S). Die Flächen werden jeweils in den oben genannten Belastungskategorien von I bis III eingeordnet.

Niederschlagsabfluss von Flächen der Kategorie I bedarf keiner Behandlung, dazu zählen i. d. R. Dachflächen so wie Hof-, Wege-, und Wohnstraßen mit geringer zu erwartender Verkehrsbelastung (durchschnittliche tägliche Verkehrsbelastung (DTV) < 300 (Kfz/24h)).

Die Verkehrsflächen der Kategorie II und III werden anhand ihrer DTV (300 - 15.000 respektive > 15.000) aufgrund der zu erwartenden Belastung und des möglichen Havarierisikos als mäßig bis stark belastet eingestuft.

Betriebs- und Sonderflächen beziehen sich insbesondere auf Gleis- und Flughafenflächen oder Dachflächen mit besonderer Belastung (z. B. Metalleindeckung). Diese werden ebenfalls in die Kategorien II oder III eingeordnet. Für Abflüsse der Kategorie III sind Belastungen zu erwarten, die nicht immer nur mit dem AFS63 zutreffend abgebildet werden können. Bei den aufgeführten Betriebsflächen (B) und einigen Flächen mit besonderer Belastung (S) wird explizit darauf hingewiesen, dass neben partikulär transportierten auch gelöste Schadstoffe wie Herbizide, Nährstoffe oder

gelöste Schwermetalle bei der Behandlung Berücksichtigung finden müssen. Hier sind Sonderlösungen gefragt, wie z. B. dezentrale Behandlungsanlagen für Metaldachabflüsse, für die es bereits ein Prüfverfahren vom LfU Bayern gibt (LfU 2011) oder zum Rückhalt von organischen Schadstoffen in der Schweiz (Burkhardt 2019). Generell ist für Flächen der Kategorie III zu prüfen, ob die Nutzung einer dezentralen Behandlungsanlage mit anschließender Einleitung in ein Oberflächengewässer zulässig ist oder ggf. direkt in die Kläranlage weitergeleitet werden sollte. Wenn die Abflüsse dieser Flächen stoffspezifisch vorbehandelt werden, dann gelten sie für die weitere stoffliche Belastung an AFS63 als Kategorie I.

Für Baugruppen zur dezentralen Behandlung und für das zu entwickelnde Prüfverfahren für dezentrale Anlagen werden also insbesondere die Flächen der Kategorie II, und nur wenn es sich um eine reine Feststoffbelastung handelt, die Flächen der Kategorie III, relevant:

- ▶ Hof- und Wegeflächen (VW2) in der Kategorie II,
- ▶ Verkehrsflächen unterschiedlicher Frequentierung in den Kategorien II und III (V2, V3),
- ▶ Hof- und Verkehrsflächen sowie Park und Stellplätze (SV bzw. SVW) der Kategorie III, allerdings ausschließlich mit Feststoffbelastung,
- ▶ möglicherweise Start- und Landebahnen und weitere Betriebsflächen von Flughäfen (BF) der Kategorie II, jedoch ohne Enteisungsmiteinsatz,
- ▶ Gleisanlagen (G) ohne Herbizideinsatz der Kategorie II und III sowie
- ▶ landwirtschaftliche Hofflächen (L) der Kategorie II ohne große Tieransammlungen oder sonstige starke Beeinträchtigung der Niederschlagswasserqualität.

Das neue Prüfverfahren kann darüber hinaus in Prüfverfahren, in denen auf den Rückhalt gelöster Stoffe geprüft wird aber auch Feststoffe relevant sind, übernommen werden, so dass sich dann der Anwendungsbereich auf weitere Flächen ausdehnen kann.

## 5.2 Anpassung der Jahresfracht und Auswirkung auf Zulaufkonzentration

In Tabelle 11 sind die AFS63-Jahresfrachten der Flächenkategorien gemäß DWA-A 102 aufgeführt, aus denen sich eine Behandlungsbedürftigkeit für Flächen der Kategorie II und III ableitet.

**Tabelle 11: AFS63- und Millisil W 4-Jahresfrachten nach den DIBt-Grundsätzen und Vorgaben DWA-A 102**

Bezug	AFS63-Jahresfracht (kg/(ha · a))	Millisil W 4-Jahresfracht (g/(m <sup>2</sup> · a))
DIBt-Prüfgrundsätze		50
DWA-A 102, Kategorie I	280	57
DWA-A 102, Kategorie II	530	108
DWA-A 102, Kategorie III	760	155

Umgerechnet auf  $\text{g}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$  und Millisil mit einem AFS63-Anteil von 49 % ergeben sich die theoretisch auf eine Anlage aufzugebenen spezifischen Jahresfrachten nach Spalte 3 (Ziel:  $57 \text{ g}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$ ). Daraus ist zu erkennen, dass die Dosierung der Jahresfracht gemäß den DIBt-Zulassungsgrundsätzen bereits unterhalb des Zielwertes gemäß DWA-A 102 liegt<sup>2</sup>. Eine Anpassung ist daher erforderlich.

In Tabelle 12 sind die Feststofffrachten und weitere Randbedingungen einer DIBt-Prüfung für eine Anlage mit  $500 \text{ m}^2$  angeschlossener Fläche dargestellt.

**Tabelle 12: Feststofffrachten bei einer DIBt-Prüfung einer Anlage mit  $500 \text{ m}^2$  angeschlossener Fläche (Jahresfrachtmodell:  $25 \text{ kg}$  verteilt auf 3 Prüfrengspenden)**

Messung	Prüfrengspende ( $\text{l}/(\text{s} \cdot \text{ha})$ )	Prüfdauer (min)	$V_{\text{pr}}$ ( $\text{l}/\text{m}^2$ )	Feststoff- verhältnis	Feststoffe (kg)	Wasser- volumen ( $\text{m}^3$ )	Konzentration ( $\text{mg}/\text{l}$ )
1	2,5	480	7,2	3	12,5	3,6	3.472
2	6	200	7,2	2	8,33	3,6	2.315
3	25	48	7,2	1	4,17	3,6	1.157
4	100	15	9			4,5	
Summe					25,00		

Bei einer Übertragung der Randbedingungen der neuen Prüfvorschrift mit den höheren Frachten gemäß der Umrechnung von AFS63 auf Millisil W 4 und unter der Prämisse der Beaufschlagung einer Anlage mit 90 % der Jahresfracht, ergeben sich die Werte gemäß Tabelle 13 für eine Prüfung der Flächenkategorie II.

**Tabelle 13: Feststofffrachten im neuen Prüfverfahren einer Anlage mit  $500 \text{ m}^2$  angeschlossener Fläche der Kategorie II (Jahresfracht Millisil W 4:  $109 \text{ g}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$ ; davon 90 % =  $49,05 \text{ kg}$ )**

Messung	Prüfrengspende ( $\text{l}/(\text{s} \cdot \text{ha})$ )	Mindest- prüfdauer (min)	$V_{\text{pr}}$ ( $\text{l}/\text{m}^2$ )	Feststoff- verhältnis	Feststoffe (kg)	Wasser- volumen (l)	Konzentration ( $\text{mg}/\text{l}$ )
1	2,5	480	7,2	3	24,53	3.600	6.814
2	6	200	7,2	2	16,35	3.600	4.542
3	25	48	7,2	1	8,17	3.600	2.270
Summe					49,05		

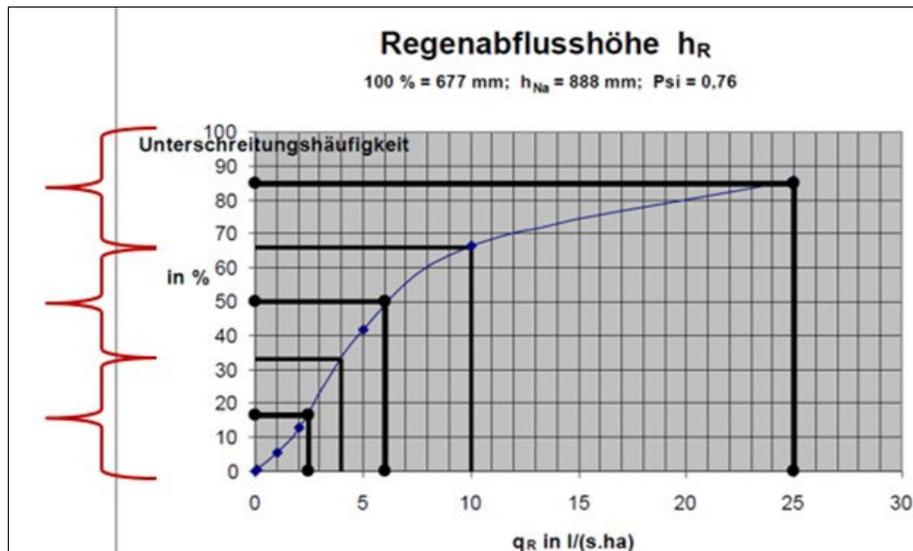
Die Konzentration bei einer Fläche der Kategorie III beträgt sogar fast  $10.000 \text{ mg}/\text{l}$ . Um die Auswirkung einer derart hohen Konzentration auf die Absetzwirkung zu zeigen, wurden Absetzversuche in den Sedimentationssäulen, siehe Kap. 6.5.7, und Versuche an zwei realen Anlagen, siehe Kap. 7.3, durchgeführt.

<sup>2</sup> Die angegebene Jahresfracht zur Prüfung gemäß DIBt-Grundsätzen leitete sich von gemessenen durchschnittlichen Verkehrsflächenfeststoffkonzentrationen ab, bei der auch gering belastete Abflüsse enthalten waren. Daher ist die Flächenbelastung geringer als die gemäß DWA-A 102.

### 5.3 Hydraulische Beaufschlagung

Die dezentralen Anlagen, die gemäß DIBt-Prüfverfahren einer Prüfung im Labor unterzogen wurden, wurden bislang mit drei Prüfredenspenden (2,5, 6 und 25 l/(s · ha)) sowie einem Spülstoß von 100 l/(s · ha) geprüft (DIBt 2017). Die Auswahl dieser drei Prüfredenspenden wurde getroffen, da sie jeweils die Mitte der Häufigkeit der auftretenden Regenabflusshöhen in der Regenstation (Mühdorf am Inn) darstellen (Meißner 2008).

**Abbildung 19: Unterschreitungshäufigkeiten der Regenintensitäten der Station Mühdorf am Inn**

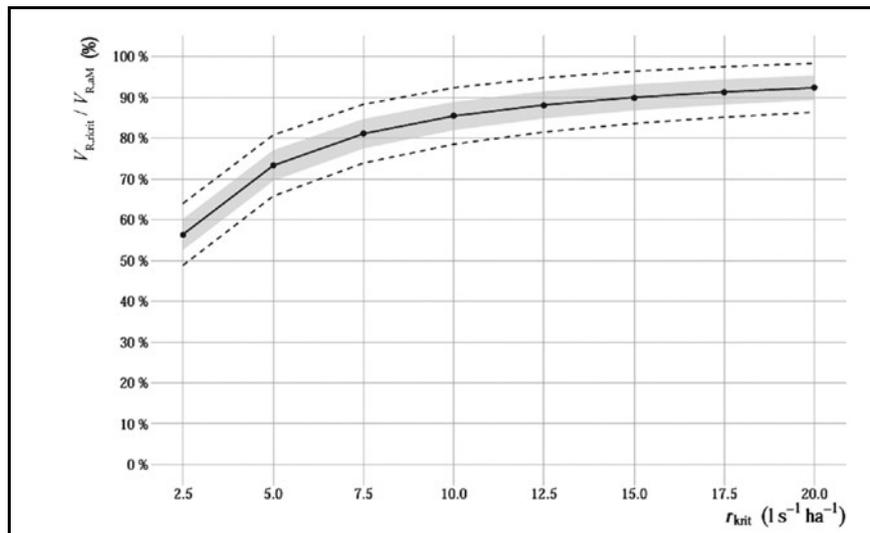


Quelle: Meißner 2008

Der Zulauf zu Behandlungsanlagen, die in ein Oberflächengewässer einleiten, kann gemäß DWA-A 102 zukünftig auf  $r_{krit}$  15 l/(s · ha) gedrosselt werden – alles darüber hinaus wird dann unbehandelt über einen Bypass in das Oberflächengewässer eingeleitet, vgl. auch Abbildung 1. Der Gedanke dahinter ist der, dass bei diesem Wert etwa 90 % des Gesamtvolumens durch eine Anlage geleitet und somit 90 % der Jahresfracht behandelt werden, vgl. Abbildung 20. Dabei wird vorausgesetzt, dass die Frachtaufteilung im Drosselorgan auch der Volumenaufteilung entspricht. Eine Behandlung weiterer Volumenanteile darüber hinaus ist hinsichtlich des Gesamtwirkungsgrades unverhältnismäßig.

Eine Erhöhung der Untergrenze der kritischen Regenspende auf ein  $r_{krit}$  von 25 l/(s · ha) für dezentrale Anlagen erscheint jedoch sinnvoll zu sein. Die Begründung ist, dass die Einstellung und die Überwachung der Drosselleistung bei kleinen Durchflüssen, wie sie in dezentralen Anlagen vorkommt, sehr schwierig ist. Mit einer höheren hydraulischen Belastung ist die Sicherstellung einer Behandlung in Höhe von 90 % der Jahresfracht wahrscheinlicher. Auch zeigen die eingetragenen Bereiche mit Unter- und Obergrenzen, dass die Aufteilung im Einzelfall aufgrund verschiedener örtlicher Regencharakteristiken von der Kurve abweichen wird. Für die meisten dezentralen Anlagen wäre ein leicht höherer Durchfluss kein Problem und damit die angestrebte Volumen- bzw. Frachtaufteilung sicherer zu erreichen. Dazu wurde eine Anfrage in die Arbeitsgruppe, die das neue Merkblatt DWA-M 179 für dezentrale Behandlungsanlagen bearbeitet, getragen mit dem Ziel, eine Empfehlung für dezentrale Anlagen von  $r_{krit}$  von 25 l/(s · ha) statt 15 l/(s · ha) zu geben. Das Ergebnis, welches die Konzeption der Regenspenden in dem Prüfverfahren direkt beeinflusst, bleibt abzuwarten.

**Abbildung 20: Anteil des Regenwasserabflusses unterhalb der kritischen Regenspende ( $V_{R,krit}$ ) bezogen auf das Jahresregenwasserabflussvolumen  $V_{r,aM}$  (DWA-A 102-2 2020)**



Quelle: Leutnant et al. 2020

Auch die Höhe des Spülstoßes (beim DIBt-Verfahren  $r = 100 l/(s \cdot ha)$ ) muss angepasst werden. Hierzu ist ein Exkurs in die Praxis der Drosselung von Regenbauwerken notwendig. Aus dem Bereich der Regen- und Mischwasserbehandlung gibt es zahlreiche technische Regelwerke oder Leitfäden, die sich mit dem Thema der Drosselung beschäftigen (DWA-A 111 2010; HLNUG 2016; Gillar et al. 2018). Hier gelten Durchflüsse von  $Q = 10 l/s$  bereits als sehr klein und deren exakte Drosselung als nicht möglich bzw. sehr schwierig einzustellen. Sollen in Zukunft dezentrale Behandlungsanlagen mit z. B. einer Anschlussfläche von  $500 m^2$  gedrosselt und mit einem Bypass oberhalb eines  $r_{krit}$  von  $15 l/(s \cdot ha)$  ausgestattet werden, so ergibt sich ein sehr kleiner Durchfluss von  $Q = 0,75 l/s$ . Viele Hersteller steuern den Durchfluss ihrer Anlagen mittels den Dimensionierungsvorgaben für Rohrleitungen (Rohrdrossel). Der drucklose Durchfluss durch ein Rohr wird bestimmt durch dessen Durchmesser und durch das Gefälle. Durch ein teilgefülltes Rohr DN 150 mit einem Füllungsgrad von  $h/d = 0,7$  ergibt sich z. B. bei einem geringen Gefälle von  $0,2 \%$  ein Durchfluss von  $Q = 5,7 l/s$ , bei einem hohen Gefälle von  $5 \%$  sind es dagegen  $Q = 28,8 l/s$ . Staut sich das Wasser zurück und es kommt zu einem Druckabfluss, so steigt der Durchfluss noch weiter an. Weiterhin gibt es Drosselblenden im Rohr oder Wirbeldrosseln oder wasserstandsgesteuerte Drosseln aus dem Bereich der Drosselung von Retentionszisternen. In der Praxis ist bei einigen Anlagenkonzeptionen ein zusätzlicher Schacht mit einem Bypassrohr angeordnet, der entsprechend eines Beckenüberlaufs funktioniert, siehe Abbildung 21. Das Wasser überströmt die Anlage bis zu einem bestimmten Durchfluss, bei zunehmendem Durchfluss staut sich das Wasser an und fließt in der Höhe des Bypasses an der Anlage vorbei.

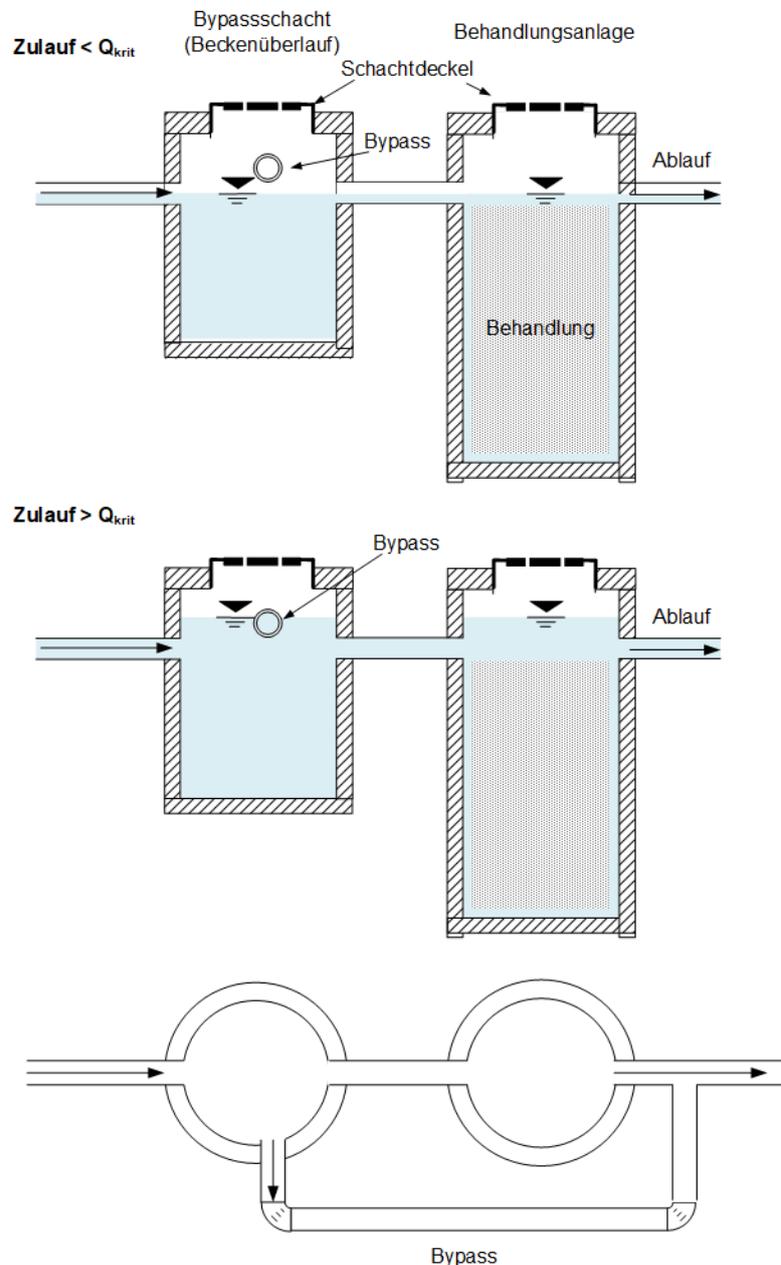
Die Frage nach dem für die Prüfung einzustellenden Spülstoß ist also individuell zu beantworten. Die Gestaltung und Kontrolle der Drosselung des Zulaufs zur Behandlungsanlage kann auf vielfältige Weise realisiert werden. Die Planung dabei ist abhängig von den Randbedingungen des Einbauortes und kann nicht Teil der zu prüfenden Behandlungsanlage sein.

Sinnvoll erscheint die Angabe eines  $Q_{max}$  durch den Hersteller, der jedoch plausibilisiert werden muss. Hier könnten z. B. Tracerversuche bei überströmten Anlagen oder vorgesehene Drosselvorrichtungen herangezogen werden. Das angegebene und plausibilisierte  $Q_{max}$  könnte dann als Spülstoß dienen, wobei dieser um z. B.  $20 \%$  erhöht werden sollte. Dies ist der Toleranzbereich von

Drosseln gemäß einiger Eigenkontroll- und Selbstüberwachungsverordnungen (MKULNV 2013) bzw. Leitfäden (Hessen 2010) der Länder.

Ein weiterer Punkt ist die Kontrolle der Drossleinrichtung bzw. des Bypasses. Ist z. B. der Zugang zu der Behandlungsanlage verlegt (verstopft), so fließt das Regenwasser ständig an der Behandlungsanlage vorbei in das Gewässer. Hier sind Sonden einzubauen, die in regelmäßigen Abständen auszulesen sind. Es gibt Drucksonden, die die Daten durch Funk übertragen können. Diese kosten jedoch derzeit teilweise noch mehr als die eigentliche dezentrale Behandlungsanlage. Drucksonden die vor Ort ausgelesen werden müssen, sind auch heute schon recht kostengünstig zu erhalten. Dieser Passus betrifft eine Prüfung nicht direkt. Er sollte jedoch nicht unerwähnt bleiben, da für die korrekte Umsetzung der Niederschlagswasserbehandlung die Wartung und die Überwachung der Betriebspunkte wesentlich sind, leider aber in der Praxis häufig vernachlässigt werden.

**Abbildung 21: Bypass bei einem Durchfluss  $> Q_{krit}$**



Quelle: eigene Darstellung, Frankfurt University of Applied Sciences 2022

## 5.4 Anforderungen an das Prüfmaterial

Ein Prüfmaterial in einer rechtsicheren Prüfung muss Eigenschaften aufweisen, deren Erfüllung sich zum Teil komplett entgegenstehen. Die wichtigsten Eigenschaften sind dabei

- ▶ die **Repräsentierbarkeit** – der Prüfstoff sollte sich möglichst genauso verhalten, wie ein Stoff in der Realität unter Einbaubedingungen.
- ▶ die **Wiederholbarkeit** – der Stoff sollte reproduzierbare und unveränderliche Eigenschaften beim Rückhalt (Sedimentation oder andere Verfahren) aufweisen, sich bereits bei der Lagerung stabil zeigen und immer gleiche Versuchsergebnisse hervorbringen.

Ein Prüfmaterial muss homogen in den Zulauf einer Behandlungsanlage dosiert werden können, ohne dass dabei Entmischungsprozesse, Agglomeration oder Staubproduktion auftreten.

Das Prüfmaterial muss darüber hinaus unbegrenzt verfügbar sein. Kosten spielen eine nebengeordnete Rolle, sollten aber den Prüfungsrahmen auch nicht sprengen.

Die Anforderungskriterien sowie die in diesem Projekt durchgeführten Untersuchungen dazu sind in Tabelle 14 zusammengefasst.

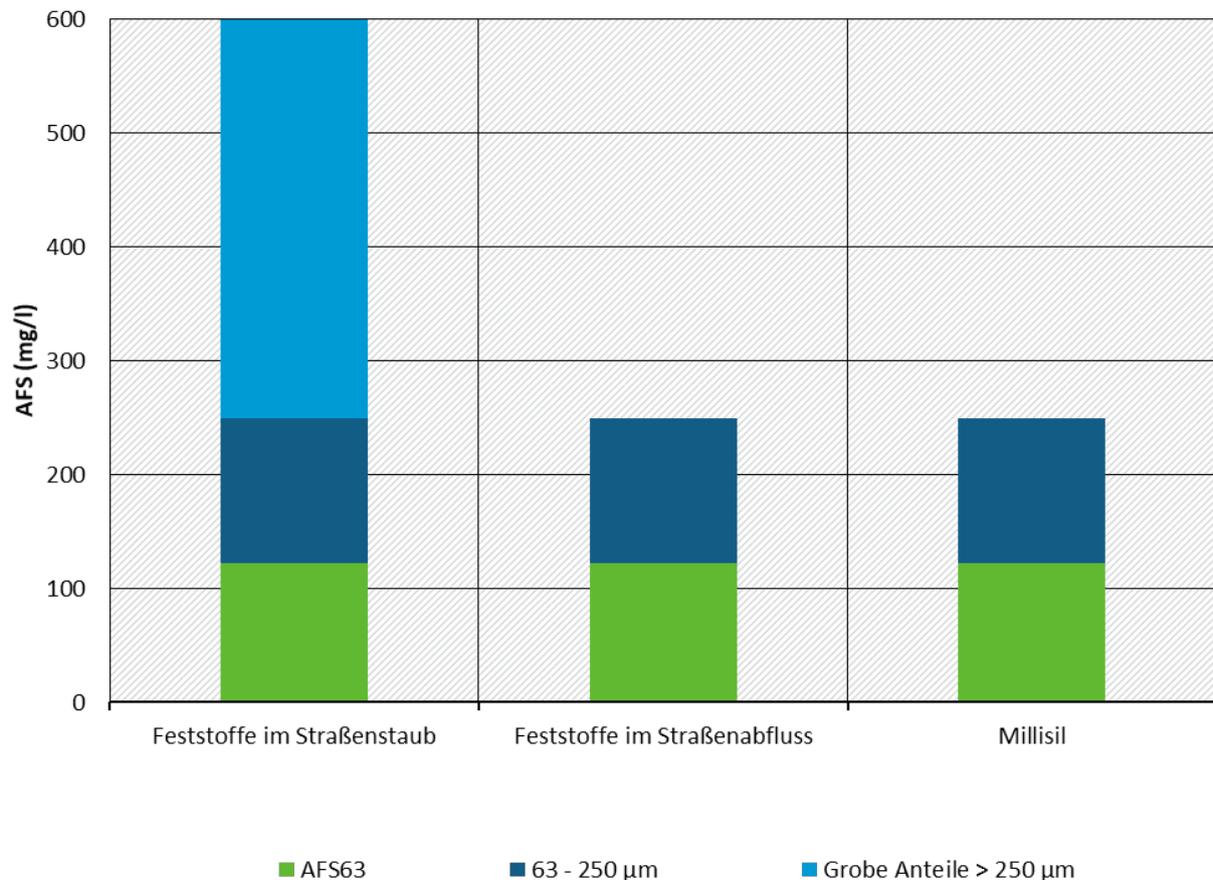
**Tabelle 14: Anforderungskriterien an ein Prüfmaterial**

Anforderung	Art der Bewertung
Zusammensetzung sollte reale Eigenschaften von Abflüssen abbilden können (Partikelgrößenverteilung, Dichte, Form)	Literaturstudie
Immer in gleicher, nachvollziehbarer Qualität verfügbar sein (Partikelgrößenverteilung, Dichte, Form)	Literaturstudie
Material muss inert sein: Reproduzierbare und unveränderliche Sedimentationseigenschaften (u. a. darf kein unkontrolliertes Quellen der Materialien auftreten)	Laboruntersuchung
Konstante Dosierfähigkeit in den Zulauf einer Behandlungsanlage (keine Verklumpung, Staubbildung oder Entmischung)	Laboruntersuchung (AP 2.1) / Bewertung gemeinsam mit Prüfstellen (AP 2.2)
Auf dem Markt dauerhaft verfügbar und Kosten nicht über x % der Gesamtprüfung	Marktstudie

### 5.4.1 Partikelgrößenverteilung / AFS

Straßenabflüsse weisen je nach Regencharakteristik, Einzugsgebiet und Ort der Beprobung (direkt am Anfallsort oder z. B. am Trenngebietsauslass) unterschiedliche Korngrößenverteilungen auf. Der größte Partikeldurchmesser in Abflüssen von dezentralen Einzugsgebieten liegt häufig unterhalb von 250 µm, da diese Anteile überwiegend abflusswirksam sind, siehe auch 4.3.1, wenngleich es in einigen Fällen auch gröbere Anteile gibt (Abbildung 22).

**Abbildung 22: Korngrößen von Feststoffen in Straßenstäuben und -abflüssen (Dierschke et al. 2010; Gelhardt 2020), sowie im Prüfstoff Millisil W 4 im Vergleich**



Quelle: eigene Darstellung, Frankfurt University of Applied Sciences, 2022

In bestehenden Prüfverfahren für dezentrale Regenwasserbehandlungsanlagen zur Einleitung in das Grundwasser durch das DIBt oder in NRW wurde deshalb als inertes Prüfmaterial das Quarzmehl Millisil W 4 gewählt. Dieses Material weist eine maximale Partikelgröße von 250 µm ( $AFS_{250}^{\text{Millisil}}$ ) mit einem AFS63-Anteil von 49 % Massenanteil auf. Dieses entspricht der mittleren Partikelgrößenverteilung von Straßenabfluss (Dierschke et al. 2010; Gelhardt 2020).

Für die Bewertung der Behandlungsbedürftigkeit von Abflüssen wird zukünftig nur der Anteil der Partikel < 63 µm - der AFS63 - herangezogen (DWA-A 102-1 2020; DWA-A 102-2 2020). Der Rückhalt dieses Parameters muss durch die Behandlungsanlagen gewährleistet und rechtsverbindlich überprüft werden. Logisch wäre daher die Prüfung mittels eines Prüfstoffes, der nur diese Feianteile aufweist. Dies wurde in der Vergangenheit bereits mit einem sehr feinen Prüfstoff (Millisil W 11) an realen Anlagen probiert. Die Versuche konnten jedoch nicht ausgewertet werden, da eine Staubeentwicklung bei der Aufgabe nicht zu vermeiden war und ein unbekannter Teil des Prüfstoffes nicht in die Anlage überführt werden konnte. Ein weiterer Aspekt gegen die Verwendung des feinen Millisils W 11 in großen Mengen war die gesundheitliche Belastung des Laborpersonals durch Feinstaub.

Die Alternative der Verwendung eines gröberen, dem realistischen Straßenabfluss entsprechenden, Materials ist genauso zielführend, wenn bei einer Prüfung dieser Anteil im Ablauf gemessen und auf den AFS63-Anteil im Zulauf bezogen wird. Die Verwendung eines Prüfstoffes mit einem Korngrö-

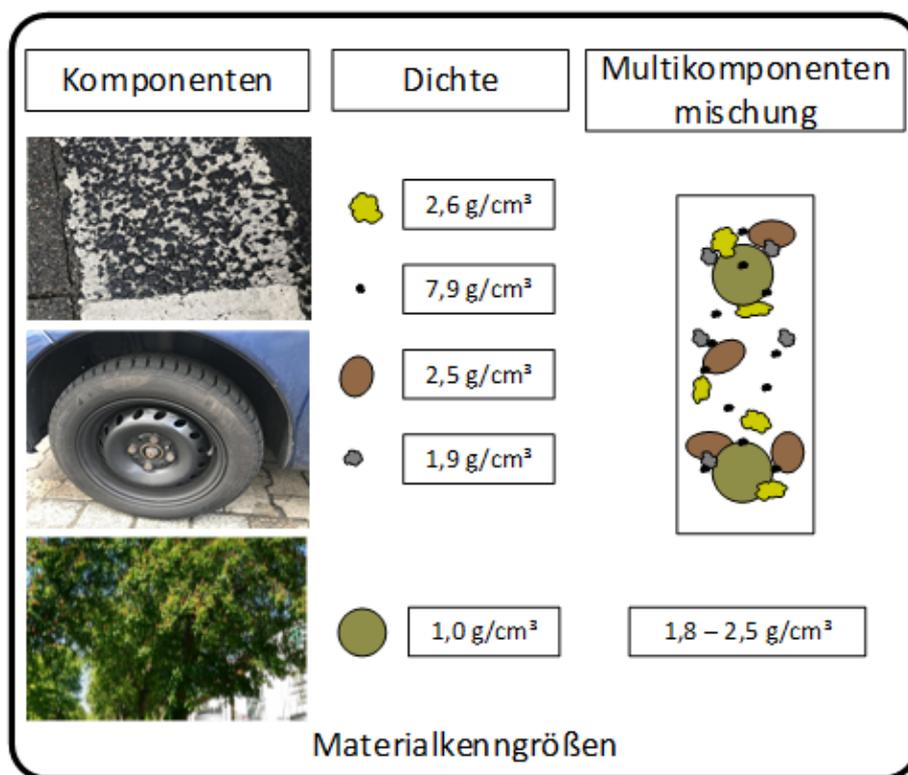
ßenbereich bis 250 µm kann bei der Prüfung auch mögliche Engpässe beim Sedimentrückhalt aufdecken, wenn z. B. der Schlammfang zu klein konzipiert ist und sedimentierter Schlamm beim Spülstoß wieder ausgetragen wird.

### 5.4.2 Dichte

Reale Abflüsse bestehen aus verschiedenen Komponenten, die nicht nur eine unterschiedliche Partikelgröße sondern auch eine unterschiedliche Dichte aufweisen (Abbildung 23). Die Dichte variiert abhängig vom Geschehen im Einzugsgebiet sowie vom jeweiligen Regenereignis und liegt in Straßenabflüssen in einem weiten Bereich von 1,8 - 2,5 g/cm<sup>3</sup> vor. Hierzu tragen Komponenten aus dem Straßenabrieb ( $\rho = 2,6 \text{ g/cm}^3$ ), anlagernde Schwermetalle ( $\rho = 7,9 \text{ g/cm}^3$ ), Straßen- und Reifenabrieb (TRWP;  $\rho = 1,5 - 2,2 \text{ g/cm}^3$ ) oder Vegetationsbestandteile ( $\rho = \text{ca. } 1,0 \text{ g/cm}^3$ ) bei (vgl. Kap.4.3.2).

Für einen repräsentativen Prüfstoff wären demnach Dichteigenschaften in diesem Bereich optimal.

**Abbildung 23: Komponenten und ihre Dichten in Verkehrsflächenabflüssen**



Quelle: eigene Darstellung, Frankfurt University of Applied Sciences 2022

Aufbereiteter, klassierter, seinen Eigenschaften (Dichte, Glühverlust) nach bestimmter Straßentaub in immer gleicher Zusammensetzung und ausreichender Menge wäre von seinen Absetzeigenschaften her optimal als Prüfstoff zur Beurteilung von dezentralen Anlagen. Die Herstellung eines solche Prüfmaterials ist aber nicht leistbar, siehe auch Kapitel 5.4.4.

Ein weiteres Argument ist, dass Prüfmaterialien mit einem Anteil an organischen Stoffen nicht inert sind und sich während der Lagerung oder während der Prüfung bis zu Probenanalyse verändern können. Die Reproduzierbarkeit und Vergleichbarkeit von Prüfungen könnten somit nicht gewährleistet werden.

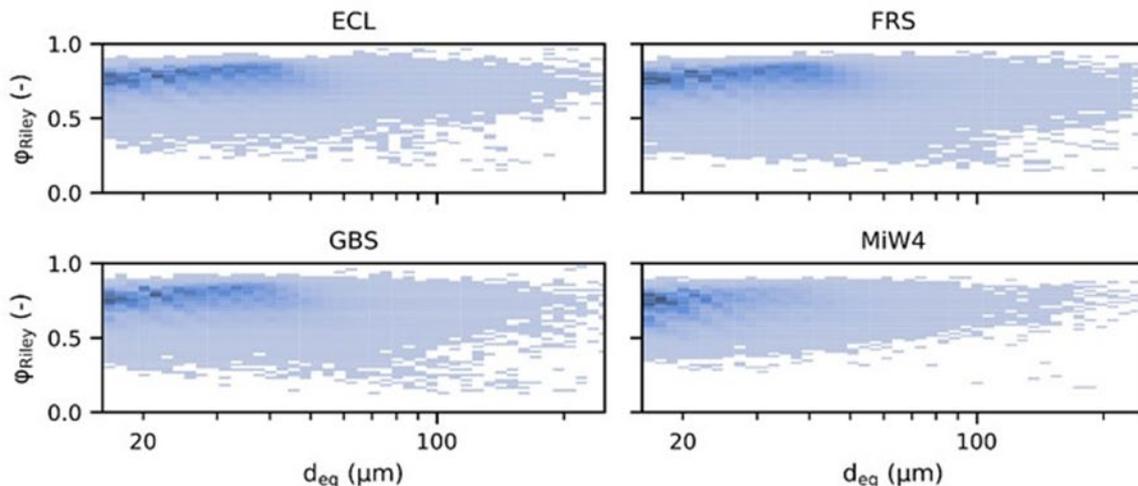
Die Erzeugung eines Mischmaterials aus mineralischen und organischen Kunststoffen könnte sich weiterhin auf dem Weg in die Anlage entmischen und hierbei zu variierenden Rückhaltewerten führen. Um eine gleichförmige Dosierung zu gewährleisten, ist demnach ein monodisperses Material erforderlich.

### 5.4.3 Kornform

Die Kornform von Partikeln kann deren Absetzverhalten zumindest in der Theorie beeinflussen, vgl. auch Kap. 6.1. Bei der Auswahl von Prüfstoffen sollte die durchschnittliche Kornform nicht allzu sehr von der Kornform von realen Straßenstäuben abweichen. Dies lässt sich gut mit der Zirkularität beschreiben, vgl. auch Kap. 4.3.3. Millisil deckt im Mittel die Kornform von Straßenstäuben gut ab, vgl. Abbildung 24, wenngleich es bei Straßenstäuben eine größere Bandbreite der möglichen Kornformen gibt, die jedoch je nach Geschehen und Randbedingungen in der Örtlichkeit sehr variieren.

#### Abbildung 24: 2D-Histogramm der Zirkularität ( $\Psi$ -Riley) in Abhängigkeit vom Partikeldurchmesser in drei Straßenstäuben aus Frankfurt

ECL, FRS, GBS n = 130.000 bis 211.000; Millisil W 4 n = 58.000, bestimmt mittels Digitaler Bildanalyse



Quelle: Rommel et al. 2020

### 5.4.4 Recherche Prüfmaterialien

Als Schlussfolgerung aus den vorangestellten Kapiteln ergibt sich ein inertes (mineralisches) monodisperses (gleiche Masse innerhalb der Komponenten) Material, das für eine wiederholbare Prüfung verwendet werden sollte. In der folgenden Tabelle 15 sind Materialien zusammengestellt, deren Eignung als Prüfmaterial zunächst theoretisch geprüft wurde. Hierbei wurde insbesondere auf die Korngößenverteilung und die Dichte geachtet, die die Sedimentationseigenschaften maßgeblich beeinflussen (vgl. Kap. 6.1). Weitere Aspekte waren die gleichbleibende Verfügbarkeit, die Handhabung im Labor sowie die Kosten, die von der Bedeutung her absteigend genannt sind.

Da für eine Prüfung von Sedimentationsanlagen und Feststellung der Wirksamkeit dieser Anlagen die Absetzeigenschaften des Prüfstoffes relevant sind, wurden im Anschluss zahlreiche Absetzversuche mit vielversprechenden Materialien im Labor sowie mit Straßenstäuben durchgeführt, um mögliche Abweichungen zu identifizieren (Kap. 2).

**Tabelle 15: Recherche Prüfmaterialien, nach Dichte sortiert absteigend. NB: nicht bestimmt**

Material	Hersteller	Glühverlust (%)	Dichte (g/cm <sup>3</sup> )	AFS63-Anteil (%)	Korngrößenbereich (µm)	Form	Kosten	Studien, Prüfverfahren	Bewertung	Begründung für die Bewertung
<b>Straßenabfluss (Schwerpunkt-werte aus Literaturreview)</b>		<b>27±12</b>	<b>ca. 1,9-2,5</b>	<b>37-85</b>	<b>Schwerpunkt mäßig abflusswirksam &lt; 250 µm (punktuell bis &lt; 2.000 µm)</b>	<b>kantig, rund, faserig</b>				
<b>Millisil W 4 (Quarzmehl)</b>	Quarzwerke GmbH, Haltern	< 0,1	2,65	49	< 250	kantig, kompakt	+	DIBt, 2015/2017 und Prüfungsvorgaben NRW, LANUV (2012)	+++	Dichte erhöht, aber sonst bezogen auf Form, PSD und Verfügbarkeit ideal
<b>Millisil W 11 (Quarzmehl)</b>	Quarzwerke GmbH, Haltern	< 0,1	2,65	97	< 100	kantig, kompakt	+	Dierschke et al. 2010	+	Dichte erhöht, zu fein
<b>Millisil W 3 (Quarzmehl)</b>	Quarzwerke GmbH, Haltern	< 0,1	2,65	38	< 250	kantig, kompakt	+	Dierschke et al. 2010	++	Dichte erhöht, zu grob
<b>Silcosil (Quarzmehl)</b>	US Silica; USA, Katy (Texas)	< 0,1	2,65	ca. 90	< 100	kantig, kompakt	+	NJDEP (2013), US-Prüfverfahren	++	Dichte erhöht, zu fein
<b>Sand-Kies-Gemisch</b>	Testra-Strahlmittel, Tebbe-Neuenhaus GmbH, Bottrop-Kirchhellen	NB	2,60	0	100 - 4.000	kantig, faserig	+	LANUV (2012) Barjenbruch et al. (2016) Zusammengesetzt aus Sieblinien Straßenkehricht	--	Dichte erhöht, zu grob

Material	Hersteller	Glühverlust (%)	Dichte (g/cm <sup>3</sup> )	AFS63-Anteil (%)	Korngrößenbereich (µm)	Form	Kosten	Studien, Prüfverfahren	Bewertung	Begründung für die Bewertung
<b>Silibeads (Glaskugeln)**A</b>	Sigmund Lindner GmbH, Warmensteinach	< 0,1	2,50	42	< 250	rund	-		++	Dichte geringer als Millisil, PSD gut, → Absetzversuche Kugelform nicht repräsentativ für Feststoffe in Straßenabfluss Offene Fragen: Verhalten in Siebmaschine, Sicherheitsaspekte im Labor
<b>Silibeads (Glaskugeln)</b>	Sigmund Lindner GmbH, Warmensteinach	< 0,1	2,50	NB	40-70	rund	-	Voßwinkel et al. (2018), Fuchs et al. (2019a)	-	Dichte geringer als Millisil, zu fein, Kugelform nicht repräsentativ für Feststoffe in Straßenabfluss
<b>Bismehl**</b>	Kremer Pigmente GmbH & Co. KG, Aichstetten	4	2,35	57	< 250	kantig, kompakt	0		+++	Dichte näher im Bereich von Straßenabfluss, PSD und Form sehr gut → Absetzversuche Offene Fragen: Beständigkeit zu untersuchen
<b>Carbonfasern gemahlen (SIGRAFIL®C M80-4.0/240-UN)</b>	SGL TECHNOLOGIES GmbH, Meitingen	14,4	1,80	84	< 125	faserig	-		--	Dichte gut (entspricht mittlerem Abfluss), Form entspricht nicht Partikeln in Straßenabfluss, Fasern schwimmen auf und zerbrechen leicht
<b>Gummifeinmehl (LKW-Reifen) (Type - K 0002, MRH)</b>	Mülsener Rohstoff- und Handelsgesellschaft mbH, Mülsen	NB	1,17	0,06	< 230	kompakt	0	NRW RÜZEN, Korrespondenz Maie Wietbüscher	--	entspricht nicht TRWP (Feststoffe aus Reifen und Belag im Straßenabfluss), Dichte zu gering, nicht in gleicher Zusammensetzung lieferbar (versch. Altreifen, Material, PSD)

Material	Hersteller	Glühverlust (%)	Dichte (g/cm <sup>3</sup> )	AFS63-Anteil (%)	Korngrößenbereich (µm)	Form	Kosten	Studien, Prüfverfahren	Bewertung	Begründung für die Bewertung
<b>HIPS High Impact Polystyrene, PS-Granulat</b>	NEOS Styrolution Group GmbH, Frankfurt a. M.	NB	1,04	0	H:3.000, Ø2.000	zylindrisch	0	Fuchs et al. (2019) NRW MEREKEN (2018)	--	nur zu optischen Darstellung genutzt (für Absetzversuche als nicht geeignet eingestuft)
<b>PS-Granulat (STYROLUTION PS 495N)</b>	Fa. Albis Plastic GmbH, Stuttgart	NB	1,03	0	H:3.000, Ø2.000	zylindrisch	0	LANUV (2012) Barjenbruch et al. (2016)	--	Grobkörnige Schwebstoffe (Tendenz absinkend), demonstriert nur Schwebstoffrückhalt, repräsentiert nicht Straßenabfluss
<b>PE-Granulat (HOSTALEN GD 4755 PE-HD)</b>	Fa. Albis Plastic GmbH, Stuttgart	NB	0,95	0	H:2.000, Ø3.000-4.000	linsenförmig	0	LANUV (2012) Barjenbruch et al. (2016)	--	Grobkörnige Schwebstoffe (Tendenz aufschwimmend), demonstriert nur Schwebstoffrückhalt, repräsentiert nicht Straßenabfluss
<b>Gemisch aus Mineralischem und Blumenerde (&lt; 0,8 mm)-</b>	viele	30	NB	NB	< 1.000	kantig, faserig	+	Pick et al. (2008)	--	nicht deutschlandweit in gleicher Zusammensetzung erwerblich
<b>Rindenmulch</b>	viele	NB	0,3-0,4 (Rohdichte)	0	0-40.000	faserig, holzig	+	Barjenbruch et al. (2016)	--	demonstriert nur Schwebstoffrückhalt, repräsentiert nicht Straßenabfluss

Die Materialien sind nach der Dichte abwärts bzw. dem Glühverlust aufwärts sortiert und beginnen bei Millisil und Silcosil, quarzhaltigen, kantigen Materialien, welche in unterschiedlichen Korngrößenverteilungen erhältlich sind und bereits in vielen Prüfverfahren in Deutschland, Österreich und USA als Standardmaterialien eingesetzt werden. Als sehr grobes Material wird auch ein Sand-Kies-Gemisch ähnlicher Dichte aufgeführt, welches als Testmaterial für grobe Inhaltsstoffe verwendet wird (LANUV 2012; Barjenbruch et al. 2016). Alle drei quarzhaltigen Materialien sind kostengünstig in großen Chargen erhältlich.

Mit etwas geringerer Dichte sind sogenannte Silibeads in verschiedenen Korngrößenspektren erhältlich, die kugelförmig sind und u. a. als Straßenmarkiermaterial verwendet werden. Silibeads wurden aufgrund der etwas geringeren Dichte im Vergleich zu Quarzmaterialien und der passenden Korngrößenverteilung für Absetzversuche ausgesucht, obwohl sie vergleichsweise teuer sind.

Bimsmehl weist eine Dichte von  $2,35 \text{ g/cm}^3$  sowie eine den Straßenpartikeln ähnliche unregelmäßige Form auf. Dieses Material wurde aufgrund der passenden Korngrößenverteilung ebenfalls für Absetzversuche ausgewählt. Die Kosten bewegen sich im mittleren Bereich.

Gemahlene Carbonfasern haben eine Dichte von  $1,8 \text{ g/cm}^3$  und könnten damit den Bereich leichter Feststoffe abdecken. Die faserige Form entspricht jedoch nicht dem Großteil von Feststoffen in Straßenabflüssen. Auch gelang es in Laborversuchen nicht, die Carbonfasern zerstörungsfrei in die Säulen zu überführen, so dass sie als nicht geeignetes Prüfmaterial bewertet wurden und damit keine weiteren Versuche durchgeführt wurden.

Gummireifenmehl aus LKW-Reifen ist kommerziell erhältlich. Da es jedoch wesentlich leichter als Feststoffe in Straßenabflüssen ist ( $\rho = \text{ca. } 1,18 \text{ g/cm}^3$ ), nicht in gleichbleibender Zusammensetzung bezüglich Materials und Dichte hergestellt und geliefert werden kann sowie in der Umgebung so nicht vorkommt, wurde es als Prüfmaterial ausgeschlossen. Reifenmehl ist immer durch die Reibung mit Asphalt oder Betonbestandteilen der Straßenoberfläche verbunden und somit als Straßenstaubpartikel wesentlich schwerer, vgl. auch Kap. 4.2.2.

PS-, und PE-Granulate mit einer Dichte von etwas über  $1 \text{ g/cm}^3$  wurden in der Vergangenheit bereits als Prüfstoff verwendet (Voßwinkel et al. 2018; LANUV 2012; Fuchs et al. 2019a) jedoch nur zur optischen Einschätzung eines Schwebstoffrückhaltes. Für Absetzversuche oder Prüfungen der Absetzwirksamkeit sind diese Materialien nicht geeignet.

Die Verwendung von realem Straßenstaub als Prüfstoff wurde in der Vergangenheit immer wieder diskutiert. Nun ist es jedoch so, dass Straßenstaub nie in gleicher Zusammensetzung insbesondere bezüglich der Dichte und Korngrößenverteilung vorliegt. Um Straßenstaub in immer gleicher Zusammensetzung zu erhalten, muss dieser gewonnen, getrocknet und fraktioniert werden, die Dichte bzw. organischer Anteil der einzelnen Fraktionen bestimmt werden sowie als Prüfstoff in entsprechender Menge wieder eingewogen werden. Die Frankfurt UAS hat in den vergangenen Jahren für verschiedene Forschungsprojekte Straßenstaub gesammelt und dessen Stoffeigenschaften charakterisiert (Rommel et al. 2020; Gelhardt 2020; Welker et al. 2019b; Gelhardt et al. 2021). Der Gesamtaufwand für die Herstellung von 24 g Prüfmehl mit einer Korngrößenverteilung von 0 bis  $250 \mu\text{m}$  beträgt im Wasserprüflabor der Frankfurt UAS etwa 8 bis 10 Stunden. Der Zeitaufwand für die Herstellung von 100 kg Straßenstaub mit bekannter PSD beträgt demnach hochgerechnet 33.333 Zeitstunden bzw. 16 Jahre. Dieser Aufwand ist für die Prüfung einer Anlage nicht zu leisten.

Weitere organische Materialien geringer Dichte wurden ebenfalls für verschiedene Laborversuche genutzt, sind jedoch nicht in gleichbleibender (Korngrößen-)Zusammensetzung in größerem Umfang erhältlich und werden daher nicht weiter betrachtet.

Letztendlich ausgewählt für Absetzversuche wurden anorganisches Millisil, Silibeads sowie Bimsmehl. Die Versuche sind in Kapitel 6.5.2 dargestellt. Weiterhin wurden aufbereitete Straßenstäube verwendet, um den Unterschied des Sinkverhaltens im Vergleich zum quarzhaltigen Millisil zu zeigen.

## 5.5 Umrechnung des Wirkungsgrades auf den Gesamtwirkungsgrad des Systems

Bei der Prüfung der Anlagen im Labor wird als Ergebnis ein Wirkungsgrad ermittelt. Dieser ist in zweifacher Hinsicht umzurechnen. Zum einen muss eine Umrechnung auf den Anteil aller Partikel < 63 µm sowohl im Zulauf als auch im Ablauf, zum anderen die Berücksichtigung des Bypasses erfolgen.

Nachfolgend ist der Umrechnungsschritt für das Prüfmehl Millisil W 4 dargestellt. Millisil W 4 weist eine Korngrößenverteilung von 0 – 250 µm auf, wovon 49 % AFS63 und 51 % AFS<sub>grob</sub> (63 bis 250 µm) sind. Das heißt, dass für die Berücksichtigung des AFS63-Rückhaltes nur 49 % der eingetragenen Fracht berücksichtigt werden kann. Gemessen im Ablauf wird der Feinanteil AFS63. Somit ergibt sich folgender Wirkungsgrad eines Prüfschrittes oder einer Teilprüfung:

### Umrechnung von Millisil W 4-Rückhalt auf AFS63-Rückhalt je Teilprüfung in [%]

$$\eta_{AFS63\text{Teilprüfung}} [\%] = \left( 1 - \frac{AFS63_{\text{Ablauf}} [\text{kg}]}{0,49 \cdot \text{Millisil}_{\text{Zulauf}} [\text{kg}]} \right) \cdot 100 \% \quad (1)$$

Besteht die Prüfung aus mehreren gleichwertigen Teilprüfungen, so werden die Teilprüfungswirkungsgrade gemittelt.

Der Spülstoß wird bei vielen Anlagen, die über einen Bypass verfügen und somit nicht im Vollstrom beschickt werden, einen Feststoffaustrag mit sich bringen. Dieser kann folgendermaßen berücksichtigt werden:

### Bewertung Spülstoß in [%]

$$\eta_{AFS63\text{Spülstoß}} [\%] = - \left( \frac{AFS63_{\text{Ablauf\_Spülstoß}} [\text{kg}]}{0,49 \text{ Millisil}_{\text{Zulauf.gesamt}} [\text{kg}]} \right) \cdot 100 \% \quad (2)$$

Der Anlagenwirkungsgrad ist um diesen Anteil zu verringern.

### Anlagenwirkungsgrad [%]

$$\eta_{AFS63\text{Anlage}} [\%] = \text{Mittelwert aus } \eta_{AFS63\text{Teilprüfungen}} [\%] + \eta_{AFS63\text{Spülstoß}} [\%] \quad (3)$$

Die Festlegung der Berücksichtigung des Spülstoßes nur zur Hälfte wurde in den DIBt-Zulassungsgrundsätzen für Anlagen ohne Bypass getroffen, da Regenspenden mit  $r = 100 \text{ l}/(\text{s} \cdot \text{ha})$  selten vorkommen (statistisch gesehen einmal im Jahr) und gleichzeitig auf

eine seit einem Jahr nicht geleerte Anlage treffen müssen. Die Beschickung einer Anlage mit einer Regenintensität von 25 l/(s · ha) über einer Dauer von 15 min findet dagegen mehrmals im Jahr statt. Ist eine Anlage so konstruiert, dass sie Feststoffe nicht dauerhaft zurückhalten kann, kann sie schnell über den Spülstoßeffekt mit einer Reduktion des Anlagenwirkungsgrades identifiziert werden.

**Daher wird empfohlen, der Bewertung nicht die halbe Austragsfracht (wie beim DIBt-Verfahren), sondern die gesamte ausgespülte Fracht während des Spülstoßes zugrunde zu legen.**

Ein weiterer Rechenschritt dient der Bewertung der Wirksamkeit des Gesamtsystems, der sich aus der Wirksamkeit der Anlage sowie des Anteils, der unbehandelt an der Anlage vorbeigeführt wird, zusammensetzt. Unter der Prämisse, dass 10 % der Jahresfracht unbehandelt an der Anlage vorbeigeleitet werden, beträgt die Wirksamkeit des Gesamtsystems:

#### Umrechnung des AFS63-Rückhaltes in der Anlage auf den Gesamtrückhalt des Systems in [%]

$$\eta_{AFS63} \text{ Gesamtsystem} [\%] = \eta_{AFS63} \text{ Anlage} \cdot 0,9 [\%] \quad (4)$$

Weitere Faktoren zur Korrektur sind denkbar, vgl. auch Kapitel 6.5.5, Kapitel 8.1.2 und Kapitel 8.1.3.

#### Berücksichtigung von sonstigen Korrekturfaktoren zur Berechnung des Gesamtrückhaltes im System in [%]

$$\eta_{AFS63} \text{ Gesamtsystem} [\%] = \eta_{AFS63} \text{ Anlage} \cdot \text{Faktor} [\%] \quad (5)$$

## 6 Untersuchungen zum Absetzverhalten von Feststoffen in einer Laborsäule

An der Frankfurt UAS wird eine ursprünglich von (Brombach et al. 1992) konzipierte, weiterentwickelte Absetzsäule für systematische Untersuchungen von Absetzvorgängen verwendet. Die Ergebnisse erlauben vergleichende Rückschlüsse zu bestimmten Phänomenen des Sedimentierens von Feststoffen zu ziehen. Eingeschränkt werden die Ergebnisse, da hier anders als bei in der Realität eingesetzten Behandlungsanlagen keine Horizontalgeschwindigkeit vorliegt, die Reynoldszahl, also nahe null beträgt. Weiterhin handelt es sich um ein Übersichtungsverfahren – die Feststoffkonzentration oben in der Säule ist zunächst maximal und verringert sich zunehmend beim Trennen der schnell absinkenden von den langsam absinkenden Partikeln.

Zu Beginn werden kurz einige theoretische Grundlagen zur Sinkgeschwindigkeit von Feststoffen erläutert. Anschließend werden das Untersuchungskonzept, die verwendeten Materialien und Methoden und schließlich die Ergebnisse beschrieben.

### 6.1 Theoretische Grundlagen zur Sinkgeschwindigkeit von Feststoffen

In diesem Kapitel werden die theoretischen Grundlagen zur Sinkgeschwindigkeit von partikulären Feststoffen und Partikelkollektiven kurz vorgestellt und absetzrelevante Kenngrößen benannt.

Zur Berechnung der stationären Sinkgeschwindigkeit  $v_s$  (m/s) ist die Formel von Stokes am bekanntesten. Diese ist jedoch nur eingeschränkt auf Kugeln mit bekannter Größe und Dichte anwendbar, die sich in einem ruhenden Fluid bewegen, wobei die Reynoldszahl  $Re$  also nahezu Null ist.

$$v_{\text{Stokes}} = \frac{g \cdot d_K^2}{18 \cdot \eta} \cdot (\rho_K - \rho_F)$$

Dabei sind:

- $g$ : Schwerebeschleunigung ( $9,81 \text{ m/s}^2$ ),
- $d_K$ : Durchmesser der Kugel (m),
- $\rho_K$ : Dichte des Körpers ( $\text{kg/m}^3$ ),
- $\rho_F$ : Dichte des Fluids ( $\text{kg/m}^3$ ) und
- $\eta$ : dynamische Viskosität des Fluids ( $\text{kg/m} \cdot \text{s}$ ).

Erkennbar ist jedoch, dass die Dichte des Fluids und die Dichte des Partikels die Sinkgeschwindigkeit beeinflussen und dass der Durchmesser der Kugel quadratisch in die Formel eingeht, also einen viel höheren Einfluss auf die Sinkgeschwindigkeit als die anderen Parameter hat.

Bei amorphen Strukturen, wie sie bei Feststoffen auf Verkehrsflächen vorkommen, ändert sich das Sinkverhalten bei gleicher Dichte und Volumen im Vergleich zur Kugel. Die Partikel sedimentieren vergleichsweise langsamer. Als messbare absetzrelevante Kenngrößen der Feststoffe spielt also neben der Partikelgröße und -dichte auch die Partikelform eine Rolle. Für natürliche Partikel wie Sand ( $\rho = 2,65 \frac{\text{g}}{\text{cm}^3}$ ), die von der Kugelform abweichen, kann die stationäre Sinkgeschwindigkeit der Partikel mit einem Durchmesser  $d_N$  durch semiempirische Formeln angenä-

hert werden (Dietrich 1982; Hallermeier 1981; Zhiyao et al. 2008). (Dietrich 1982) konnte zeigen, dass der Unterschied der Sinkgeschwindigkeit von Quarzpartikeln  $< 400 \mu\text{m}$  bei einer Temperatur von  $20 \text{ }^\circ\text{C}$  jedoch unerheblich im Vergleich zu Kugeln ist.

In einem Literaturreview von 2009 werden einige – auch ältere - Experimente zusammengestellt (Semadeni-Davies 2009). Die Hauptkenntnisse darin sind, dass

- ▶ Kugeln im Vergleich zu allen anderen Formen am schnellsten sind.
- ▶ Partikel mit scharfen Kanten eine um etwa 2 bis 28 % geringere Absetzgeschwindigkeit im Vergleich zu Partikeln mit abgerundeten Formen (Scheiben oder Zylinder) und ansonsten gleichen Eigenschaften aufweisen.
- ▶ Der Unterschied in der Absetzwirkung umso deutlicher ausfällt, je größer die Partikel sind.
- ▶ Der Einfluss der Form bei Partikeln der Größenordnung im Bereich von Niederschlagsabflüssen minimal auf die Absetzeigenschaften ist, was die Aussage von (Dietrich 1982) bestätigt.

Die Anwesenheit vieler Partikel, also eine hohe Feststoffkonzentration, verändert das Geschwindigkeitsfeld ebenfalls (Kaskas 1970). Impulse durch Stöße der Partikel untereinander können sowohl beschleunigende als auch bremsende Wirkung auf die Sinkgeschwindigkeit haben. Bei Partikelkollektiven mit steigender Abweichung zwischen kleinster und größter Fraktion ist bei der Interpretation von Versuchsergebnissen zusätzlich zu beachten, dass feine Fraktionen durch die erzeugte Gegenströmung der großen Partikel verlangsamt werden (Brauer und Thiele 1973). (Brauer und Thiele 1973) berichten von einer Abnahme der Sinkgeschwindigkeit (Hindered Settling) bei einer sehr hohen Volumenkonzentration von  $> 2 \%$ . Dies ist jedoch erst bei z. B. Schlämmen aus der Abwasserbehandlung der Fall. Bis zu Volumenkonzentrationen von 1 bis 2 Vol.-%<sup>3</sup> steigt die Sinkgeschwindigkeit dagegen (Koglin 1971). Eine Zunahme der Sinkgeschwindigkeit von realen Abflüssen höherer Konzentration stellten auch Aiguier et al. (1996) in ihren Laborversuchen zur Absetzbarkeit von Feststoffabflüssen fest.

In realen Anlagen handelt es sich im Gegensatz zu Laborsäulen nicht um ein ruhendes Fluid und die Absetzwirkung wird daher auch von dem Betrag der Reynolds-Zahl als Maß für das Verhältnis von Trägheits- zu Zähigkeitskräften beeinflusst. Je höher die Reynoldszahl, desto geringer wird der Einfluss der Konzentration auf die Sinkgeschwindigkeit (Stieß 2009). Die in (Raudkivi 1998) vorgestellten Formeln zum Einfluss der Konzentration auf die Sinkgeschwindigkeit beinhalten Parameter, die die Reynoldszahl berücksichtigen. (Semadeni-Davies 2009) wendete diese Formel an und kam zu dem Ergebnis, dass der Unterschied der Sinkgeschwindigkeit eines Einzelpartikels zur Sinkgeschwindigkeit eines Partikelschwarms gleichgroßer Partikel in Regenabflüssen mit einer typischen Korngröße von  $< 200 \mu\text{m}$  und einer geringen Stoffkonzentration von 0,1 % unerheblich ist. (Eine Stoffkonzentration von 0,1 % quarzhaltiger Stoffe entspricht dabei einer Konzentration von 2.650 mg/l.)

Noch komplizierter wird es, wenn es sich um Absetzvorgänge in Partikelkollektiven, wie sie in Verkehrsflächenabflüssen vorliegen, handelt. Verkehrsflächenabflüsse sind Vielstoffgemische unterschiedlicher Materialien, Formen, Dichten, Partikelgrößen und Feststoffkonzentrationen. Bei der mathematischen Simulierung von Absetzvorgängen werden oftmals Summenformeln vorgeschlagen, in denen jede einzelne Fraktion für sich betrachtet wird. Hier sind Interaktionen zwischen den Partikeln nicht berücksichtigt. Unter Anwesenheit hoher kohäsiver Feinanteile

---

<sup>3</sup> 1 Vol. % Sand mit einer Dichte von  $2,65 \text{ g/cm}^3$  entspricht einer Konzentration von 26,5 g/l, 1 Vol. % Partikel mit einer Dichte von  $1,5 \text{ g/cm}^3$  entspricht einer Konzentration von 15 g/l.

wie Tonpartikel  $< 2 \mu\text{m}$  kann es aufgrund von chemischen, biologischen oder physikalischen Wechselwirkungen z. B. zu einer Flockung kommen, die durch eine erhöhte Feststoffkonzentration, Intensität und Dauer an Partikelinteraktion zunimmt (Sansalone et al. 2009; Droppo et al. 1997; Hillebrand 2008). Die Absetzbarkeit hängt dabei von der Art der entstandenen Flocke ab: bei Wassereinschluss kann die Absetzgeschwindigkeit so weit sinken, dass die Flocke in Schwebe bleibt. Kompakte Flocken, entstanden insbesondere durch die Zugabe von Chemikalien, sinken mitunter schneller ab als das Primärpartikel (Semadeni-Davies 2009).

Die Absetzbarkeit von Feststoffen in einem Fluid (hier konkret Niederschlagsabflüsse) wird also beeinflusst von

- ▶ der Korngröße,
- ▶ der Dichte des Partikels,
- ▶ der Dichte des Fluids,
- ▶ untergeordnet der Kornform,
- ▶ der Feststoffkonzentration,
- ▶ der Unterschiedlichkeit der Partikelgrößen und -dichten untereinander,
- ▶ der Anwesenheit kohäsiver Feinanteile und der sich daraus ergebenden Flockungsneigung,
- ▶ sowie von der Strömungsgeschwindigkeit bzw. der Reynoldszahl.

Die Absetzwirkung in realen Anlagen ist zusätzlich zu den oben genannten Einflussfaktoren ganz wesentlich

- ▶ vom Anlagendesign

abhängig. Eine Berechnung ist daher nur unter Anpassung einer Vielzahl von (empirisch) zu ermittelnden Faktoren und immer nur für das jeweilige betrachtete System möglich.

Für Aussagen zur Absetzwirkung von Partikeln wurden daher Untersuchungen in Sedimentationssäulen konzipiert, die in den weiteren Kapiteln vorgestellt werden. Die Absetzwirkung ist dabei nicht übertragbar auf reale Anlagen. Das Ziel ist, Sedimentationsphänomene anhand vergleichender Untersuchungen aufzuzeigen und Hinweise für das zu entwickelnde Prüfverfahren zu erhalten.

## 6.2 Untersuchungskonzept

Es wurden unterschiedliche Themenkomplexe zum Absetzverhalten und Handling von Prüfmaterial sowie zum Absetzverhalten im Vergleich zu realen, verkehrsflächenbürtigen Feststoffen bearbeitet.

<b>1 Flockungsneigung - Vergleich Prüfmaterial und reale Partikel</b> •Kapitel 1.4.3.1
<b>2 Stabilität des Prüfmaterials - Einfluss der Kontaktzeit in Wasser</b> •Kapitel 1.4.3.2
<b>3 Partikelgrößenverteilung - Einfluss variierender Zusammensetzung des Prüfmaterials</b> •Kapitel 1.4.3.3
<b>4 Dichte und Organik - Vergleich Prüfmaterial und reale Partikel</b> •Kapitel 1.4.3.4
<b>5 Winterbedingungen - Vergleich Prüfmaterial und reale Partikel</b> •Kapitel 1.4.3.5
<b>6 Einfluss der Konzentration auf die Sinkgeschwindigkeit - Millisil</b> •Kapitel 1.4.3.6

Die Untersuchungen 1 und 2 dienten der Beurteilung der Eignung von Prüfmaterialien. In den Untersuchungen 3 bis 5 wurde das Absetzverhalten von Prüfmaterial im Vergleich zu realen Feststoffen verglichen und zwar zum einen unter konstanten Bedingungen in Wasser hinsichtlich der Feststoffeigenschaften (Dichte, Organik) und unter variierenden Fluidbedingungen z. B. dem Einfluss von Temperatur und Salzen im Winter. In der Untersuchung 6 schließlich wurde der Einfluss der Konzentration des Prüfmehls auf die Sinkgeschwindigkeit getestet.

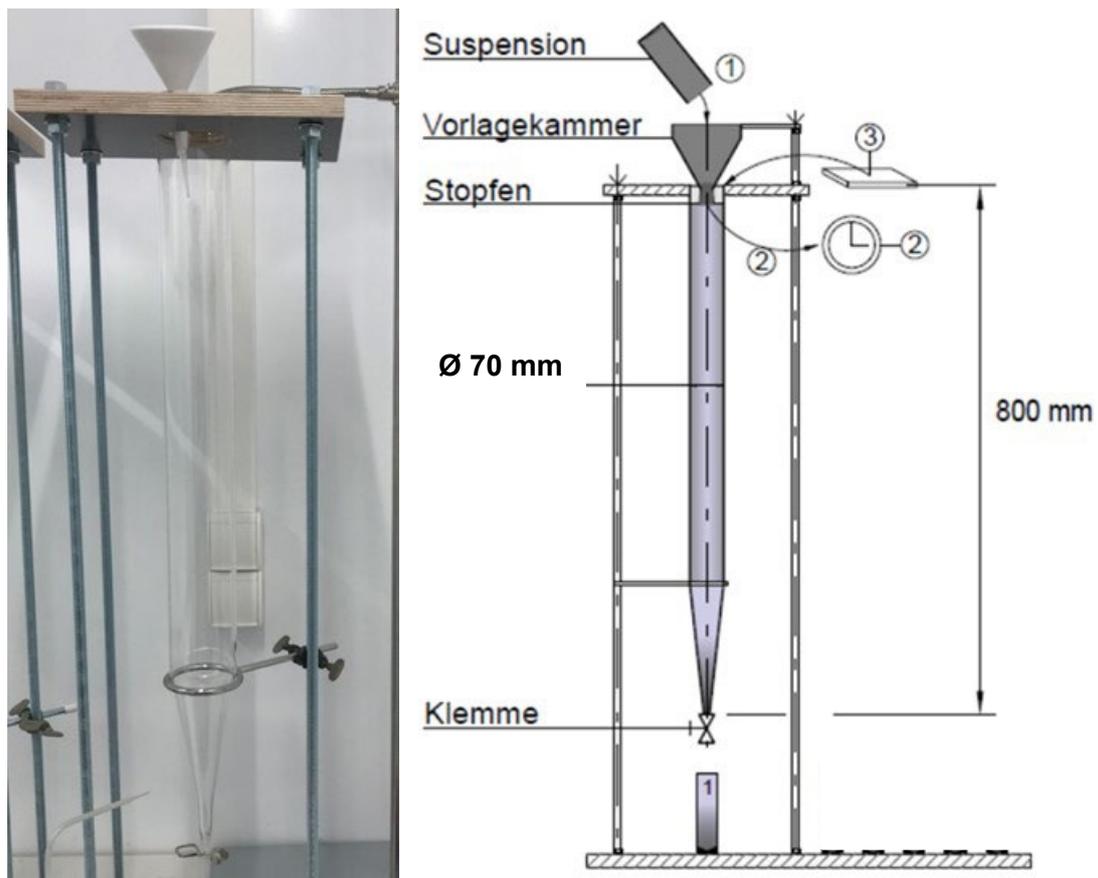
### **6.3 Sedimentationssäulen, Versuchsablauf und Ergebnisdarstellung**

Zur Untersuchung der Sinkgeschwindigkeit verschiedener Materialien und Stäube wurden Sedimentationssäulen im Überschichtungsverfahren nach Brombach et al. (1992) und (Gelhardt 2020) im Labor der Frankfurt UAS für dieses Forschungsvorhaben weiter optimiert. Um Wandeffekte zu minimieren und geringere, realistische Feststoffkonzentrationen zu testen, wurde der Innendurchmesser des aus Glas in einem Stück angefertigten Zylinders von 50 auf 70 mm vergrößert. Dadurch verdoppelte sich das Wasservolumen in der Säule von zuvor knapp 1,3 Liter auf 2,5 Liter (Tabelle 16). Die Höhe der Glassäule ist  $h = 800$  mm, davon trichterförmig  $h_{\text{Trichter}} = 200$  mm bis zu einem Durchmesser von 10 mm (Abbildung 25).

**Tabelle 16: Feststoffkonzentration bei Säulendurchmesser d = 50 und 70 mm**

Säulendurchmesser [mm]	Messprobenmasse (g)	Feststoffkonzentration (g/L)
70	2	0,80
	1	0,40
	0,5	0,20
	0,25	0,10
50	2	1,54
	1	0,77
	0,5	0,39
	0,25	0,19

**Abbildung 25: Sedimentationssäule (Durchmesser 70 mm) in Klimakammer**



Quelle: eigene Darstellung, Frankfurt University of Applied Sciences 2022

Der Versuchsablauf wird nachfolgend beschrieben.

Die Sedimentationssäulen werden analog zum Messkonzept nach (Gelhardt 2020) in einer Klimakammer unter konstanten Temperaturbedingungen (Temperierung in Klimakammer 21 °C;

10 °C; ± 0,1 °C ) mit 2,5 l Wassergefüllt (Abbildung 25). Ein PTFE-Trichter mit Stopfen dient als Vorlagekammer für die Feststoffe, die zum Start des Versuchs geöffnet wird. Die Trichterspitze liegt etwa 20 mm unter der Wasseroberfläche. Das entspricht im Versuchsablauf einer Sinkhöhe von 760 mm. Die Partikel sedimentieren dann als lineare Funktion des Verhältnisses der Sinkhöhe [m] zur Sinkdauer [h] in (m/h). Sie werden am Ende der Sedimentations säule in bestimmten Zeitintervallen über die Klemme entnommen und in Probenröhrchen überführt.

Die abgesetzten Feststoffe in den Probenröhrchen (Sinkgeschwindigkeitsfraktionen) und die verbleibenden Feststoffe in der Säule (Säulenrest) werden analog zur AFS-Bestimmung mit Cellulosenitratfiltern (Sartorius, Typ: 113, Partikelrückhalt: 0,45 µm) filtriert bzw. bei Messungen in entionisiertem Wasser direkt im Probenröhrchen eingedampft. Temperatur, Leitfähigkeit und pH-Wert werden vor und nach dem Versuch bestimmt und dokumentiert.

Als Messvarianten bzw. Zeitpunkte wurden sowohl Langversuche mit Messzeiten von 30 Sekunden bis 4 Stunden als auch Kurzversuche mit nur einer Messzeit von 4 min durchgeführt. Die Messzeit von 4 Minuten entspricht einem Sinkgeschwindigkeitsschnitt von  $v_s \leq 11,3$  m/h und erlaubt eine Einschätzung der gemäß der Stokes'schen Gleichung abgesetzten Partikel mit einer Größe von  $\geq 63$  µm und nicht abgesetzten Partikel mit einer Größe von  $< 63$  µm.

**Tabelle 17: Messzeiten und zugehörige Sinkgeschwindigkeitsschnitte  $v_s$  [m/h]**

Zeit	30 Sek.	1 Min.	2 Min.	4 Min.	8 Min.	16 Min.	32 Min.	1 Std.	2 Std.	4 Std.
$v_s$ [m/h]	90,9	45,3	22,58	11,25	5,61	2,79	1,39	0,74	0,37	0,18

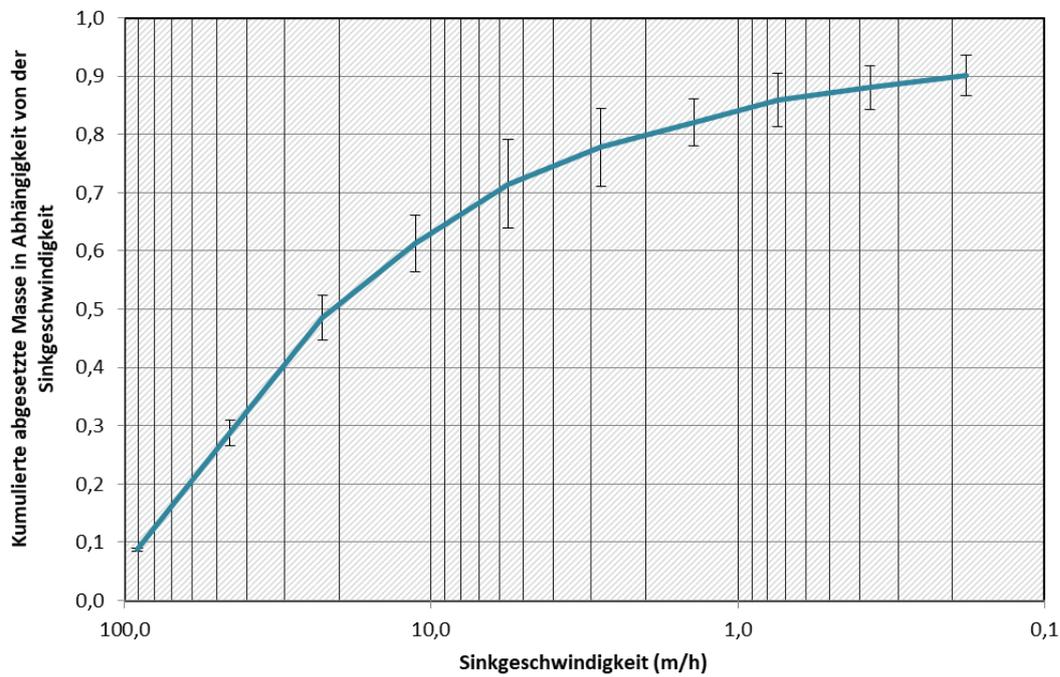
Die beispielhafte Ergebnisdarstellung der Lang- und Kurzversuche wird in Abbildung 26 und Quelle: eigene Darstellung, Frankfurt University of Applied Sciences 2022

Abbildung 27 gezeigt.

Da die Versuche mehrfach durchgeführt werden, überwiegend  $n = 3$ , entspricht der schwarze Strich in der Darstellung der Kurz- und Langversuche jeweils der Standardabweichung überhöht dargestellt mit dem Faktor 1,96 (entsprechend des Wahrscheinlichkeitsbereichs von 95 %).

### Abbildung 26: Ergebnisdarstellung eines „Langversuchs“

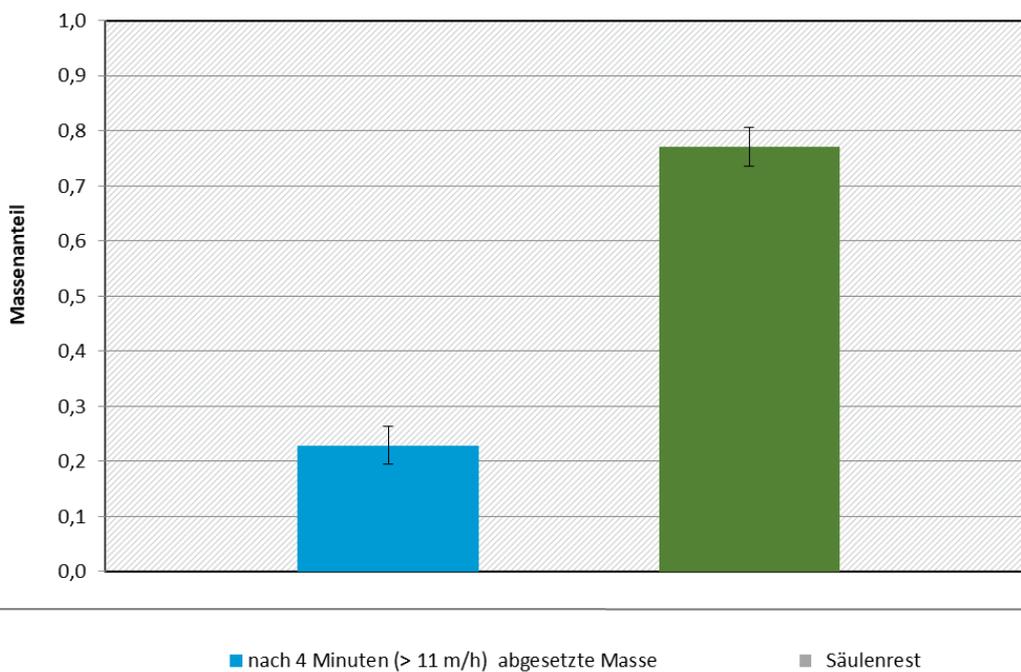
Die in einer bestimmten Zeit abgesetzten Massen werden beim Langversuch als Summenkurve (abgesetzte Masse in Abhängigkeit von der Sinkgeschwindigkeit) dargestellt.



Quelle: eigene Darstellung, Frankfurt University of Applied Sciences 2022

### Abbildung 27: Ergebnisdarstellung eines „Kurzversuchs“

Beim Kurzversuch werden die abgesetzten Massen sowie die sich noch in der Säule befindenden Feststoffe als Massenanteil aufgetragen.



Quelle: eigene Darstellung, Frankfurt University of Applied Sciences 2022

## 6.4 Verwendetes Material

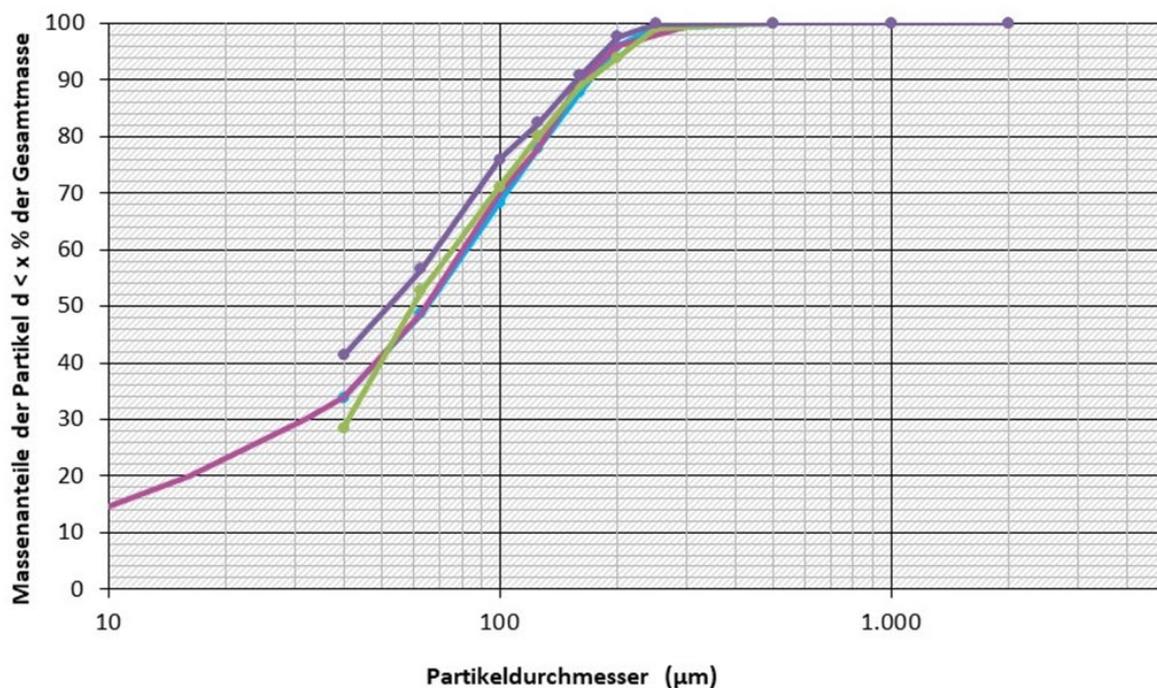
Als Ergebnis der Studie zu kommerziell erhältlichen Materialien stellten sich im Wesentlichen drei inerte Materialien als geeignet für eine reproduzierbare Prüfung von dezentralen Behandlungsanlagen heraus (Tabelle 18), die im Untersuchungskonzept berücksichtigt wurden.

**Tabelle 18: Untersuchte Prüfstoffe**

Prüfstoff	Material	Dichte (g/cm <sup>3</sup> )	Glühverlust (% GV)
Millisil W 4	Quarz	2,65	< 0,1
Silibeads	Kalknatronglas	2,50	<0,1
Bimsmehl	Bims	2,35	4

Silibeads und Bimsmehl zeichnen sich durch eine geringere Dichte im Vergleich zu Millisil aus. Millisil W 4 weist eine Partikelgrößenverteilung im Bereich typischer Abflusszusammensetzungen auf. Auch Bimsmehl wird mit einer ähnlichen PSD (< 250 µm, d<sub>50</sub>: ca. 50-63 µm) geliefert (Abbildung 28).

**Abbildung 28: Partikelgrößenverteilung in Prüfstoffen**



Quelle: eigene Darstellung, Frankfurt University of Applied Sciences 2022

Silibeads sind vom Hersteller in sechs Fraktionen < 250 µm lieferbar (Tabelle 19). Um Abweichungen in der Sollzusammensetzung hinsichtlich der PSD zu vermeiden, wurden alle Materialien in der Zusammensetzung von Millisil W 4 (hier als PSD250<sub>Millisil</sub> bezeichnet) und in einer feinen Zusammensetzung mit Anteilen < 63 µm (PSD63) zusammengesetzt (Tabelle 20).

**Tabelle 19: Fraktionen des gelieferten Silibeads und Zusammensetzung als Prüfstoff**

Herstellerfraktion Silibeads (µm)	Einwaage für Prüfstoffmischung (g)
0-50	35
40-70	20
70-110	15
90-150	15
100-200	5
150-250	10
<b>Summe</b>	<b>100</b>

Um Unterschiede der Absetzwirkung von realen Straßenabflussfeststoffen zu quarzhaltigen Feststoffen zu zeigen, wurden Versuche mit fraktionierten Straßenstäuben durchgeführt. Die gewählten Straßenstäube stammen aus vier Standorten in Frankfurt am Main, die sich durch eine unterschiedliche Verkehrsstärke (durchschnittliche tägliche Verkehrsbelastung (DTV)) sowie durch einen unterschiedlichen Vegetationsgrad am Standort auszeichnen. Die DTV gilt als Indikator für Schadstoffe und Mikroplastik in Form von Reifen- und Bitumenabrieb im Abfluss, die Vegetation ist ein weiterer Eintragspfad organischer Feststoffe. Alle Fahrbahnen sind aus Asphalt und die Bordsteine aus Betonplatten (0,25 m Breite) gefertigt. Somit werden die Eigenschaften der Straße als konstant und vergleichbar angesehen. Die Standorte sind in umfassenden, langjährigen Untersuchungen beprobt worden und stellen sich als charakteristisch für urbane Gebiete heraus (Gelhardt 2020).

**Tabelle 20: Probenzusammensetzung für Absetzversuche**

Siebfraction (µm)	PSD250 <sub>Millisil</sub> - Massenanteil (%)	PSD63 - Massenanteil (%)
200-250	4	
160-200	6	
125-160	12	
100-125	8	
63-100	21	
40-63	15	50
< 40	34	50

Die durchschnittliche tägliche Verkehrsstärke (DTV) variiert an den Standorten zwischen 150 und 27.000 Fahrzeugen pro Tag. Die DTV-Daten wurden von den städtischen Behörden bereitgestellt (Preisung 2018). Die Vegetation wurde über die Baumkronenbedeckung (BKÜ) in Prozent der Probenahmestelle, die direkt von einer Baumkrone innerhalb von 5,0 m um die Probenahmestelle bedeckt ist, bewertet. Der Baumkronenüberdeckungsgrad (BKÜ) wurde mit Hilfe kommunaler Baumkronen-Geodaten (Baumkataster-Frankfurt 2021) ermittelt und als direkter Einfluss der Vegetation gewertet. Die Vegetation innerhalb der zehnfachen Entfernung (50,0 m) von der Probenahmestelle wurde als indirekter Einfluss qualitativ bewertet, da erwartet wird,

dass organische Bestandteile durch Wind bis zur Probenahmestelle transportiert werden können. Sie wurde mit Hilfe des Geodaten-Baumkatasters sowie durch Begehungen geschätzt und in die Kategorien: kein (keine Bäume), geringer (bis 20 % Baumbedeckung), mäßiger (bis 50 % Baumbedeckung) und hoher Vegetationsgrad (mehr als 50 % Baumbedeckung) eingeteilt.

**Tabelle 21: Standortübersicht und Probenahmedatum**

Standort	Koordinaten	DTV (Kfz/24h)	Vegetation	BKÜ (%)	Einzugsgebiet	Probenahme
Nibelungenallee (NIB)	50°07'47.5"N 8°41'25.7"E	27.000	Mäßig	30	Einfallstraße, Gewerbe-/Wohngebiet	Q4: 12.02.2021 Q1: 31.03.2021
Eckenheimer Landstraße (ECL)	50°07'57.2"N 8°41'03.5"E	13.700	Wenig	15	Einfallstraße, Kreuzung Tram, Gewerbe-/Wohngebiet	Q4: 12.02.2021 Q1: 14.04.2021
Brahmsstraße (BRS)	50°07'47.2"N 8°41'16.7"E	700	Keine	0	Wohngebiet	Q4: 12.02.2021 Q1: 31.03.2021
Frauensteinstraße (FRS)	50°07'51.1"N 8°40'47.7"E	150	Hoch	50	Wohngebiet	Q4: 12.02.2021 Q1: 14.04.2021

\*BKÜ = Baumkronenüberdeckungsgrad im Abstand von 5 m um die Probenahmestelle

Je Standort wurde eine Probe im Winter ohne Vegetation (Februar 2021; Q4) und eine Probe im Frühjahr während der Vegetationsperiode entnommen (März/April 2021; Q1).

Probenahmen wurden nach mindestens einem Trockentag vorgenommen. Feststoffproben wurden jeweils auf konstanter Straßenbreite in der Rinne der beschriebenen Standorte gewonnen (0,25 m ab Bordsteinkante). Hierzu wurden fixierte Feststoffe mit einem Pinsel gelockert und mit einem portablen Trockensauger (Dewalt DCV582, 18V Akku) abgesaugt. Die Probennahme wurde durch Wiederfindungsversuche im Labor bestätigt (Gelhardt 2020). Die Feststoffproben wurden unmittelbar nach der Probenahme ins Labor gebracht und bei  $105 \pm 2$  °C (Trockenschrank, Memmert UM 500) bis zur Massenkonstanz getrocknet. Zur Entnahme gleicher, repräsentativer Teiprobe wurde ein Riffelteiler (Retsch RT 6.5) eingesetzt. Die Feststoffproben und Prüfstoffe wurden in einem kombinierten Trocken- und Nasssiebungsverfahren nach Gelhardt (2020) in zehn Siebfraktionen klassiert (< 40, 40-63, 63-100, 100-125, 125-160, 160-200, 200-250, 250-500, 500-1.000 und 1.000-2.000 µm). Die Siebfraktionen < 250 µm wurden anschließend genutzt, um sie für die Sedimentationsversuche analog der Korngrößenverteilung des Prüfmateri als sowie zu einem feineren Prüfmateri al < 63 µm zusammenzusetzen.

In den einzelnen Siebfraktionen der Straßenstäube wurden die Dichte und der Glühverlust bestimmt, sodass diese Kenngrößen in den Messproben PSD250<sub>Millisil</sub> und PSD63 rechnerisch gewichtet mit den jeweiligen Massenanteilen in der Probe ermittelt werden konnten. Die Dichte wurde mittels Gaspymeter (Quantachrome Microultrapyc 1200 eT) nach DIN 66137-2 (2019) und der Glühverlust im Muffelofen (Nabertherm L15/11 B410) bei 550 °C nach DIN EN 15169 (2007) bestimmt.

Die acht Proben unterscheiden sich hinsichtlich ihrer Dichte (2,15 - 2,58 g/cm<sup>3</sup>) und ihrer organischen Anteile (7,4 - 28,0 % GV) deutlich von Millisil (Tabelle 22).

**Tabelle 22: Dichte und organische Anteile in den Staubproben**

Material	PSD250 <sub>Millisil</sub>		PSD63	
	Glühverlust (% GV)	Dichte (g/cm <sup>3</sup> )	Glühverlust (% GV)	Dichte (g/cm <sup>3</sup> )
Millisil W 4	< 0,1	2,65	< 0,1	2,65
BRS Q1	10,9	2,50		
BRS Q4	7,4	2,58	8,2	2,58
ECL Q1	17,4	2,33		
ECL Q4	18,3	2,33	18,5	2,35
FRS Q1	28,0	2,15		
FRS Q4	23,6	2,18		
NIB Q1	14,4	2,41		
NIB Q4	8,9	2,52		

## 6.5 Ergebnisse und Diskussion

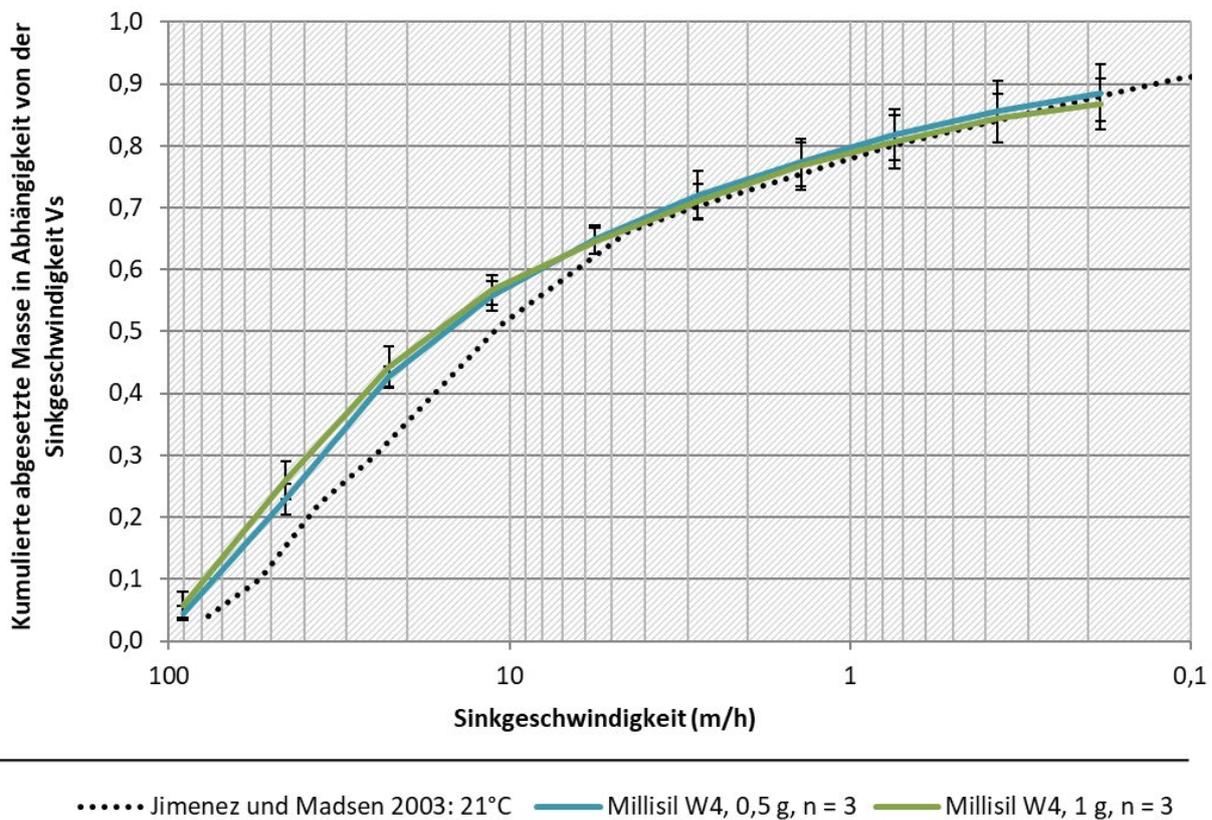
### 6.5.1 Überprüfung der Versuchsanordnung

In Vorversuchen wurde zunächst die Eignung der Versuchsanordnung zur Darstellung der Sinkgeschwindigkeit von Partikeln untersucht. Hierzu wurde das gewählte Versuchsssetup mit Quarzmaterial (Millisil W 4) in zwei Konzentrationen (200 und 400 mg/l; 0,5 und 1,0 g Messprobe) je dreimal durchgeführt. Die Ergebnisse wurden zusammen mit einer semiempirischen Formel für die Sedimentation von Sand von (Jiménez und Madsen 2003) berechneten Kurve, vgl. auch Kap. 6.1, als Durchgangssummenkurve dargestellt (Abbildung 29).

Die Versuche liegen im gleichen sich überlagernden Bereich (dargestellt durch die „Fähnchen“ der Standardabweichung). Die Partikelschar sinkt zu Beginn der Versuche etwas schneller als errechnet ab, was mit dem Überschichtungsprinzip der Sedimentationsapparatur erklärt werden kann. Zu Versuchsbeginn liegt der Partikelschwarm hochkonzentriert oben in der Säule vor. Die entstehende Dichteströmung sorgt für eine Beschleunigung der Sedimentation. Dies ist für das Verfahren bekannt (Lucas-Aiguier et al. 1998). Unterhalb einer Sinkgeschwindigkeit von 11,0 m/h, die wesentlich für die Beurteilung der Absetzwirksamkeit von Partikeln < 63 µm ist, liegt die Summe der abgesetzten Masse jedoch jeweils wieder im Bereich der theoretischen Annahmen und erlaubt daher eine zutreffende Interpretation der Absetzwirksamkeit gerade von kleineren Partikeln. Im Bereich höherer Absetzgeschwindigkeiten lässt die Versuchsanordnung darüber hinaus Interpretationen der Absetzeigenschaften im relativen Vergleich zu.

**Abbildung 29: Durchgangssummenkurve abgesetzter Massen in Abhängigkeit von der Sinkgeschwindigkeit  $v_s$  (m/h)**

für Millisil W 4 (0,5 g und 1 g Messprobe) in Sinkgeschwindigkeitsapparatur mit  $d = 70$  mm Innendurchmesser (modifiziert nach Gelhardt 2020) sowie semiempirische Sinkgeschwindigkeit der Partikel nach Jimenez und Madsen (2003)



Quelle: eigene Darstellung, Frankfurt University of Applied Sciences 2022

## 6.5.2 Einfluss einer möglichen Flockung bzw. Dispergierung

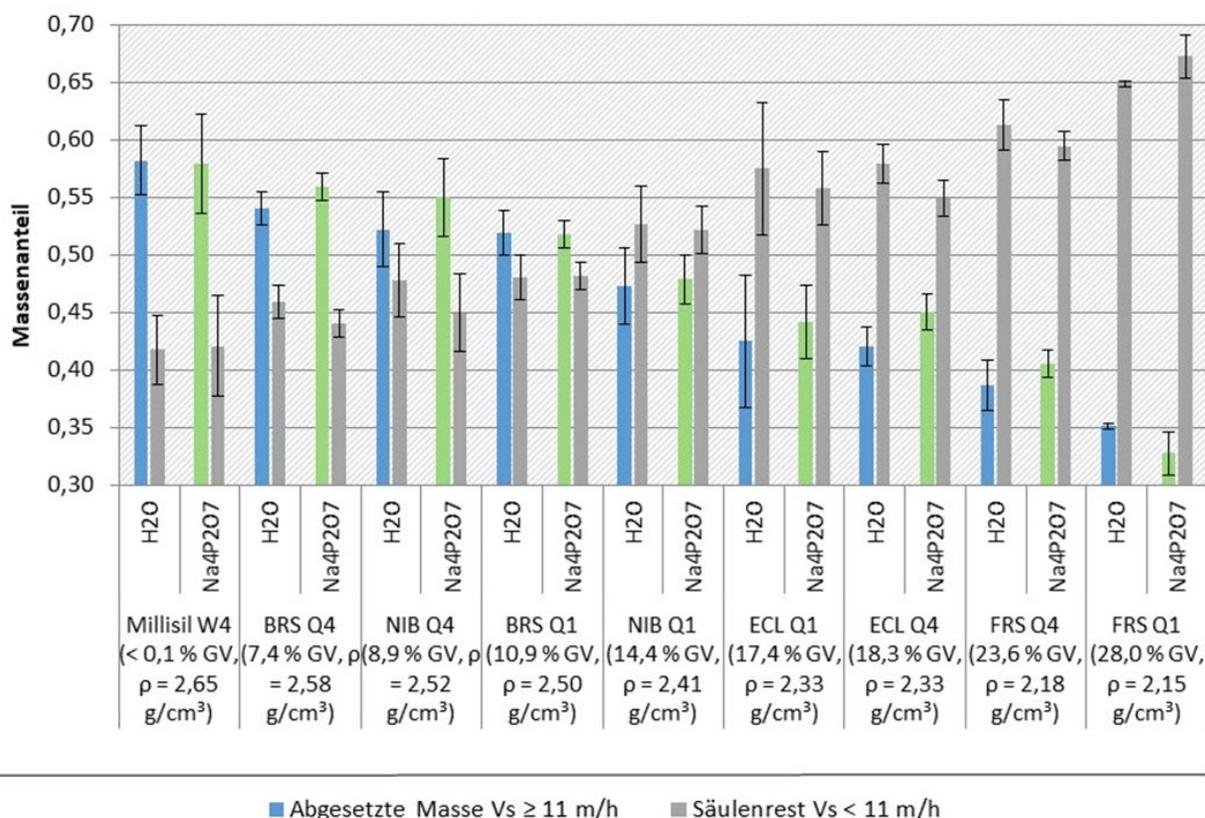
Partikel, insbesondere feinste, kohäsive Anteile, die in hoher Konzentration und Intensität aufeinandertreffen, haben die Neigung aufgrund von chemischen, biologischen oder physikalischen Wechselwirkungen zu flocken (Droppo et al. 1997; Sansalone et al. 2009; Hillebrand 2008). Die Flockungsneigung der Materialien wurde in Wasser und im Gegenzug dazu mittels Dispersionsmittel untersucht. Damit sollte untersucht werden, ob reale Partikel sich möglicherweise anders verhalten als das inerte Prüfmehl Millisil und ob eine Flockungsneigung bei der Bewertung des Rückhaltes mit betrachtet werden muss.

Es wurden Versuche mit Millisil W 4 und acht realen Feststoffproben von vier Standorten und zwei Jahreszeiten (Winter = Q4, Frühjahr = Q1) einer PSD250<sub>Millisil</sub> durchgeführt. Insbesondere die feinsten Anteile haben die Neigung potentiell zu flocken, ohne von größeren Partikeln aufgebrochen zu werden. Daher wurden weitere Versuche mit Materialien  $< 63 \mu\text{m}$  (PSD63) durchgeführt. Alle Versuche wurden als Kurzversuche mit einem Sinkgeschwindigkeitsschnitt bei 11,0 m/h durchgeführt (Abbildung 30).

).

**Abbildung 30: Anteile an abgesetzter und nicht abgesetzter Masse nach 4 min ( $v_s \geq$  und  $< 11,0$  m/h) für Millisil W 4 und reale Feststoffe (PSD250<sub>Millisil</sub>) (BRS, NIB, ECL und FRS Q1 und Q4, 2021)**

je 0,5 g Material, in Wasser (H<sub>2</sub>O) und Dispersionsmittel (2 g/L Na<sub>2</sub>P<sub>4</sub>O<sub>7</sub>); n = 3; 1,96 · Standardabweichung



Quelle: eigene Darstellung, Frankfurt University of Applied Sciences 2022

Das Absetzverhalten der Materialien ist mit zunehmendem Glühverlust von links nach rechts paarweise in H<sub>2</sub>O (blau) und Dispersionsmittel (2,0 g/L Na<sub>2</sub>P<sub>4</sub>O<sub>7</sub>, grün) abgebildet.

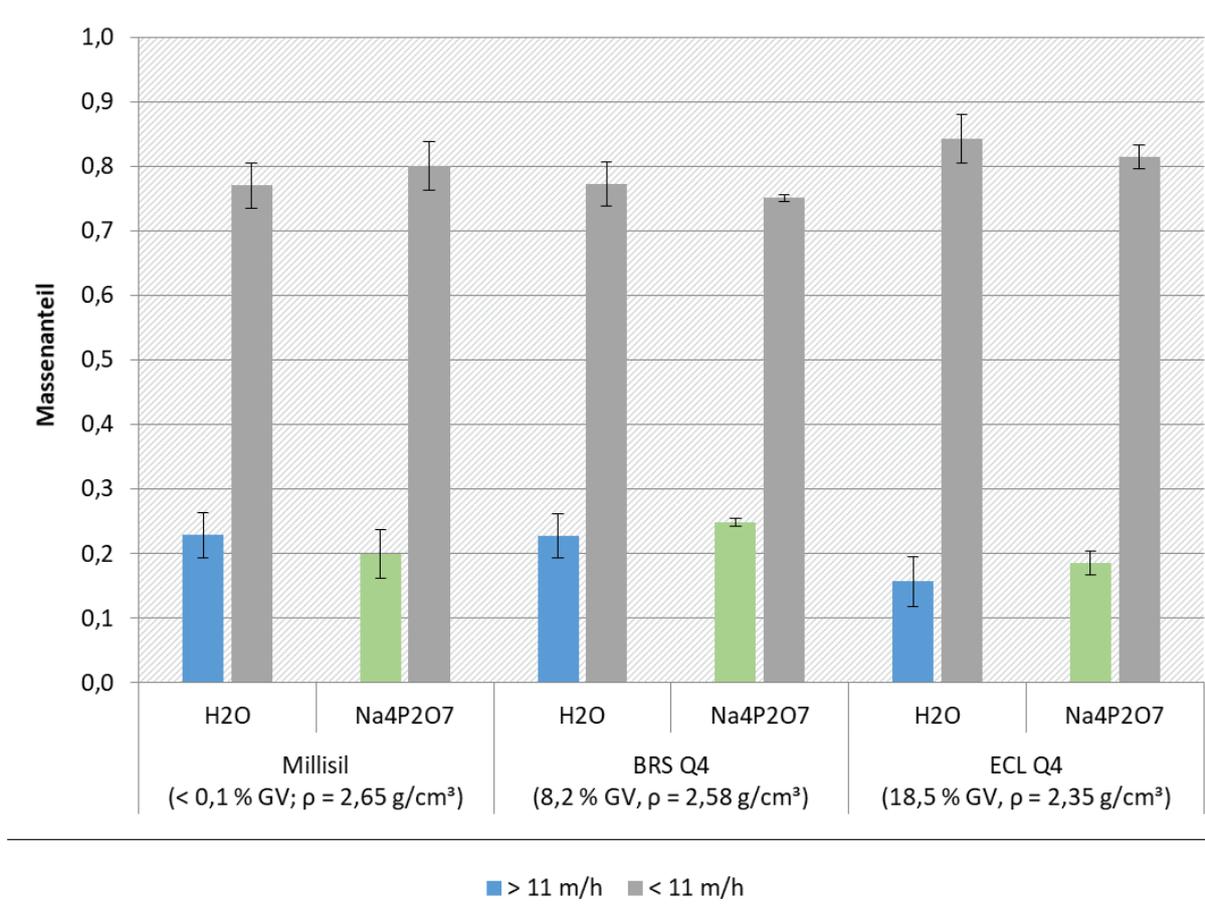
Die Absetzbarkeit von Feststoffen in reinem Wasser und mit Dispersionsmittel versetztem Wasser unterscheidet sich demnach nicht signifikant. Daraus lässt sich ableiten, dass weder das Prüfmaterial noch reale Partikel unter den gegebenen Versuchsbedingungen eine starke Flockungsneigung aufweisen.

### PSD63

Für eine Zusammensetzung im Bereich von  $< 63 \mu\text{m}$  (PSD63; 50 %  $< 40 \mu\text{m}$  / 50 % 40 - 63  $\mu\text{m}$ ) wurden weitere Absetzversuche für Millisil sowie zwei reale Feststoffproben als Kurzversuche durchgeführt. Nach der Theorie von Stokes sollten nach  $t = 4$  min ( $v = 11,0$  m/h) keine Feststoffe dieser Größe sedimentieren. Aus den in Abbildung 31 dargestellten Ergebnissen geht jedoch hervor, dass sich unabhängig vom Material 15-25 % der Partikel nach 4 min ( $\geq 11,0$  m/h) abgesetzt hatten.

**Abbildung 31: Anteile an abgesetzter und nicht abgesetzter Masse nach 4 min ( $v_s \geq$  und  $< 11,0$  m/h) für Millisil sowie reale Feststoffe  $< 63 \mu\text{m}$  (PSD63) (BRS, ECL; Q4 2021)**

je 0,5 g Material, in Wasser (H<sub>2</sub>O) und Dispersionsmittel (2 g/L Na<sub>2</sub>P<sub>4</sub>O<sub>7</sub>); n = 3; 1,96 · Standardabweichung



Quelle: eigene Darstellung, Frankfurt University of Applied Sciences 2022

Dies kann mit dem bereits beschriebenen Überschichtungsverfahren erklärt werden. Einen statistisch signifikanten Unterschied zwischen der Verwendung von Wasser und Dispersionsmittel als Fluid lässt sich unabhängig davon auch für das feine Material PSD63 nicht ableiten. Weitere Überlegungen das Versuchssetup oder das Prüfverfahren betreffend sind daher nicht erforderlich.

### 6.5.3 Stabilität des Prüfmaterials

Drei vorausgewählte Materialien mit unterschiedlichen Dichten wurden bezüglich ihrer Stabilität untersucht (Bismehl ( $\rho = 2,35 \text{ g/cm}^3$ ), Silibeads ( $\rho = 2,5 \text{ g/cm}^3$ ) und Millisil W4 ( $\rho = 2,65 \text{ g/cm}^3$ ), (Abbildung 32). Die Proben wurden dazu in Kontakt mit deionisiertem Wasser gebracht. Die Kontaktzeit wurde variiert von null bis zu 2,5 Stunden. Der Hintergrund dieser Untersuchung war es nachzuweisen, ob sich ein Prüfmaterial stabil verhält oder möglicherweise seine Sedimentationseigenschaften in Kontakt mit dem Fluid über die Zeit verändert.

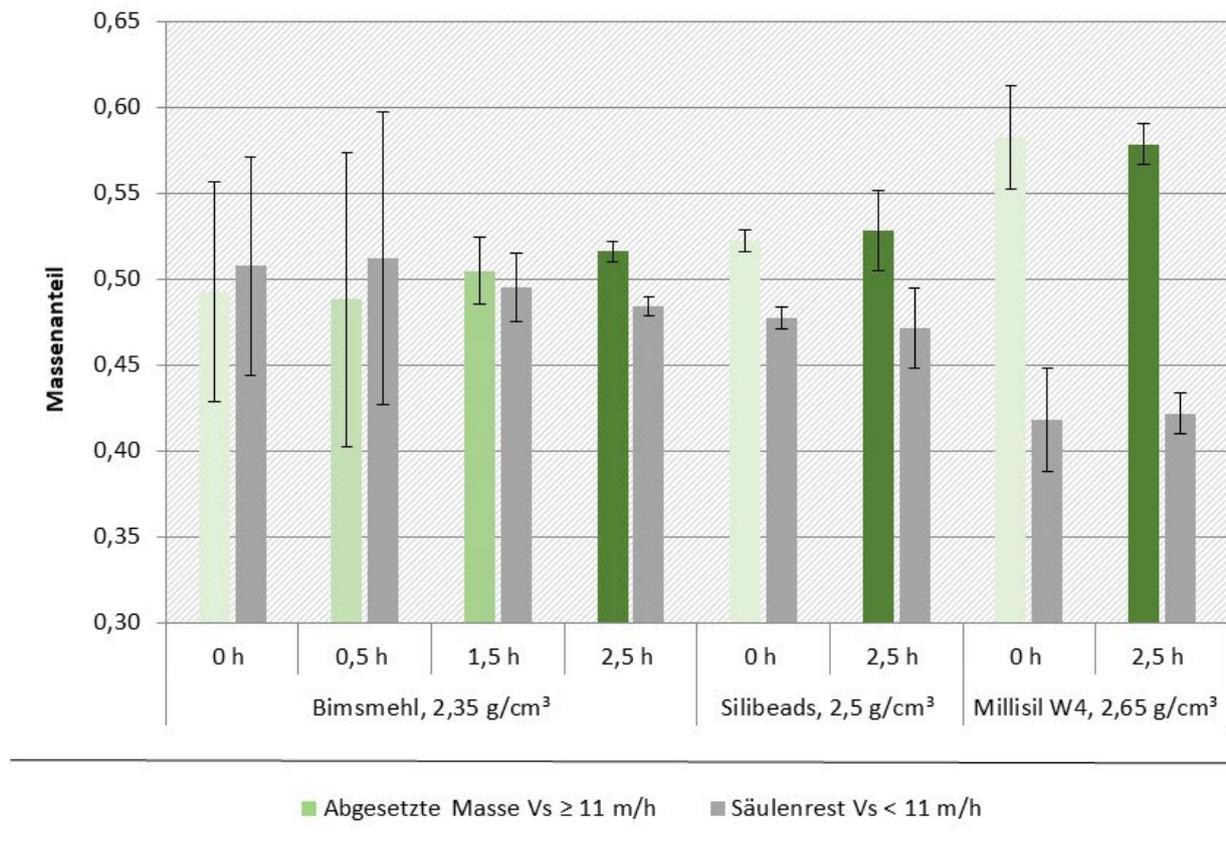
Es zeigte sich, dass sich Bismehl nicht konstant verhält. Es scheint Quelleigenschaften zu unterliegen, die erst nach 1,5 - 2,5 h abgeschlossen sind und sich erst dann konstante Sedimentationsbedingungen einstellen. Das Absetzverhalten von Silibeads und Millisil W 4 dagegen verändert sich nicht wesentlich über die Kontaktzeit im Wasser. Obwohl Bismehl die gewünschte niedrige Dichte aufweist, ist es daher nicht als Prüfstoff geeignet.

Auch die Silibeads weisen eine geringere Dichte und somit schlechteres Absetzverhalten als Millisil auf, was der Absetzwirkung von Feststoffen in realen Straßenabflüssen näherkommt (vgl. Kap. 6.5.5). Silibeads sind allerdings 30fach teurer als Millisil W 4 und müssten vom Hersteller

erst in der in Tabelle 19 angezeigten Mischung hergestellt werden. Außerdem sind die kugelförmigen Materialien deutlich anders geformt als verkehrsflächenbürtige Feststoffe, die besser hinsichtlich ihrer Form durch Millisil W 4 abgedeckt werden können (Rommel et al. 2020). Ein weiterer sicherheitstechnischer Aspekt ist, dass extreme Rutschgefahr herrscht, wenn Silibeads verschüttet werden, was bei Laborversuchen kaum zu vermeiden ist. Auch stellte sich die Siebung im Zuge anderer, hier nicht gezeigter, Untersuchungen als nicht möglich heraus, da sich die Siebe komplett mit dem kugelförmigen Material zusetzten.

**Abbildung 32: Anteile an abgesetzter und nicht abgesetzter Masse nach 4 min ( $v_s \geq$  und  $< 11,0$  m/h) für drei Prüfstoffe Bimsmehl, Silibeads und Millisil W 4 (PSD250<sub>Millisil</sub>)**

variierende Kontaktzeit; n = 3; 1,96 · Standardabweichung



Quelle: eigene Darstellung, Frankfurt University of Applied Sciences 2022

Zusammenfassend wird hinsichtlich eines inerten Verhaltens, der Verfügbarkeit als Prüfmehl, des Handlings sowie der Kosten das Millisil W 4 als Prüfmateriale in diesem Projekt und für das Prüfverfahren empfohlen. Der Einsatz dieses Prüfmateriale ermöglicht zudem den Vergleich mit dem bestehenden Prüfverfahren des DIBt.

#### 6.5.4 Einfluss der Korngrößenverteilung < 250 µm auf den Absetzprozess

Der Hersteller des derzeit in Deutschland überwiegend verwendeten Prüfmehls Millisil W 4 gibt zwar eine Korngrößenverteilung seines Produktes an (Quarzwerte GmbH 2014), diese wich in der Vergangenheit jedoch gelegentlich von der Sollverteilung ab.

Aus diesem Grund wurde überprüft, wie stark die Absetzbarkeit durch Variation des AFS63-Anteils beeinflusst wird. Proben aus zwei Fraktionen Millisil (0 bis 63 µm und 63 bis 250 µm) wurden eingewogen (Tabelle 23), in die Absetzsäule gegeben, eine Probe nach 4 min genommen sowie die Feststoffmasse im Säulenrest bestimmt.

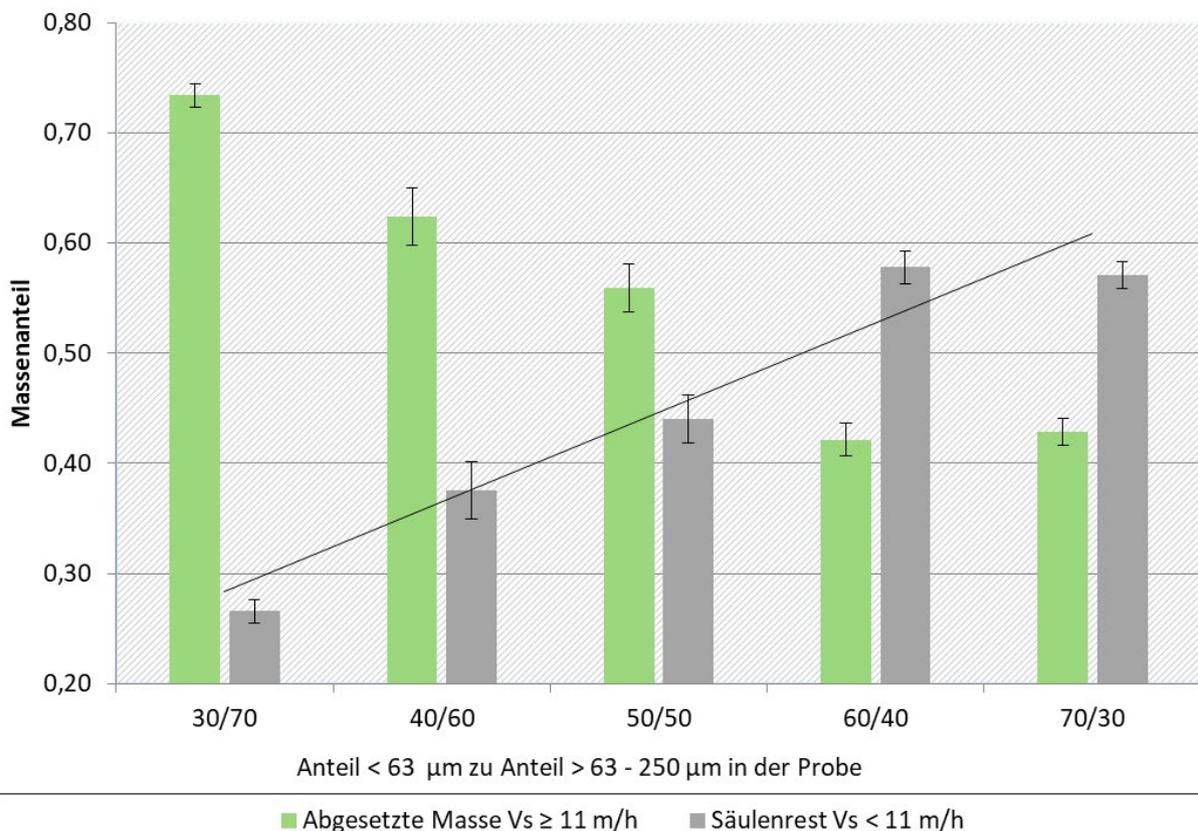
**Tabelle 23: AFS63-Anteile in Vergleichsproben zu je 0,5 g (Angabe Verhältnis: ≥/< 63 µm)**

Fraktion (µm)	Massenanteil (%)				
0 bis 63 µm	30 %	40 %	50 %	60 %	70 %
63 bis 250 µm	70 %	60 %	50 %	40 %	30 %

Das Ergebnis (Abbildung 33), dass der Anteil der abgesetzten Masse nach vier Minuten ( $v \geq 11,0$  m/h (grün)) mit zunehmendem AFS63-Anteil deutlich abnimmt, entspricht den Erwartungen. Das bedeutet, dass bei einer Abweichung des AFS63-Anteils um mehr als 10 % im eingesetzten Prüfmehl im Vergleich zur Soll-Korngrößenverteilung mit statistisch signifikanten Unterschieden in der Sedimentation und damit im Rückhalt in Behandlungsanlagen zu rechnen ist. Die Ergebnisse legen nahe Abweichung vom Sollwert von z. B. maximal 5 % für Laborversuche und Prüfungen zuzulassen.

**Abbildung 33: Anteile an abgesetzter und nicht abgesetzter Masse nach 4 min ( $v_s \geq$  und  $< 11,0$  m/h) für variierende AFS63-Anteile im Prüfmaterail Millisil**

30/70 bedeutet 30 % AFS63; je 0,5 g Material; n = 3; 1,96 · Standardabweichung



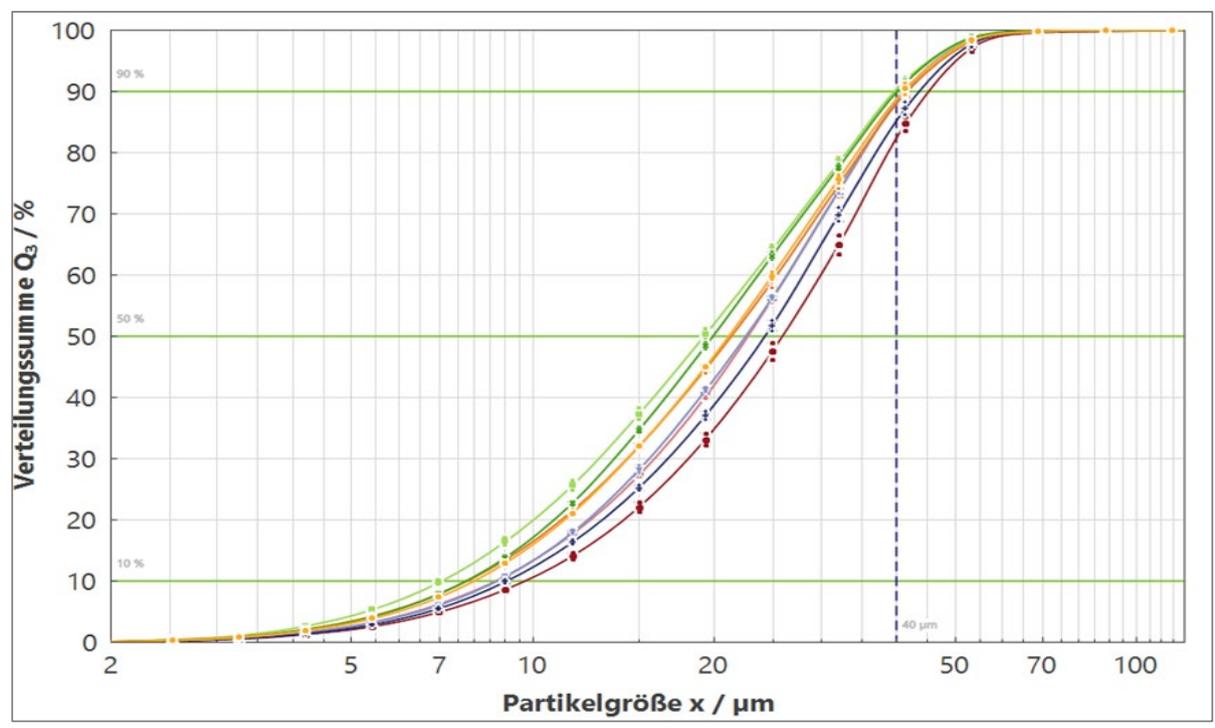
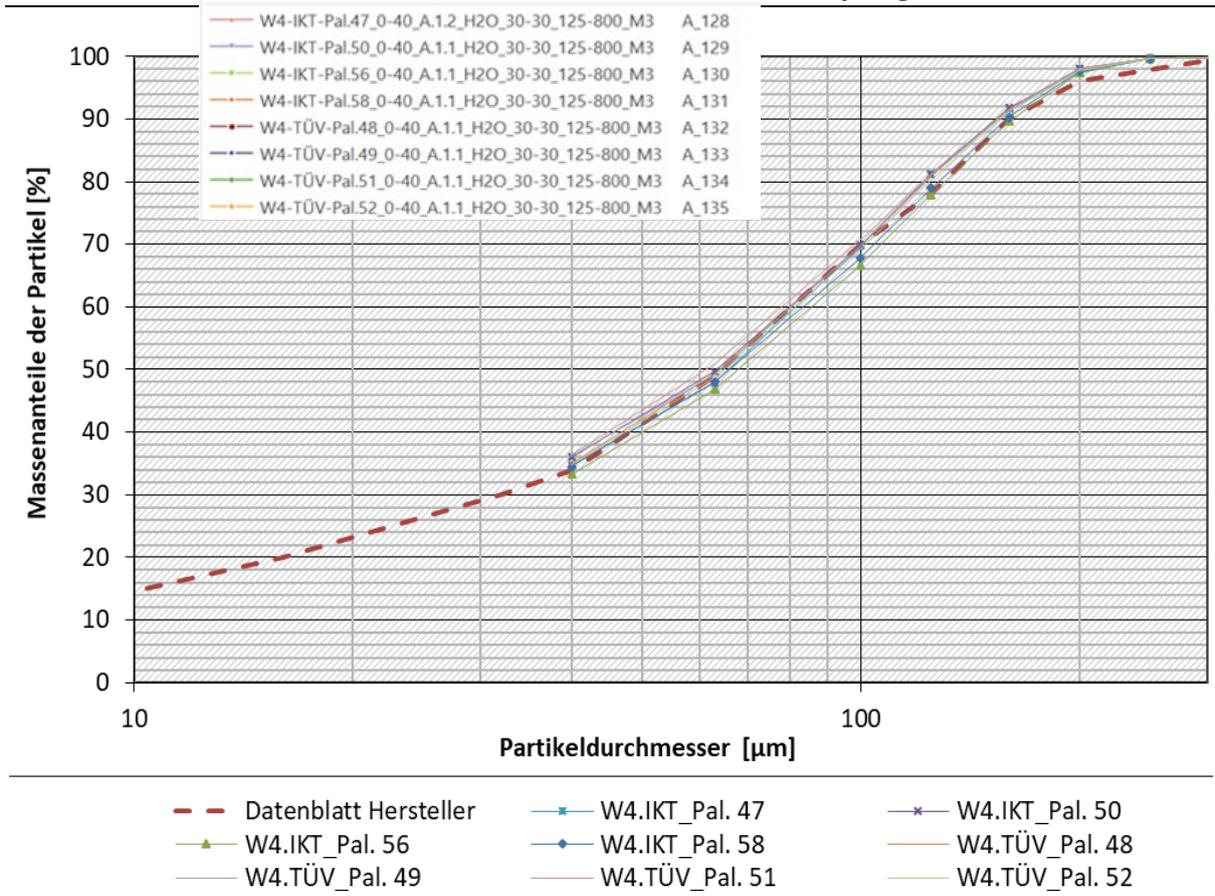
Quelle: eigene Darstellung, Frankfurt University of Applied Sciences 2022

Für das Prüfmehl Millisil W 4 wurden vom Hersteller Quarzwerke in der Zwischenzeit Lösungen gefunden, den Prüfstellen nur Paletten mit Material der gewünschten Sieblinie zu liefern.

Dies zeigt die Abbildung 34, in der die Siebsummenkurven des für dieses Projekt angeschafften Prüfmehls Millisil W 4 auf acht Paletten im Vergleich zur Kurve aus dem Datenblatt des Herstellers aufgetragen sind. Die Sieblinien wurden im August und September 2021 im Wasserprüflabor der FRA UAS erstellt. Der Bereich unterhalb von 40 µm wurde ebenfalls im Wasserprüflabor der FRA UAS mit einer digitalen Bildanalyse (DIA) bestimmt und bestätigt, dass die feinen Anteile ebenfalls im Bereich der Sollverteilung liegen (Partikel mit einer Größe von 20 µm z. B. liegen gemäß DIA etwa zu 50 % in der Probe bis 63 µm vor. Das Datenblatt gibt 23 % in der Gesamtprobe mit einem Anteil von 49 % AFS63 vor).

Das Fazit aus diesen Untersuchungen ist, dass es wesentlich für das Ergebnis eines geprüften Rückhalts ist, eine vorgegebene Korngrößenzusammensetzung für die Laborprüfung einzuhalten und diese vor einer Prüfung auch zu kontrollieren. Dieser Passus sollte in die Prüfgrundsätze übernommen werden.

**Abbildung 34: Siebsummenkurven (bis 300 µm) (oben) und digitale Bildanalyse (bis 40 µm) (unten) des Prüfmaterials Millisil W 4 von acht für dieses Projekt gekaufte Paletten**



Quelle: eigene Darstellung, Frankfurt University of Applied Sciences 2022

### 6.5.5 Einfluss von Dichte und Organik

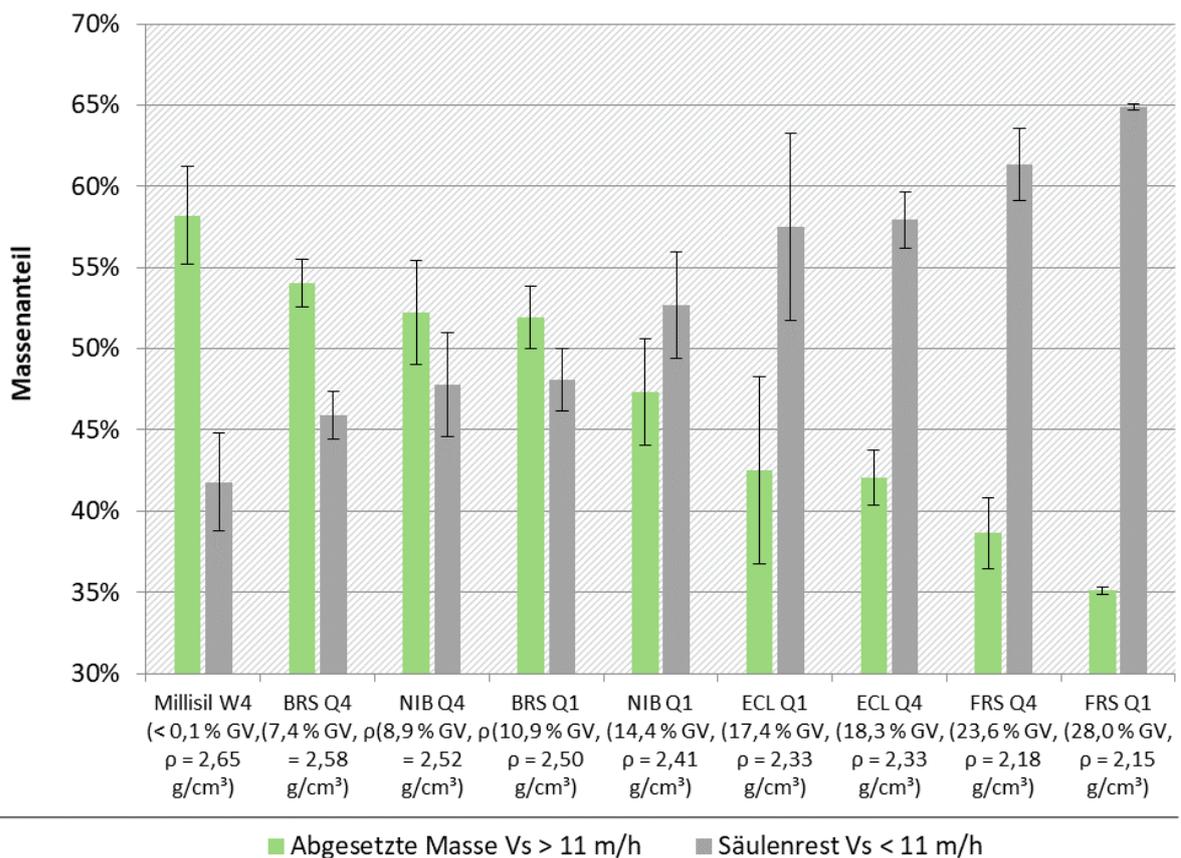
Das Quarzmehl Millisil W 4 wird für weitere Untersuchungen als mineralisches Material für den Vergleich zu realen Staubproben von Verkehrsflächen mit unterschiedlichen Organikanteilen herangezogen.

Die Ergebnisse der Absetzversuche werden in Abbildung 35 vergleichend in paarweisen Balkendiagrammen dargestellt und zwar in aufsteigender Reihenfolge ihrer als Glühverlust bestimmten organischen Anteile.

Erwartungsgemäß sinkt die Absetzbarkeit der Feststoffe mit zunehmendem organischem Anteil respektive abnehmender Dichte. Dieser Zusammenhang zwischen organischem Anteil in der Messprobe und dem Absetzverhalten ist mit einem hohen Bestimmtheitsmaß der Linearität von ( $R^2 = 0,975$ ) statistisch signifikant. Dies ist aus dem Auftrag der abgesetzten Masse in Abhängigkeit des Glühverlustes in der Messprobe in Abbildung 36 dargestellt.

**Abbildung 35: Anteile an abgesetzter und nicht abgesetzter Masse nach 4 min ( $v_s \geq$  und  $< 11,0$  m/h) für Millisil W 4 und reale Feststoffe (PSD250<sub>Millisil</sub>) (BRS, NIB, ECL und FRS Q1 und Q4, 2021)**

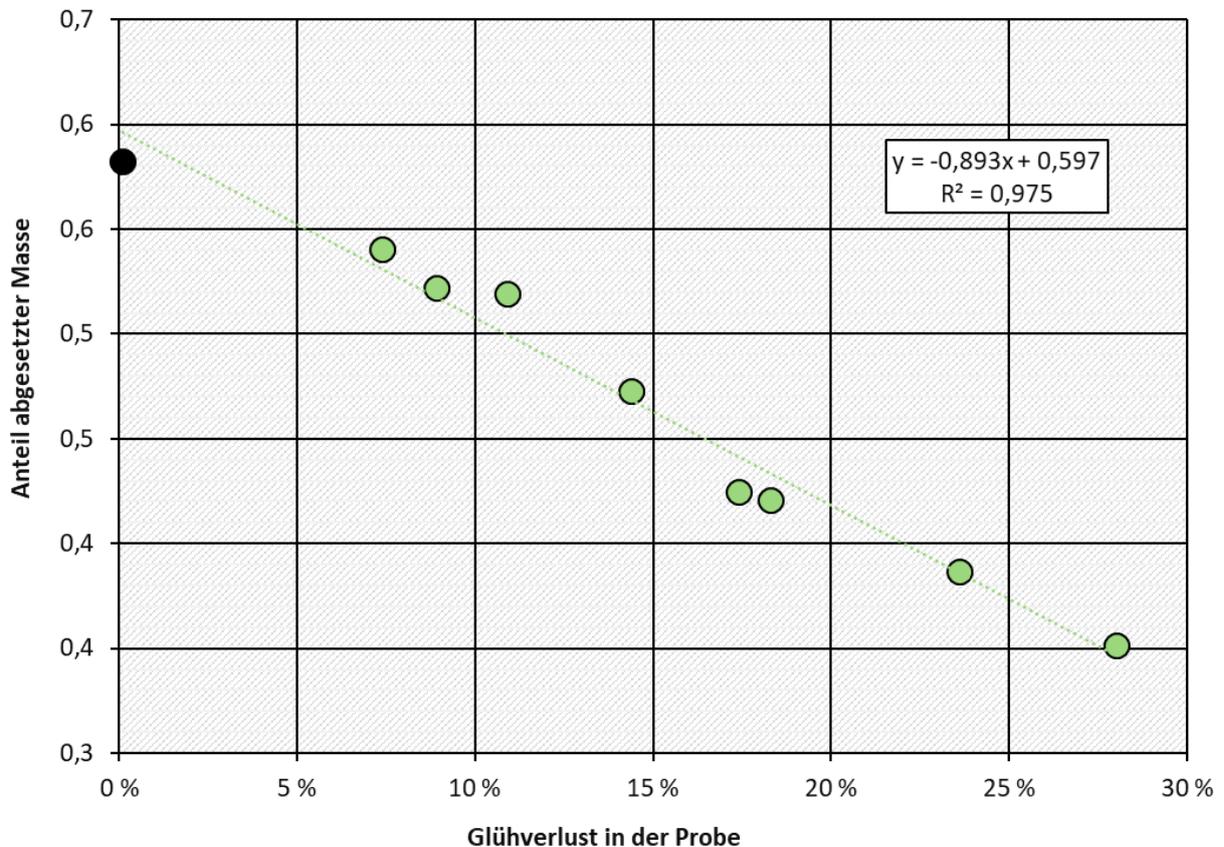
Fluid: H<sub>2</sub>O; je 0,5 g Material; n = 3; 1,96 · Standardabweichung



Quelle: eigene Darstellung, Frankfurt University of Applied Sciences 2022

**Abbildung 36: Anteil abgesetzter Masse nach 4 min ( $\geq 11,0$  m/h) in Abhängigkeit vom Glühverlust der Messprobe (PSD250Millisil)**

Fluid: H<sub>2</sub>O. Grüne Punkte: acht reale Stäube. Schwarzer Punkt: Millisil W 4, lineare Regressionsgerade



Quelle: eigene Darstellung, Frankfurt University of Applied Sciences 2022

Die Absetzwirkung in den Säulen bei den Proben mit einem Glühverlust von 28 % liegt trotz gleicher Korngrößenverteilung mit 35 % abgesetzter Masse nur bei 60 % der Absetzwirkung von Millisil (58 %).

Schon länger wird diskutiert, dass Anlagen, die in situ beprobt wurden, eine geringere Wirksamkeit aufweisen als im Labor mit Millisil geprüfte Anlagen.

Ein Ansatzpunkt in der Bewertung von Laborversuchen könnte ein Faktor sein, der den fehlenden organischen Anteil bei der Prüfung berücksichtigt. Ob dieser Unterschied tatsächlich auf Anlagen in der Realität übertragen werden kann, bleibt jedoch offen, da wie in Kap. 6.1 dargelegt, möglicherweise ein Unterschied der Absetzbarkeit in ruhenden Fluiden (Absetzlaborsäule) im Vergleich zu Anlagen mit turbulenten Bereichen, zumindest aber mit einer geringen Strömung, besteht. Diese Untersuchung ist in diesem Forschungsprojekt nicht zu leisten, soll aber dazu anregen, eine solche Untersuchung systematisch z. B. an einer sehr kleinen Modellanlage zu konzipieren und durchzuführen. Die Durchführung an einer realen Anlage wird nicht möglich sein, da das Erzeugen von Prüfmaterial aus Straßenstäuben in der erforderlichen Größenordnung (z. B. 25 kg je Prüfung) nicht leistbar ist.

Bei den Untersuchungen zum Sinkverhalten der Stäube in Abhängigkeit von der Konzentration zeigte sich jedoch auch, dass der Unterschied der abgesetzten Masse zwischen Millisil und einem realen Staub mit einem Glühverlust von 25 % bei der hier in diesem Kapitel gezeigten Sinkgeschwindigkeit von 11 m/h ( $t = 4$  min) am größten war, dieser Unterschied sich jedoch bei einer

längeren Aufenthaltszeit von 16 min wieder aufhob, siehe Kap. 6.5.7, Abbildung 40. Nach vier Stunden Absetzzeit (Sinkgeschwindigkeit von 0,18 m/h) war tendenziell jeweils vom leichteren Staub mit einem GV von 25,1 % weniger Masse in den Säulen verblieben als vom mineralischen Millisil. Mit einer genügend großen Aufenthaltszeit haben demnach auch leichtere Partikel die Möglichkeit zu sedimentieren.

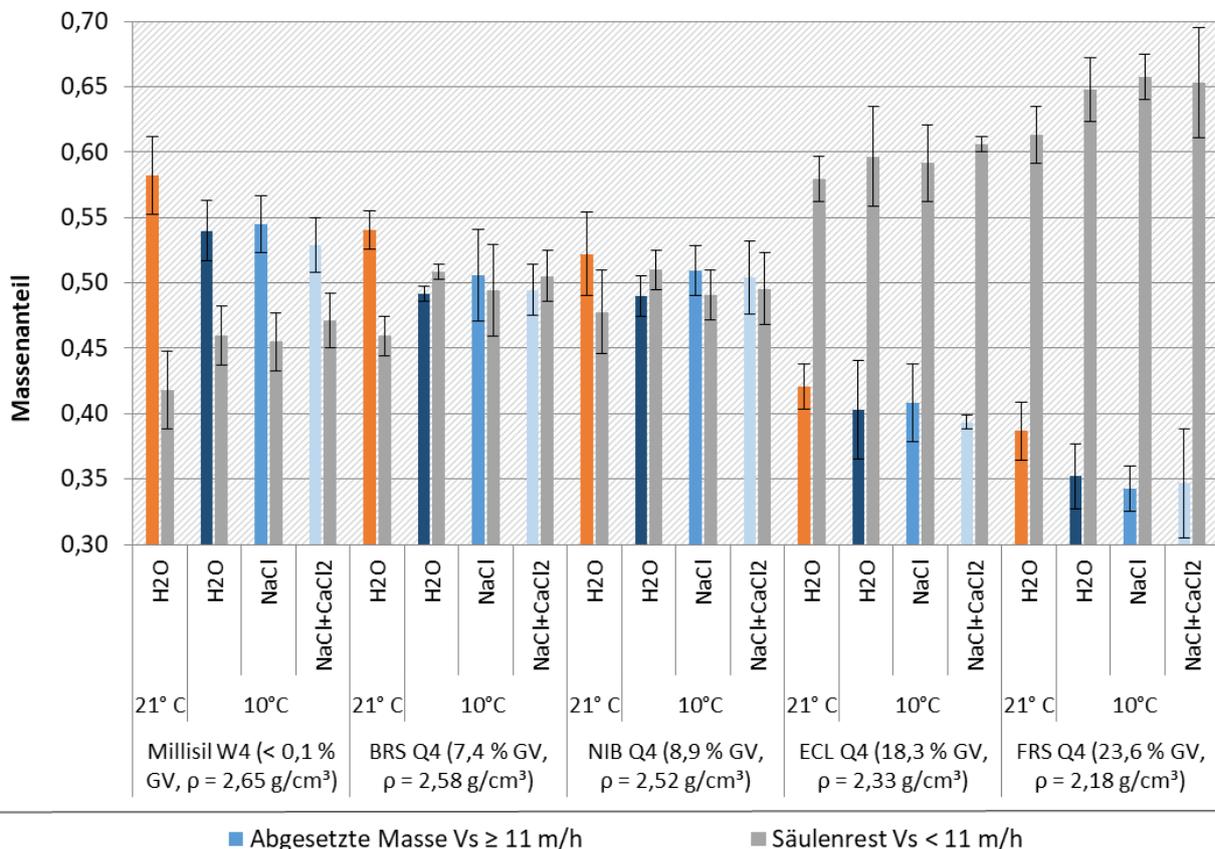
Weitere Untersuchungen zum Absetzverhalten von Millisil und Stäuben mit einem Glühverlust von 14 % bis 28 % werden in Zusammenhang mit der Prüfung der Anlage A in Kap. 8.1 gezeigt.

### 6.5.6 Einfluss von Bedingungen im Winter durch Salzstreuung und geringer Temperatur

Im Winter steigt die Dichte in Niederschlagsabflüssen aufgrund einer geringeren Temperatur und dem Einfluss von gelöstem Streusalz im Wasser. Dadurch wird von einer verminderten Sedimentationsleistung in Behandlungsanlagen ausgegangen (Rommel und Helmreich 2018). Hierzu wurden zwei Temperaturstufen (21 °C und 10 °C) sowie drei Fluide (reines Wasser H<sub>2</sub>O, 10 g/l NaCl und 10 g/l NaCl + 2,5 g/l CaCl<sub>2</sub>) vergleichend für Millisil W 4 und vier Staubproben mit unterschiedlichen Glühverlusten bzw. Dichten untersucht (Abbildung 37). Die Salzkonzentrationen wurden aus Auswertungen von Huber et al. (2015) für im Straßenabfluss mögliche Tausalzaufkommen gewählt. Die Dichten im Fluid wurden mittels Fluidpyknometer bestimmt (Tabelle 24).

**Abbildung 37: Anteile an abgesetzter und nicht abgesetzter Masse nach 4 min ( $v_s \geq$  und  $< 11,0$  m/h) für Millisil W 4 und reale Feststoffe (PSD<sub>250</sub><sup>Millisil</sup>) aus dem Winter (BRS, NIB, ECL und FRS Q4, 2021)**

je 0,5 g Material, mit variierenden Temperaturen (21 °C, 10 °C) und Salzkonzentrationen (H<sub>2</sub>O, 10 g/L NaCl, 10 g/L NaCl + 2,5 g/L CaCl<sub>2</sub>); n = 3; 1,96 · Standardabweichung



Quelle: eigene Darstellung, Frankfurt University of Applied Sciences 2022

**Tabelle 24: Fluiddichte (entionisiertes Wasser, H<sub>2</sub>O; Salzlösung) (eigene Messung mit Fluidpyknometer)**

Fluid	Dichte (g/cm <sup>3</sup> )
H <sub>2</sub> O, 21 °C	0,997
H <sub>2</sub> O, 10 °C	0,999
10 g/L NaCl, 10 °C	1,007
10 g/L NaCl+ 2,5 g/L CaCl <sub>2</sub> , 10 °C	1,008

Bei 21 °C (Raumtemperatur, orangefarbene Balken) ist noch einmal deutlich die reduzierte Absetzbarkeit der Feststoffe (von 58 % bei  $\rho = 2,65 \text{ g/cm}^3$  auf 38 % bei  $\rho = 2,18 \text{ g/cm}^3$ ) mit zunehmenden organischen Anteilen respektive abnehmenden Dichten nach 4 min zu erkennen, wie bereits im Kapitel zuvor diskutiert wurde.

Die Reduktion der Fluidtemperatur von 21 °C (orangefarbene Balken) auf 10 °C (dunkelblaue Balken) führt ebenfalls für alle Proben zu einer signifikanten Reduzierung der abgesetzten Anteile.

Gelöste Salzbestandteile in üblich verwendeten Konzentrationen, die eine geringfügige Erhöhung der Dichte im Fluid verursachen, zeigten allerdings keine statistisch signifikanten Unterschiede des Absetzverhaltens bei gleicher Temperatur in den Laborsäulen (blaue Balken im Vergleich).

Bei vergleichenden Untersuchungen zum Einfluss von Temperatur und Salz auf die Sinkgeschwindigkeit von Feststoffen aus Verkehrsflächen wurde bereits gezeigt, dass insbesondere die Temperatur mit Absenkung der Dichte im Fluid einen Einfluss auf die Absetzbarkeit der Partikel hat (Rommel et al. 2020).

Als verantwortlich für eine geringere Absetzbarkeit der Partikel in realen Behandlungsanlagen, werden Salzsichtungen durch Dichteströme der Fluide vermutet. Dieses Phänomen konnte in der Laborsäule nicht nachgestellt werden.

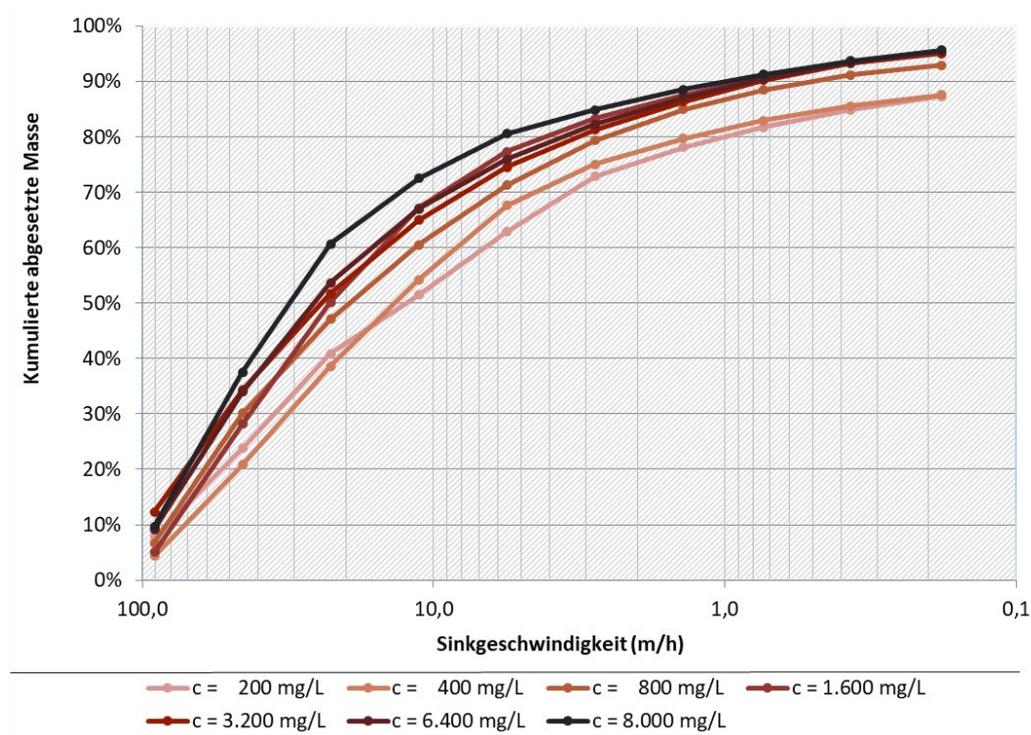
Für das Laborverfahren lässt sich aber ableiten, dass die Temperatur die Absetzwirkung signifikant beeinflusst und daher ein zulässiger Temperaturbereich für die Prüfung angegeben werden sollte.

### 6.5.7 Einfluss der Feststoffkonzentration auf die Sinkgeschwindigkeit

Bei einer Übertragung des DIBt-Prüfkonzeptes auf die Randbedingungen des Arbeitsblatts DWA-A 102 und das neue Prüfkonzept für dezentrale Anlagen, die in ein Oberflächengewässer einleiten, ergeben sich sehr hohe Stoffkonzentrationen im Bereich von fast 10.000 mg/l. In diesem Bereich kann bereits von einer Erhöhung der Sinkgeschwindigkeit im Vergleich zu realen Feststoffkonzentrationen ausgegangen werden, vgl. hierzu auch Kap. 6.1. In einem weiteren Versuchsaufbau wurden daher die eingesetzten Massen von 0,5 g bis 20 g (Millisil) bzw. bis 16 g (Staubmix) variiert, sodass sich Konzentrationen von 200 bis 8.000 mg/l ergaben. Die höchste Konzentration konnte bei Straßenstaub mangels Staubmaterial nicht durchgeführt werden. Die Korngrößenverteilung von 0 bis 250 µm entsprach jeweils den Angaben in Tabelle 20. In Abbildung 38 und Abbildung 39 sind die Ergebnisse, kumulierte Massen in Abhängigkeit von der Sinkgeschwindigkeit, dargestellt. Auf die Darstellung der Standardabweichung wurde hier zwecks besserer Übersichtlichkeit verzichtet.

**Abbildung 38: Summenkurve abgesetzter Massen mit einer Sinkgeschwindigkeit  $\geq v_s$  (m/h) für Mil-lisil W 4**

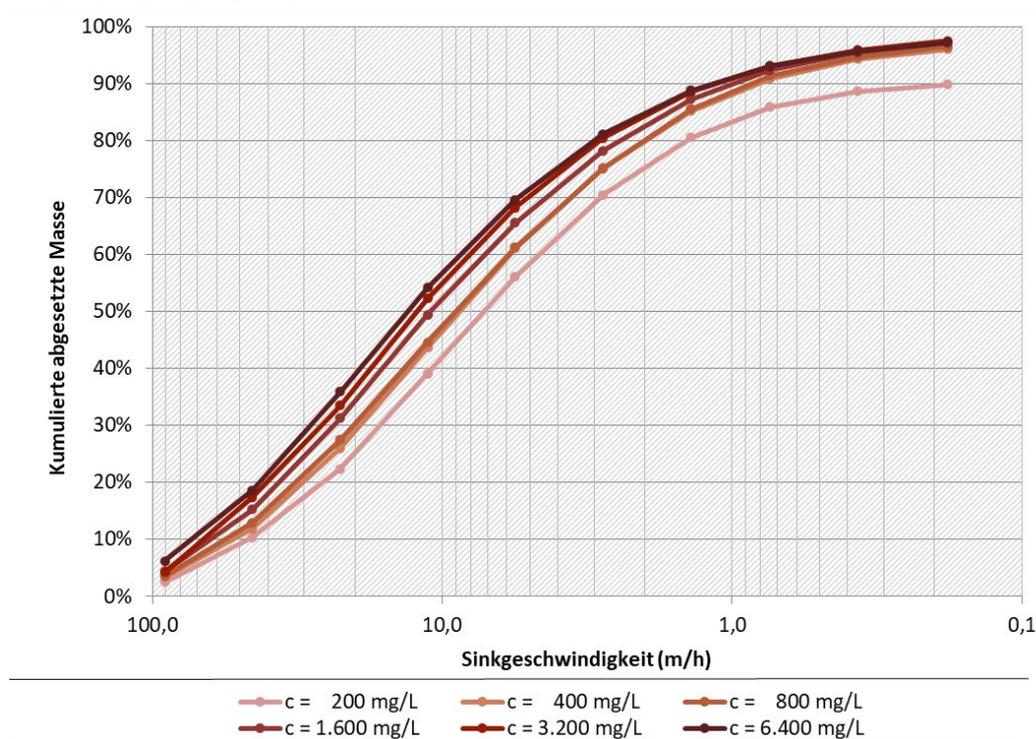
0,5 g, 1 g, 2 g, 4 g, 8 g, 16 g, 20 g in 2,5 l entionisiertes Wasser; n = 3



Quelle: eigene Darstellung, Frankfurt University of Applied Sciences 2022

**Abbildung 39: Summenkurve abgesetzter Massen mit einer Sinkgeschwindigkeit  $\geq v_s$  (m/h) für einen Staubmix; GV = 25,1 %**

0,5 g, 1 g, 2 g, 4 g, 8 g, 16 g in 2,5 l entionisiertes Wasser; n = 3

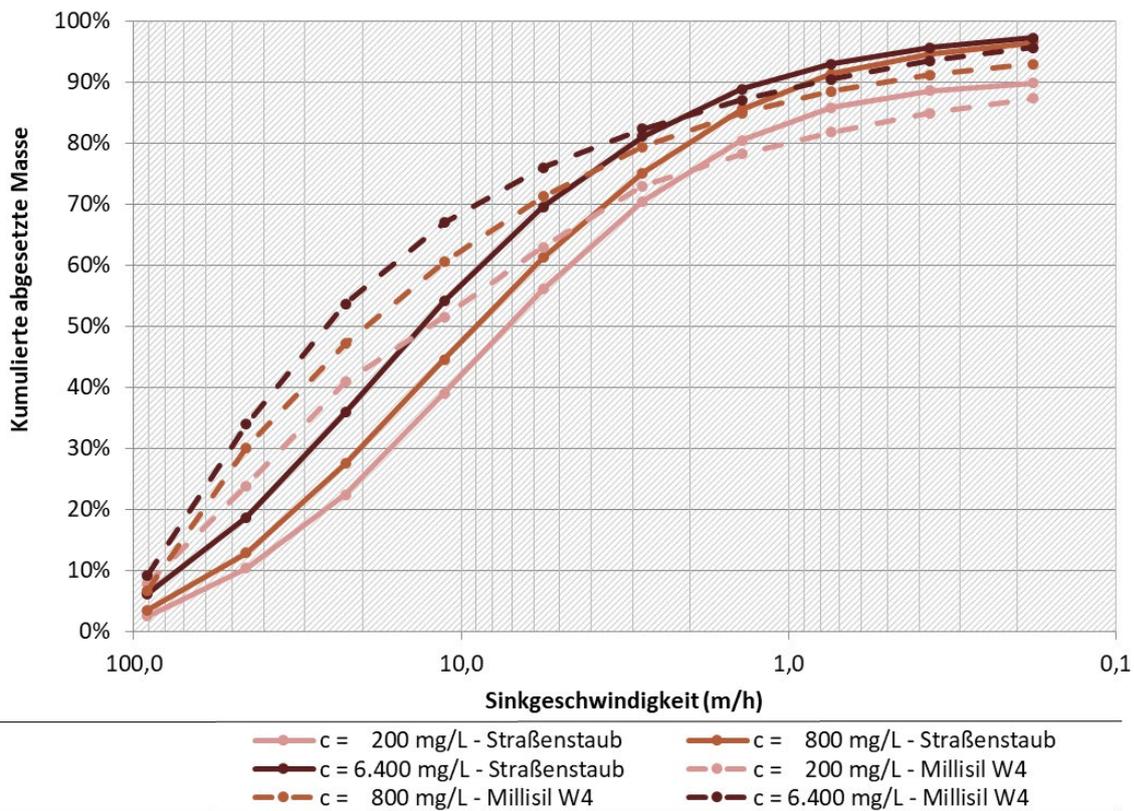


Quelle: eigene Darstellung, Frankfurt University of Applied Sciences 2022

Abbildung 40 zeigt jeweils das Ergebnis mit einer niedrigen, mittleren und hohen Konzentration für Millisil W 4 sowie den Straßenstaub in einem Diagramm. Hieraus ist zu erkennen, dass bei einer Sinkgeschwindigkeit von ca. 0,2 m/h, also nach 4 Stunden Absetzzeit, bei einer geringen Konzentration etwa 12 % der gesamten eingetragenen Feststoffe (Millisil) in der Säule verbleiben, bei einer hohen Konzentration dagegen nur etwa 4 %. Bei Straßenstaub ergibt sich ein ähnliches Bild.

**Abbildung 40: Summenkurve abgesetzter Massen mit einer Sinkgeschwindigkeit  $\geq v_s$  (m/h) für Millisil W 4 (gestrichelte Linie) und Straßenstaub (GV = 25,1 %) (durchgezogene Linie)**

0,5 g, 2 g, 16 g in 2,5 l entionisiertes Wasser; n = 3



Quelle: eigene Darstellung, Frankfurt University of Applied Sciences 2022

Im Bereich einer Sinkgeschwindigkeit von 11,0 m/h (nach 4 min) ist der Unterschied der Kurven im Vergleich untereinander am größten, nämlich etwas über 20 % bei Millisil und nahezu 20 % bei Straßenstaub. Eine Aussage zur Absetzwirkung verschiebt sich gemäß diesen Versuchsaufbauten, also bei einer sehr hohen Feststoffkonzentration im Zulauf, in Richtung „günstig“.

In der Literatur gibt es zum Einfluss des Feststoffvolumenanteils auf die Schwarmsinkgeschwindigkeit widersprüchliche Aussagen. So werden in einer Literaturliteraturauswertung auf der Grundlage von sieben Studien Korrekturfaktoren bei einem Feststoffvolumenanteil von ca. 0,003 (entsprechend einer Konzentration von etwa 8.000 mg/l bei einem Stoff mit einer Dichte von 2,65 g/cm<sup>3</sup>) im Bereich von 0,8 bis 3 angegeben (Salinas Salas 2007).

Da wie bereits in Kap. 6.1 beschrieben, in durchflossenen Anlagen in Abhängigkeit von der Reynoldszahl andere Gesetzmäßigkeiten herrschen als in reinen Absetzsäulen ohne Beschickung,

soll die Auswirkung der Feststoffkonzentration auf die Wirksamkeit an realen Anlagen getestet werden. Die ausgewählten Anlagen sowie Versuche dazu werden in Kap. 7.3 beschrieben.

## 6.6 Fazit

Statische Absetzversuche in Säulen können nicht hundertprozentig auf das Absetzverhalten von Partikeln in realen Anlagen übertragen werden, dennoch liefern sie wertvolle Hinweise zu Phänomenen der Sedimentation und zur Entwicklung des Prüfverfahrens.

- ▶ Der Einfluss der Zugabe eines Dispergierungsmittels erwies sich bei der Zugabe von Millisil und von Straßenstäuben sowohl in Partikeln von 0 – 250  $\mu\text{m}$  als auch in feinen Partikeln < 63  $\mu\text{m}$  als gering. Eine zusätzliche Bewertung der Flockungsneigung von realen Partikeln im Vergleich zu Millisil bei einer Prüfung ist daher nicht erforderlich.
- ▶ Auch zeigt sich der Einfluss der Zugabe von Salzen in üblichen Konzentrationen von Straßenabflüssen im Winter als unbedeutend.
- ▶ Als deutlicher erweist sich der Einfluss der Temperatur beim Absetzen von Feststoffen: Eine Temperaturdifferenz von 10 °C veränderte die Absetzwirkung um etwa 5 %. Als Schlussfolgerung wurde gezogen, dass ein zulässiger Temperaturbereich für die Prüfung angegeben werden sollte; z. B. unterhalb  $T = 18^\circ\text{C}$ .
- ▶ Der Zusammenhang zwischen organischem Anteil in der Messprobe und dem Absetzverhalten nach  $t = 4$  min ist mit einem hohen Bestimmtheitsmaß der Linearität ( $R^2 = 0,975$ ) statistisch signifikant. Der organische Anteil der Feststoffe stellte sich insbesondere nach einer kurzen Aufenthaltszeit als bedeutend für die Absetzwirkung heraus, wobei sich die Absetzwirkung eines Staubs mit einem Glühverlust von 25 % nach  $t = 16$  min wieder an die Absetzwirkung von Millisil anglich. Weitergehende Untersuchungen dazu siehe Kap. 8.1.2 und 8.1.3.
- ▶ Die getesteten Alternativen Bismehl und Silibeads, die eine geringere Dichte als Millisil aufweisen, stellten sich als nicht praktikabel dar. Bismehl zeigte sich als nicht inert und Silibeads als gefährlich bei der Verwendung (Rutschgefahr) und nicht anwendbar bei der Siebung (Siebe verstopften). Zudem weicht die kugelförmige Form der Silibeads deutlich von der durchschnittlichen Kornform von Straßenstaubpartikeln ab.
- ▶ Bei der Verwendung der Prüfmaterialien ist auf die Einhaltung der vorgegebenen Korngrößenverteilung zu achten. Eine Verschiebung der feinen und groben Anteile von der Sollverteilung macht sich deutlich in der Absetzwirkung bemerkbar.
- ▶ Die Konzentration des Prüfmehls bei Zugabe in die Absetzsäule erwies sich als relevant für die Absetzwirkung insbesondere im Bereich der theoretischen Absetzgeschwindigkeit von Partikeln mit einer Größe von 63  $\mu\text{m}$  ( $v_s = 11$  m/h,  $t = 4$  min). In Prüfverfahren wird oftmals mit einer höheren als mit einer realen Konzentration von Niederschlagsabflüssen geprüft, um die Jahresfracht in einer annehmbaren Zeit zuzudosieren. Daher wurde beschlossen, diesen Aspekt an zwei realen Sedimentationsanlagen in einem Versuchssetup mit unterschiedlichen Konzentrationen und Durchflüssen systematisch zu untersuchen, vgl. Kap. 7.3.

Bezüglich der Auswirkung der Kornform auf die Absetzwirkung von Partikeln wurden keine Untersuchungen in den Absetzsäulen durchgeführt, da sie gemäß den Ausführungen in Kap. 6.1 für das Prüfverfahren nicht relevant erscheint und das letztendlich gewählte Prüfmehl eine ähnliche Zirkularität wie Straßenstäube aufweist (vgl. 5.4.3).

## 7 Prüfkonzept zur Testung des Feststoffrückhaltes in dezentralen Anlagen

### 7.1 Vorbereitungen

Als erster Schritt zur Auswahl von geeigneten Anlagen wurde eine Marktübersicht erstellt, die in der Anlage E als „Übersicht zu Behandlungstechniken in Deutschland“ enthalten ist. Hier kristallisierten sich Unterschiede bezüglich der Verfahrenstechnik, der Baugröße sowie der bereits vorhandenen Leistungsnachweise (DIBt-Zulassung, LANUV-Liste) heraus.

Im zweiten Schritt wurden die Kosten für einige Anlagen angefragt. Hierbei wurde darauf geachtet, Anlagen mit verschiedenen Verfahrenstechniken (Sedimentation, erweiterte Sedimentation, Filtrationsanlage, Rinne) und von möglichst unterschiedlichen Herstellern zu berücksichtigen.

Zur Prüfung der Anlagen wurden die zum Zeitpunkt des Beginns des Forschungsvorhabens einzigen beiden vom DIBt in Deutschland benannten Prüfstellen beauftragt und zwar

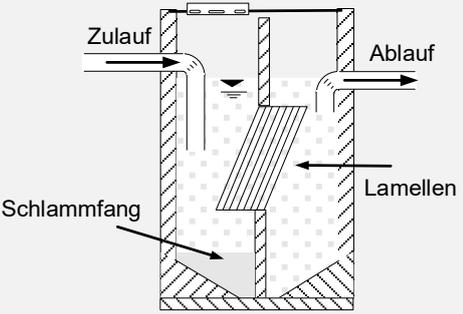
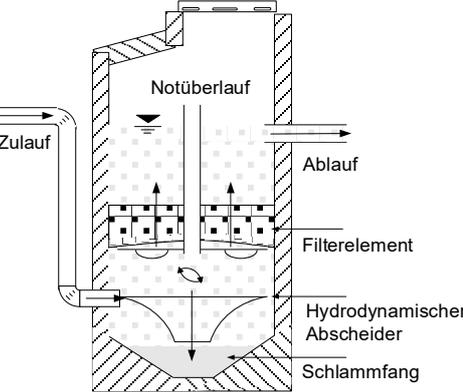
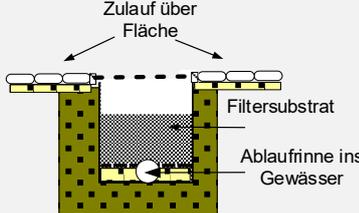
- ▶ IKT (Institut für Unterirdische Infrastruktur gGmbH), Exterbruch 1, 45886 Gelsenkirchen und
- ▶ TRLP (TÜV Rheinland TRLP Products GmbH), Dreikronenstraße 31, 97082 Würzburg.

### 7.2 Auswahl und Beschreibung der Anlagen

Nicht alle Hersteller hatten Interesse, eine Anlage für Forschungszwecke zur Verfügung zu stellen und gaben kein Angebot ab. Weitere Anlagen, die das vorhandene Budget überschritten, wurden ausgeschlossen. Auch wurden Anlagen, die kostenfrei oder stark vergünstigt angeboten wurden und deren Hersteller sich uneingeschränkter Zugang zu den Versuchsergebnissen erbaten, nicht weiter berücksichtigt. Schließlich wurden vier Anlagen von den Prüfstellen angeschafft, die den Bereich der möglichen Verfahrenstechniken abdecken und von der Anschlussfläche eher im kleinen Bereich angesiedelt sind, vgl. Tabelle 25. Dies war nötig, um das insgesamt zur Verfügung stehende Budget nicht zu überschreiten (Transportkosten zur jeweils anderen Prüfstelle, Kosten für Prüfmaterial). Der Auswahl wurde vom Begleitkreis aus Experten zugestimmt.

**Tabelle 25: Ausgewählte Anlagen**

Bezeichnung	Aufbau/Verfahrenstechnik	Schemazeichnung (nicht maßstabsgetreu)
Anlage A	Sedimentationsanlage; $V = 975 \text{ l}$ ; $D = 1,1 \text{ m}$ , Absetzwirksame Oberfläche = $0,95 \text{ m}^2$	

Bezeichnung	Aufbau/Verfahrenstechnik	Schemazeichnung (nicht maßstabsgetreu)
<b>Anlage B</b>	Sedimentationsanlage mit Lamellen in Chevronform, D = 2 m projizierte Lamellenfläche $A_{proj} = 3,92 \text{ m}^2$	
<b>Anlage C</b>	zweistufiges Behandlungssystem (Kompaktanlage): dauergestautes Schachtbauwerk DN 1000 mit Hydrozyklon, Sedimentationsraum, im Aufstromverfahren betriebene Filtereinheit	
<b>Anlage D</b>	einstufiges, trocken fallendes mit carbonathaltigem Filtersubstrat gefülltes Retentionsrinnenfiltersystem; in NRW mit Notüberlauf möglich	

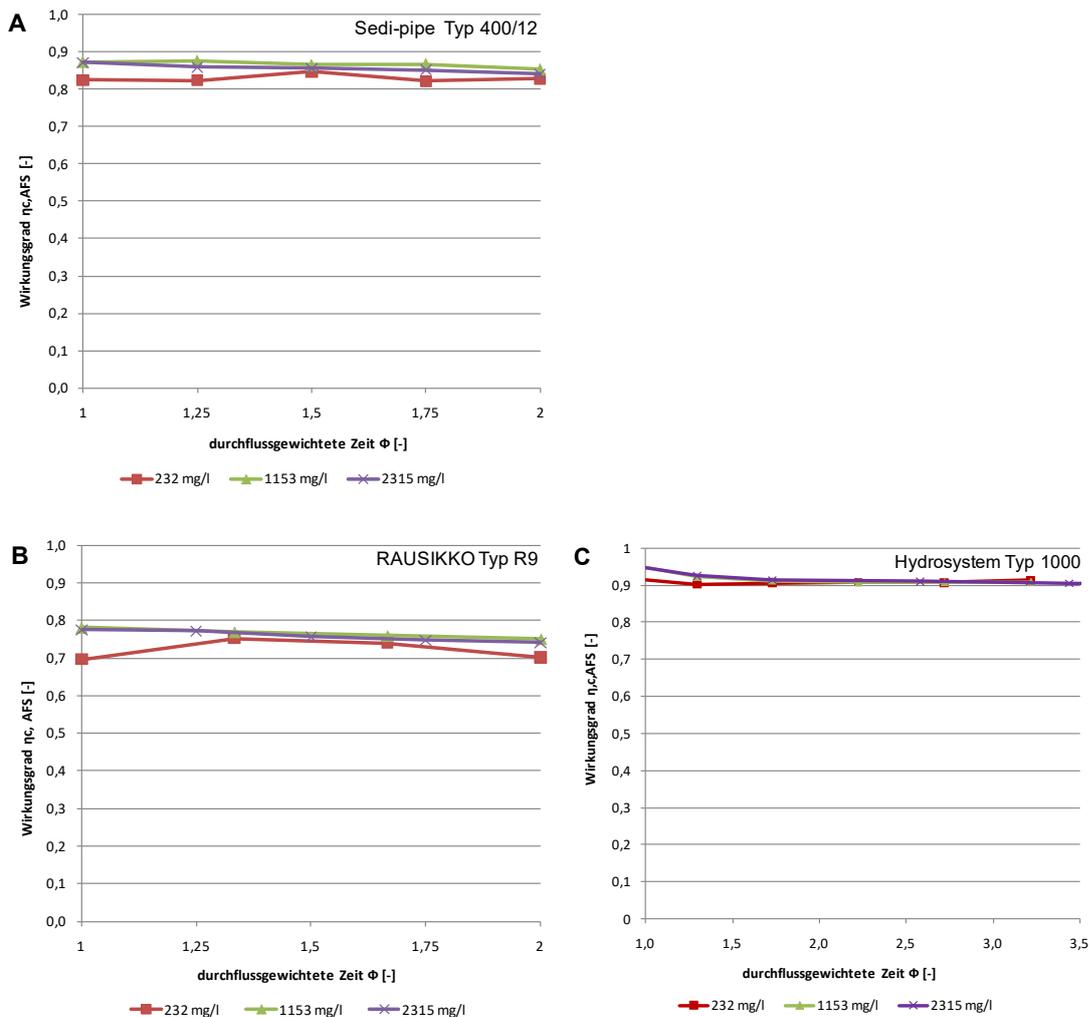
### 7.3 Untersuchungen zum Einfluss der Zulaufkonzentration auf die Wirksamkeit

Wie in Kap. 6.5.7 gezeigt, beeinflusst die Konzentration des dosierten Prüfstoffs das Absetzverhalten von feinen Feststoffen mit etwa  $63 \mu\text{m}$  Korndurchmesser in einer Absetzsäule ohne Durchfluss maßgeblich.

Im Rahmen der Entwicklung von Prüfverfahren wurden dazu bereits an der FH Münster Versuche an realen Anlagen durchgeführt (Schmitt et al. 2010), vgl. Abbildung 41. Die Millisil-Zulaufkonzentration wurde von  $232 \text{ mg/l}$  bis  $2.315 \text{ mg/l}$  variiert. Drei verschiedene Anlagen wurden getestet. Die Sedipipe- und RAUSIKKO-Anlagen sind Anlagen mit einer Sedimentationskammer. Das Hydrosystem verfügt, neben einem hydrodynamischen Abscheider, zusätzlich über einen Ionenaustauschfilter. Der Einfluss der Konzentration auf die Wirksamkeit ist bei den Sedimentationsanlagen sehr gering (Unterschiede jeweils bis zu etwa 5 %). Beim Hydrosystem mit Filter ist kein nennenswerter Unterschied zu erkennen. Aus diesen Ergebnissen wurde geschlossen, dass die Konzentration in der gewählten Höhe die Wirksamkeit nicht maßgeblich beeinflusst und damit geprüft werden kann.

Ohne eine Anpassung der Randbedingungen ist die Konzentration in dem neuen Prüfverfahren noch höher, wie in Kap. 5.2 gezeigt. Daher wird der Einfluss der Konzentration auf die Wirksamkeit systematisch mit zwei unterschiedlichen Durchflüssen und variablen Konzentrationen von 250 mg/l bis zu 4.000 mg/l an zwei realen Anlagen getestet. Gewählt wurden dazu die Anlagen A und B. Allgemeine Versuchsrandbedingungen in den Prüfstellen IKT und TRLP sind in Anlage A zusammengestellt.

**Abbildung 41: AFS-Wirkungsgrad in Abhängigkeit von der Zulaufkonzentration** **Klicken oder tippen Sie hier, um Text einzugeben.**



Quelle: Schmitt et al. 2010

### 7.3.1 Anlage A

Die absetzwirksame Oberfläche der Anlage beträgt  $0,95 \text{ m}^2$ . Das Prüfsetup ist in Anlage B.1.1, Tabelle 48, dargestellt. Es wird mit zwei Prüfrengenspenden ( $r = 2,5$  und  $25 \text{ l}/(\text{s} \cdot \text{ha})$ ) getestet. Die Beaufschlagung von  $2,5 \text{ l}/(\text{s} \cdot \text{ha})$  ergeben unter der Annahme einer angeschlossenen Fläche von  $A = 1.733 \text{ m}^2$  einen Durchfluss von  $0,433 \text{ l/s}$  bzw.  $1,6 \text{ m}^3/\text{h}$  und eine Oberflächenbeschickung von  $q_A = 1,7 \text{ m/h}$ . Bei einer Beaufschlagung von  $25 \text{ l}/(\text{s} \cdot \text{ha})$  ergeben sich ein Durchfluss von  $4,33 \text{ l/s}$  bzw.  $15,6 \text{ m}^3/\text{h}$  und eine Oberflächenbeschickung von  $q_A = 16,4 \text{ m/h}$ .

Die Millisil-Konzentration wird stufenweise von  $250 \text{ mg/l}$  (dies entspricht einer realistischen Konzentration in Straßenabflüsse) auf  $4.000 \text{ mg/l}$  erhöht. Mit den Konzentrationen und den Regenspenden ergeben sich die in Anlage B.1.1, Tabelle 3 48, aufgeführten Durchflüsse und

Millisilfrachten. Die Prüfdauer je Durchgang beträgt 2 h bei der geringen Regenspende von  $2,5 \text{ l}/(\text{s} \cdot \text{ha})$  und 48 min bei einer Regenspende von  $25 \text{ l}/(\text{s} \cdot \text{ha})$ . Die Dauer je Prüfdurchgang wurde so festgelegt, dass das Anlagenvolumen ( $V = 975 \text{ l}$ ) zum einen mindestens einmal ausgetauscht werden kann. Dies ist erforderlich, um den Einfluss einer vorangegangenen Messung auf den aktuellen Durchgang zu vermeiden. Zum anderen soll die Zeit lang genug sein, um in regelmäßigen Abständen vier Proben zu entnehmen. Die Proben werden auf AFS63 und AFS<sub>ges</sub> analysiert, vgl. Anlage A. Nach jedem Messdurchgang wird eine Pause von einer Stunde eingehalten, um das Absetzen von Partikeln im Anlagenvolumen zu ermöglichen, welche wiederum die nachfolgende Messung beeinflussen könnten.

In Anlage B.1.2 sind die Versuchsprotokolle der im November 2021 in der Versuchshalle des IKT (Institut für Unterirdische Infrastruktur gGmbH) durchgeführten Versuche zusammengestellt.

Eine Fotodokumentation der Versuche folgt in den Abbildungen 42 bis 44.

**Abbildung 42: Einbau der Anlage A in den Versuchsstand mit Zulauf und Ablauf, oben die Dosierschnecke**

---



Quelle: M. Goerke, IKT Gelsenkirchen, 2022

**Abbildung 43: Zulauf bei  $r = 2,5 \text{ l}/(\text{s} \cdot \text{ha})$  (links) und bei  $r = 25 \text{ l}/(\text{s} \cdot \text{ha})$  (rechts)**



Quelle: M. Goerke, IKT Gelsenkirchen, 2022

**Abbildung 44: Probenahme im Ablaufrohr (links); Probennahme (rechts)**

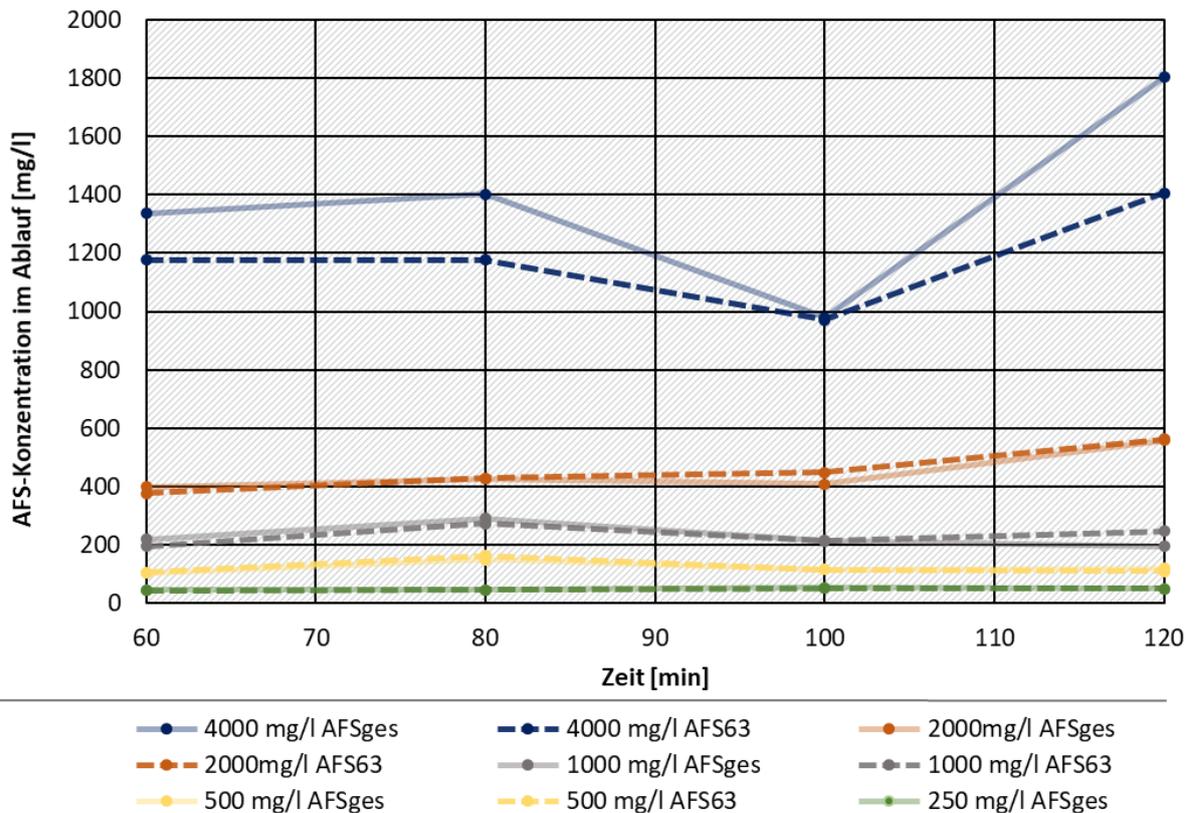


Quelle: M. Goerke, IKT Gelsenkirchen, 2022

Die gemessenen  $\text{AFS}_{\text{ges}}$ - und  $\text{AFS}_{63}$ -Konzentrationen sind in Anlage B.1.3, Tabelle 51 und Tabelle 52, dargestellt.

In Abbildung 45 sind die gemessenen Ablaufkonzentrationen  $\text{AFS}_{63}$  und  $\text{AFS}_{\text{ges}}$  des Versuchs mit der Prüfredenspende  $r = 2,5 \text{ l}/(\text{s} \cdot \text{ha})$  im zeitlichen Verlauf (60 bis 120 Minuten) je Zulaufkonzentration dargestellt. Bei Millisil-Zulaufkonzentrationen von 250 bis 2.000 mg/l entsprechen die ausgetragenen  $\text{AFS}_{63}$ -Feststoffe denen des gesamten AFS. Bei der Zulaufkonzentration von 4.000 mg/l werden auch gröbere Feststoffe  $> 63 \mu\text{m}$  mit ausgetragen. Die Konzentration sowohl für  $\text{AFS}_{\text{ges}}$  als auch in etwas geringerem Ausmaß für  $\text{AFS}_{63}$  liegen bei diesem Versuch nach 100 min unterhalb des übrigen Konzentrationsverlaufs. Eine Erklärung wurde nicht gefunden. Als Konsequenz für die Prüfung wurde daraus gezogen, bei dem Probennahmekonzept von fünf Proben im zeitlichen Verlauf jeweils eine Doppelprobe (A- und B-Probe) an  $\text{AFS}_{63}$  im Ablauf zu entnehmen, sodass Ausreißer dieser Art weniger ins Gewicht fallen.

**Abbildung 45: AFS<sub>ges</sub>- und AFS63-Konzentrationsverlauf im Ablauf der Anlage A bei  $r = 2,5 \text{ l}/(\text{s} \cdot \text{ha})$  in Abhängigkeit von der Zulaufkonzentration**

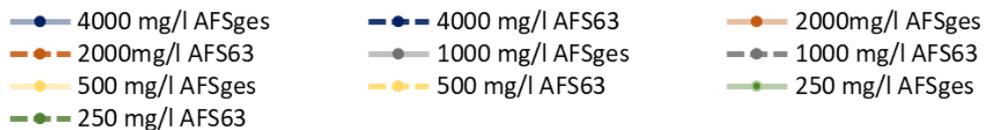
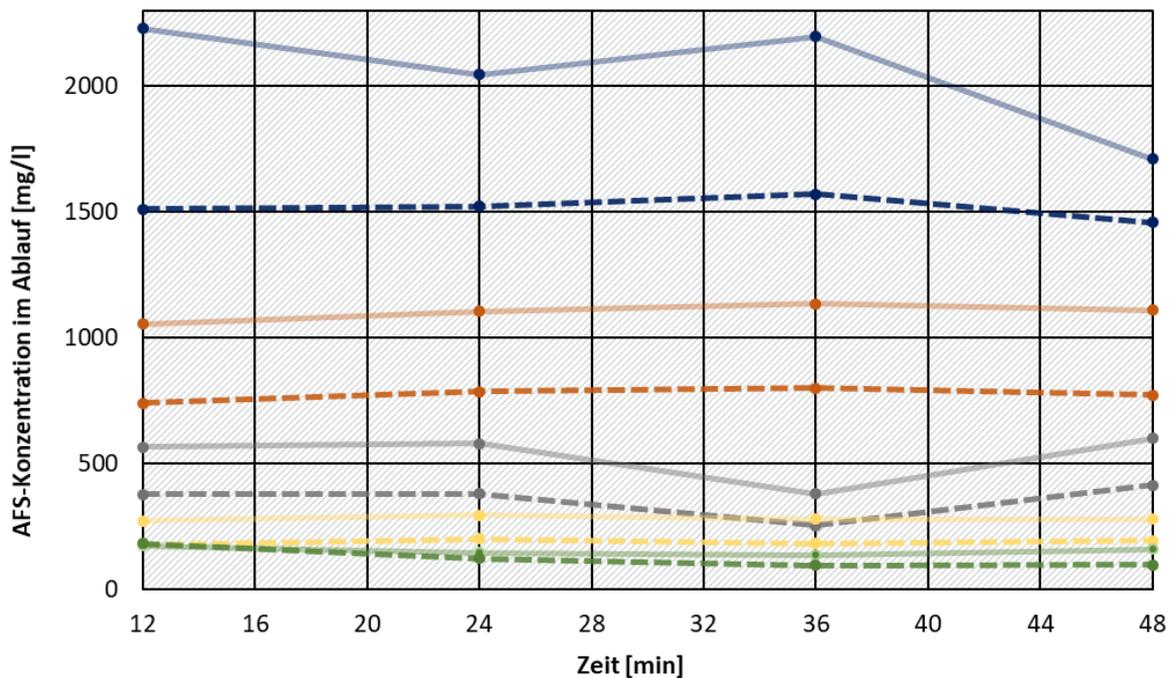


Quelle: eigene Darstellung, Frankfurt University of Applied Sciences 2022

Die gemessenen AFS63- und AFS<sub>ges</sub>-Ablaufkonzentrationen des Versuchs mit der Prüffregenspende  $r = 25 \text{ l}/(\text{s} \cdot \text{ha})$  im zeitlichen Verlauf (12 bis 48 Minuten) je Zulaufkonzentration werden in Abbildung 46 gezeigt. Sie zeigen ausgeprägter als im vorangegangenen Versuch, dass mehr grobe Feststoffe  $> 63 \mu\text{m}$  mit zunehmender Zulaufkonzentration ausgetragen werden.

Es stellt sich jeweils eine Gleichgewichtskonzentration ein, das heißt, dass die Endkonzentration schnell erreicht wird und fast linear über die Prüfzeit verläuft. Schwankungen sind auch hier zu erkennen, deren Ausmaß mit einer Doppelbestimmung für die Bewertung verringert werden können.

**Abbildung 46: AFS<sub>ges</sub>- und AFS63-Konzentrationsverlauf im Ablauf der Anlage A bei  $r = 25 \text{ l}/(\text{s} \cdot \text{ha})$  in Abhängigkeit von der Zulaufkonzentration**

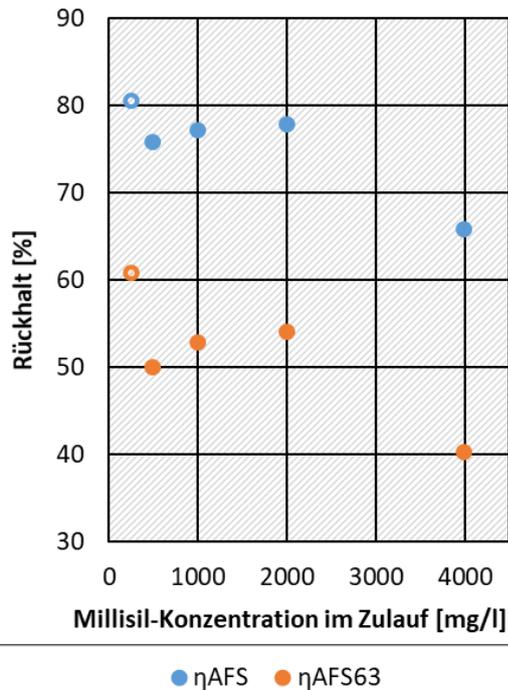


Quelle: eigene Darstellung, Frankfurt University of Applied Sciences 2022

Der AFS<sub>ges</sub>- und AFS63-Rückhalt in Abhängigkeit von der Millisilizugabe sind in Abbildung 47 und 48 je Prüfrengspende aufgetragen.

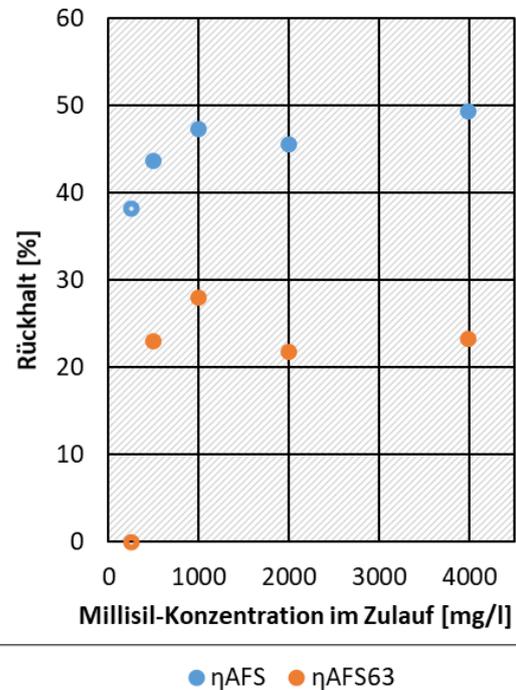
Das erste Wertepaar bei einer Zulaufkonzentration von 250 mg/l ist in Abbildung 47 blass dargestellt, da dieser Versuch bei einer komplett sauberen Anlage durchgeführt wurde. Es ist nicht auszuschließen, dass einige Partikel an den Wänden anhaften und so einen etwas besseren Wirkungsgrad vortäuschen. Eine eindeutige Tendenz kann nicht festgestellt werden. Bei einer Zulaufkonzentration von 4.000 mg/l stellt sich ein etwas niedrigerer Wirkungsgrad im Vergleich zu den anderen ein. Ein behindertes Absinken wird in durchströmten Anlagen erst bei höheren Konzentrationen erwartet, daher kann hierfür keine Erklärung gefunden werden. Auch bei dem Versuch mit der hohen Prüfrengspende von  $r = 25 \text{ l}/(\text{s} \cdot \text{ha})$  (Abbildung 48) kann keine eindeutige Tendenz festgestellt werden.

**Abbildung 47: AFS<sub>ges</sub>- und AFS63-Rückhalt in der Anlage A in Abhängigkeit von der Zulaufkonzentration bei  $r = 2,5 \text{ l/(s} \cdot \text{ha)}$**



Quelle: eigene Darstellung, Frankfurt University of Applied Sciences 2022

**Abbildung 48: AFS<sub>ges</sub>- und AFS63-Rückhalt in der Anlage A in Abhängigkeit von der Zulaufkonzentration bei  $r = 25 \text{ l/(s} \cdot \text{ha)}$**



Quelle: eigene Darstellung, Frankfurt University of Applied Sciences 2022

Der AFS63-Rückhalt bei einer Zulaufkonzentration von 250 mg/l ist rechnerisch negativ und hier mit „null“ aufgetragen. Eine mögliche Begründung ist, dass Feststoffe, die bei der geringen Regenspende, aber mit einer hohen Zulaufkonzentration von 4.000 mg/l im Ablaufrohr sedimentiert hatten (siehe Abbildung 49), bei der großen Regenspende fortgespült wurden. Die Ablaufkonzentration des ersten Wertes im zeitlichen Verlauf bei dem Versuch mit einer Zulaufkonzentration von 250 mg/l liegt auch deutlich höher als die drei folgenden (vgl. Abbildung 46). Die hohe Regenspende wirkt daher bereits als kleiner Spülstoß. Das Wertepaar für eine Zulaufkonzentration von 250 mg/l ist daher auch blasser dargestellt.

Die Wirkungsgrade, die sich aus den Zulaufkonzentrationen von 500 bis 4.000 mg/l ergeben, liegen zwischen 44 und 49 % für AFS<sub>ges</sub> und zwischen 22 und 28 % für AFS63.

**Abbildung 49: Ablagerungen im Ablaufrohr der Anlage A nach Abschluss des Versuchs bei einer Regenspende von  $r = 2,5 \text{ l/(s} \cdot \text{ha)}$  und  $4.000 \text{ mg/l}$  Zulaufkonzentration**

---



Quelle: M. Goerke, IKT Gelsenkirchen, 2022

### 7.3.2 Anlage B

Da keine eindeutige Tendenz zur Auswirkung der Zulaufkonzentration auf den Wirkungsgrad der Anlage A festgestellt werden konnte, wurde ein weiterer Versuch an dem Anlage B in der TRLP (TÜV Rheinland TRLP Products GmbH, Dreikronenstraße 31, 97082 Würzburg) durchgeführt. Erkenntnisse aus dem ersten Versuch wurden bereits impliziert – z. B. zunächst einen Durchlauf mit Prüfstoff ( $250 \text{ mg/l}$ ) aber ohne Bewertung durchzuführen. Weiterhin sollte die Erkenntnislücke zwischen den Zulaufkonzentrationen von  $2.000$  und  $4.000 \text{ mg/l}$  geschlossen werden. Daher wurde ein Versuch mit einer Zulaufkonzentration von  $3.000 \text{ mg/l}$  eingefügt und auf die Bestimmung des AFS während des Versuchs mit  $250 \text{ mg/l}$  verzichtet, da die Aussagen aufgrund der erwarteten geringen Ablaufkonzentrationen und Unterschreitung der Bestimmungsgrenze als gering betrachtet wurden.

Das Versuchsssetup wurde zusammen mit den Prüfstellen IKT und TRLP sowie mit dem DIBt erarbeitet und ist in Anlage B.2.1 dargestellt. Es wird mit zwei Prüfredenspenden ( $r = 2,5$  und  $25 \text{ l/(s} \cdot \text{ha)}$ ) getestet. Die Beaufschlagung von  $2,5 \text{ l/(s} \cdot \text{ha)}$  ergeben unter der Annahme einer angeschlossenen Fläche von  $A = 1.300 \text{ m}^2$  einen Durchfluss von  $0,325 \text{ l/s}$  bzw.  $1,17 \text{ m}^3/\text{h}$ . Die projizierte Lamellenbelastung beträgt gemäß Hersteller  $q_A = 0,3 \text{ m/h}$ . Bei einer Beaufschlagung von  $25 \text{ l/(s} \cdot \text{ha)}$  ergeben sich ein Durchfluss von  $3,25 \text{ l/s}$  bzw.  $11,7 \text{ m}^3/\text{h}$  und eine projizierte Lamellenbelastung von  $q_A = 3 \text{ m/h}$ .

Die Millisil-Konzentration wird stufenweise von  $250 \text{ mg/l}$  bzw.  $500 \text{ mg/l}$  auf  $4.000 \text{ mg/l}$  erhöht. Mit den Konzentrationen und den Regenspenden ergeben sich die in Anlage B.2.1, Tabelle 53, aufgeführten Durchflüsse und Millisilfrachten. Die Prüfdauer je Durchgang beträgt  $2 \text{ h}$  bei der geringen Regenspende von  $2,5 \text{ l/(s} \cdot \text{ha)}$  und  $48 \text{ min}$  bei einer Regenspende von  $25 \text{ l/(s} \cdot \text{ha)}$ . Die Dauer je Prüfdurchgang wurde so festgelegt, dass das Anlagenvolumen ( $V = \text{ca. } 6 \text{ m}^3$ ) mindestens einmal ausgetauscht werden kann. Die in regelmäßigen Abständen entnommenen vier Proben wurden auf die Parameter AFS63 und AFSges analysiert. Nach jedem Messdurchgang wurde eine Pause von einer Stunde eingehalten. In den Abbildungen 50 bis 52 ist der Versuch dokumentiert.

**Abbildung 50: Einbau der Anlage B in den Versuchsstand mit Zulauf und Ablauf, oben links die Dosierschnecke, rechts das Ablauf- und Probenahmerohr**



Quelle: G. Arnold, TRLP, Würzburg, 2022

**Abbildung 51: Millisildosierung in das Zulaufrohr (links); Sicht von oben auf die Lamellen (rechts)**



Quelle: G. Arnold, TRLP, Würzburg, 2022

**Abbildung 52: Befüllung der Anlage (links); Wassertrübung bei einer Konzentration von 4000 mg/l**

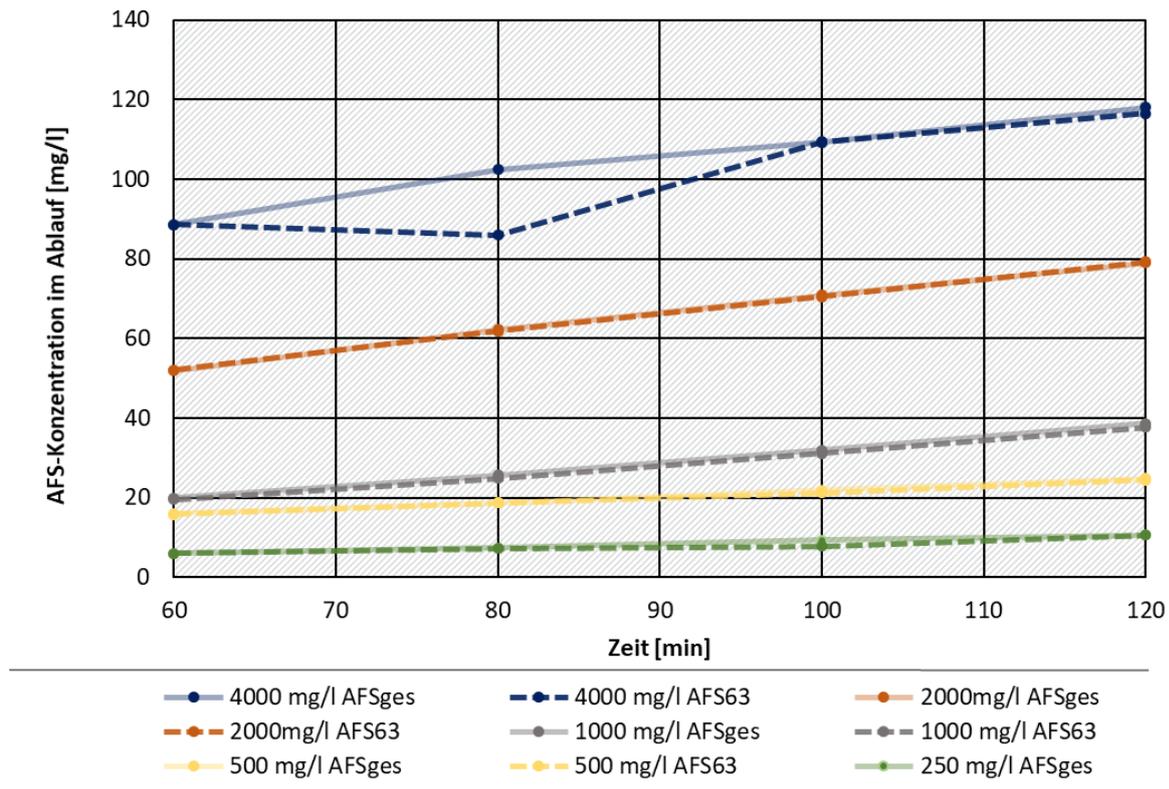


Quelle: G. Arnold, TRLP, Würzburg, 2022

In Anlage B.2.2, Tabelle 54 und Tabelle 55, sind die Versuchsprotokolle zusammengestellt. Die gemessenen AFS<sub>ges</sub>- und AFS63-Konzentrationen sind in Anlage B.2.3, Tabelle 56 und Tabelle 57, zu finden.

In Abbildung 53 sind die gemessenen AFS63- und AFS<sub>ges</sub>-Ablaufkonzentrationen des Versuchs mit der Prüfredenspende  $r = 2,5 \text{ l}/(\text{s} \cdot \text{ha})$  im zeitlichen Verlauf (60 bis 120 Minuten) je Zulaufkonzentration dargestellt.

**Abbildung 53: AFS<sub>ges</sub>- und AFS63-Konzentrationsverlauf im Ablauf der Anlage B bei  $r = 2,5 \text{ l}/(\text{s} \cdot \text{ha})$  in Abhängigkeit von der Zulaufkonzentration**



Quelle: eigene Darstellung, Frankfurt University of Applied Sciences 2022

Die zusätzlich außerhalb des Prüfplans gemessenen Konzentrationen von zwei Proben bei der Erstbeschickung mit 250 mg/l in der Höhe von 2 bzw. 3 mg/l sind hier nicht abgebildet. Auch nach einer Zulaufkonzentration von 500 mg/l waren die Ablaufkonzentrationen sehr niedrig zwischen 6 und 11 mg/l, im Mittel bei 8 mg/l. Diese Konzentrationen bei einem Liter Probenvolumen liegen bereits unterhalb der Bestimmungsgrenze von AFS<sup>4</sup>, was eine Interpretation erschwert.

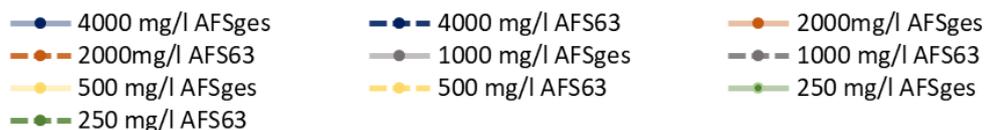
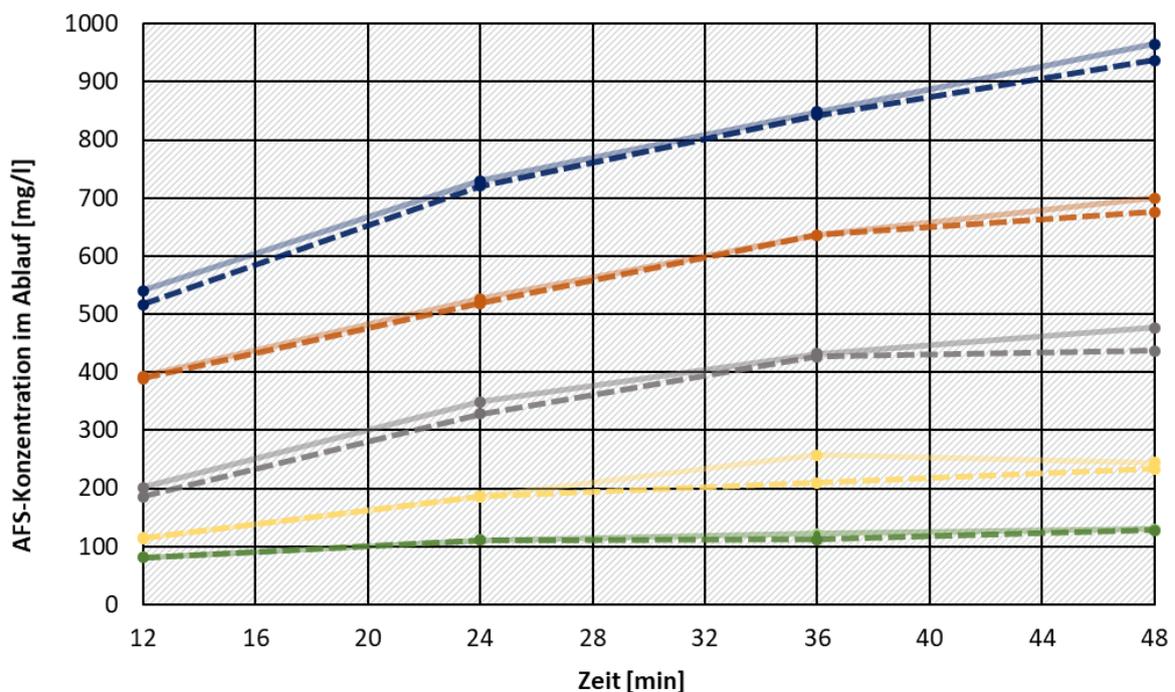
Bei allen Millisil-Zulaufkonzentrationen von 500 bis 4.000 mg/l entsprechen die ausgetragenen AFS63-Feststoffe denen der gesamten AFS mit Ausnahme eines Wertes bei einer Zulaufkonzentration von 4.000 mg/l nach 80 min. Dies unterstreicht das Erfordernis der Doppelbeprobung bei einer Prüfung. Weiterhin fällt auf, dass während der Probennahme die Gleichgewichtskonzentration im Ablauf noch nicht erreicht ist. Die Ablaufkonzentrationen steigen stetig bis zum

<sup>4</sup> Relevant für die Bestimmungsgrenze ist die absolute Trockenmasse auf dem Filter. In DIN EN 872 2005 wird der optimale Bereich hierfür zwischen 5 und 50 mg Trockenmasse angegeben. Um gültig zu sein muss der Trockenrückstand auf dem Filter mindestens 2 mg betragen. In der DIN 38409-2 1987 wird eine Trockenmasse von mindestens 20 mg gefordert.

Ende der Prüfung nach 120 min an. Von der Möglichkeit, den Wirkungsgrad mit dem letzten (höchsten) Wert zu ermitteln, wurde abgesehen. Die bessere Wirksamkeit ist bei großvolumigen Anlagen auf die große Retentionswirkung zurückzuführen, daher gibt die Bewertung des Mittelwertes aller Konzentrationen ein realistisches Bild des Gesamtrückhaltes wieder. Um der Prämisse der Gleichbehandlung aller Anlagen nachzukommen, wird an der Bewertung des Mittelwertes der Teilproben festgehalten. Kleine Vorteile für großvolumige Anlagen führen möglicherweise zum vermehrten Bereitstellen von großvolumigen Anlagen durch die Hersteller, was als Vorteil insgesamt für die Niederschlagsbehandlung angesehen wird.

In Abbildung 54 sind die Ablaufkonzentrationen im Ablauf der Anlage B im zeitlichen Verlauf mit einer Prüfgregenspende von  $r = 25 \text{ l}/(\text{s} \cdot \text{ha})$  bei verschiedenen Millisilkkonzentrationen im Zulauf dargestellt.

**Abbildung 54: AFS<sub>ges</sub>- und AFS63-Konzentrationsverlauf im Ablauf der Anlage B bei  $r = 25 \text{ l}/(\text{s} \cdot \text{ha})$  in Abhängigkeit von der Zulaufkonzentration**



Quelle: eigene Darstellung, Frankfurt University of Applied Sciences 2022

Die AFS<sub>ges</sub> – und AFS63-Konzentrationen weichen kaum voneinander ab – d. h. dass nahezu kein grobes Material > 63 µm ausgetragen wird. Auffällig ist auch hier, dass die Ablaufkonzentration mit der Zeitdauer steigt und zwar umso mehr, je höher die Eingangskonzentration ist. Eine Begründung ist auch hier, dass zu Beginn der Prüfung noch feststoffärmeres Wasser aus der vorangegangenen Prüfung ausgetragen wird, die Retentionswirkung der großvolumigen Anlage also positiv auf die Ablaufkonzentration wirkt. Dieser Effekt wird geringer sein bei der (im Prüfverfahren geplanten) zusätzlichen mittleren Regenspende von  $r = 6 \text{ l}/(\text{s} \cdot \text{ha})$ .

Um die Situation der ersten zehn Minuten mittels Ablaufproben zu erfassen, wird im DIBt-Verfahren bei der Regenspende von  $r = 25 \text{ l}/(\text{s} \cdot \text{ha})$  zunächst eine Mischprobe von fünf in Abstand

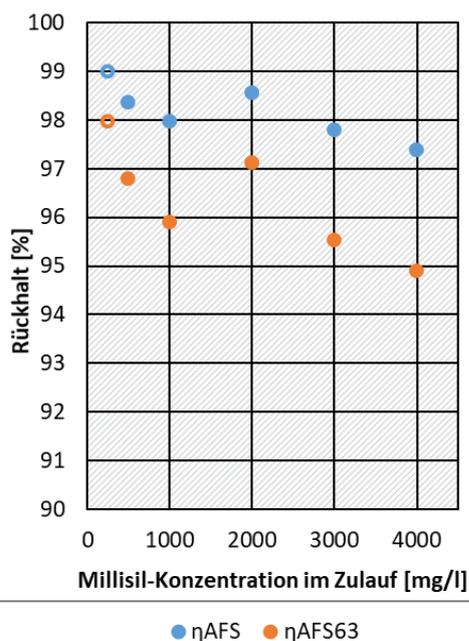
von 2 Minuten gewonnenen Einzelproben mit zu einer Bewertung herangezogen (vgl. auch Tabelle 27). Großvolumige Anlagen erhalten dadurch einen leichten Vorteil durch die (auch im Feld vorhandene) Retentionswirkung. Der Grund dieser Vorgehensweise beim DIBt-Verfahren war aber, dass bei einigen Filteranlagen das Austragen von vermehrten Feststoffen (aus dem Filtermaterial, erkennbar als Trübung) in den ersten Minuten der Einstellung der hohen Prüfregenspende beobachtet wurde (Arnold 2022). Um diesen Austrag zu erfassen, wurde die oben beschriebene Mischprobe – für alle Anlagentypen – gewählt. Im neuen Prüfverfahren soll diese Vorgehensweise beibehalten werden.

Der AFS<sub>ges</sub>- und AFS63-Rückhalt in Abhängigkeit von der Millisilzugabe sind in Abbildung 55 und Abbildung 56 je Prüfregenspende aufgetragen.

Das erste Wertepaar bei einer Zulaufkonzentration von 250 mg/l und einer Regenspende von  $r = 2,5 \text{ l/(s} \cdot \text{ha)}$  ist in Abbildung 55 blass dargestellt, da dieser Versuch bei einer komplett sauberen Anlage durchgeführt wurde (scheinbar besserer Wirkungsgrad durch Anhaften von Partikeln an den Wänden und Lamellenflächen) und aus nur 2 Stichproben gewonnen wurde. Eine eindeutige Tendenz kann nicht festgestellt werden.

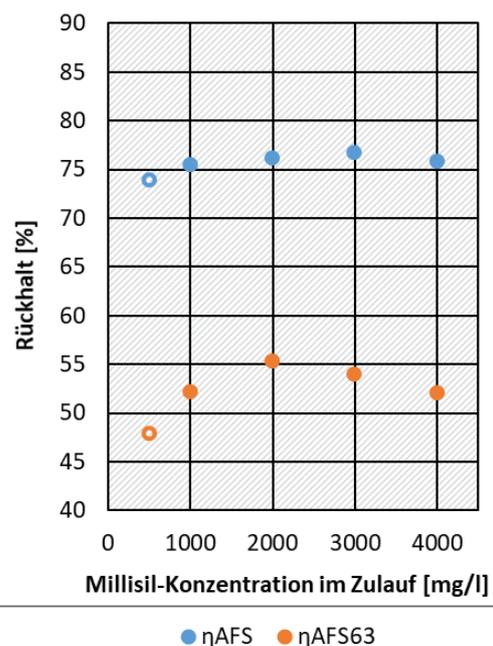
Auch bei dem Versuch mit der hohen Prüfregenspende von  $r = 25 \text{ l/(s} \cdot \text{ha)}$  (Abbildung 56) kann keine eindeutige Tendenz festgestellt werden. Der AFS<sub>ges</sub>- und AFS63-Rückhalt liegt bei der niedrigsten Zulaufkonzentration von 500 mg/l - - etwas unterhalb des Rückhaltes der höheren Zulaufkonzentrationen, wie bereits bei der Anlage A (siehe Abbildung 48). Auch hier könnte der Effekt des Freispülens aus dem vorherigen Versuch die Begründung sein. Die Wirkungsgrade, die sich aus den Zulaufkonzentrationen von 1000 bis 4.000 mg/l ergeben, liegen zwischen 80 und 82 % für AFS<sub>ges</sub> und zwischen 62 und 65 % für AFS63.

**Abbildung 55: AFS<sub>ges</sub>- und AFS63-Rückhalt in der Anlage B in Abhängigkeit von der Zulaufkonzentration bei  $r = 2,5 \text{ l/(s} \cdot \text{ha)}$**



Quelle: eigene Darstellung, Frankfurt University of Applied Sciences 2022

**Abbildung 56: AFS<sub>ges</sub>- und AFS63-Rückhalt in der Anlage B in Abhängigkeit von der Zulaufkonzentration bei  $r = 25 \text{ l/(s} \cdot \text{ha)}$**



Quelle: eigene Darstellung, Frankfurt University of Applied Sciences 2022

### 7.3.3 Auswahl der Zulaufkonzentration für die Prüfvorschrift und Begründung

Die Vorgaben für die Auswahl einer Prüfkonzentration:

- ▶ Hohe Konzentration, um Prüfprozedere abzukürzen und Ablaufkonzentrationen oberhalb der Bestimmungsgrenze zu erhalten
- ▶ Niedrige Konzentration, um tatsächliche Feststoffkonzentration in Niederschlagsabflüssen abzubilden und Wirkung nicht zu verfälschen

stehen sich konträr gegenüber. Hier ist ein Kompromiss zu finden.

Ein Blick in die Tabelle 56 in Anlage B.2.3 zeigt, dass die Ablaufkonzentrationen bei leistungsstarken Anlagen, einer geringen Prüfrengspende und einer Zulaufkonzentration bis 500 mg/l unterhalb der Bestimmungsgrenze liegen können. Die nächst höhere Zulaufkonzentration, bei der alle Werte oberhalb der Bestimmungsgrenze lagen, betrug 1.000 mg/l. Diese Zulaufkonzentration wurde gewählt für die Prüfung von Anlagen zum Einsatz in Flächenkategorie II. Für den Einsatz in Flächenkategorie III oder sehr kleine Anschlussflächen, bei der die Schneckendosierkapazität unterschritten wird, kann auch eine höhere Zulaufkonzentration von 2.000 mg/l gewählt werden.

### 7.4 Darstellung des Prüfprozedere

Aus den Überlegungen und Erkenntnissen der Versuche wurde schließlich ein Prüfprozedere entwickelt. Teilprüfungen TP 1 bis 3 (Regenspenden  $r = 2,5, 6$  und  $25 \text{ l}/(\text{s} \cdot \text{ha})$ ) werden mit einer moderaten Konzentration durchgeführt, anschließend erfolgt die restliche Beladung bis auf die Jahresfracht mit einer praktikablen Konzentration und schließlich der Spülstoß (TP 4).

Das Prüfprozedere wurde mit dem worst case einer Prüfung (Anschlussfläche  $6.000 \text{ m}^2$  und maximale Fracht bei Flächenkategorie III) in zwei Varianten ausgearbeitet, um zu sehen, ob die Prüfdauer, das Bereithalten der Wasservolumina und Dosierschneckenkapazität von den Prüfinstituten leistbar sind. Tabelle 26 zeigt die Prüfung mit einer Zulaufkonzentration von  $1.000 \text{ mg/l}$  sowie die Beladung mit einer Konzentration von  $3.000 \text{ mg/l}$ . Um die Prüfdauer auf vier Tage zu kürzen, sind auch Konzentrationen von  $2.000 \text{ mg/l}$  resp.  $3.700 \text{ mg/l}$  für die Beladung zur Prüfung der Flächenkategorie III denkbar.

**Tabelle 26: Prüfprozedere für eine Anlage der Flächenkategorie III mit einer Anschlussfläche von  $A = 6.000 \text{ m}^2$  (Ungenauigkeiten durch Rundungsfehler)**

Kategorie III:  $760 \text{ kg}/(\text{ha} \cdot \text{a})$ , davon  $90\% = 68,4 \text{ g AFS63}/\text{m}^2$  entspricht  $139,6 \text{ g Millisil}/\text{m}^2$

		Prüfrengspenden	Prüfdauer	Niederschlagsvolumen	Durchfluss	Millisil-Zugabe	Millisil-Konzentration	Probenahme
		$[\text{l}/(\text{s} \cdot \text{ha})]$	$[\text{h}]$	$[\text{m}^3]$	$[\text{m}^3/\text{h}]$	$[\text{kg}]$	$[\text{mg}/\text{l}]$	
Tag 1	TP1	2,5	8,0	43,2	5,4	43,2	1.000	je 5 Proben auf AFS <sub>ges</sub> und AFS63
Tag 2	TP2	6,0	3,33	43,2	12,96	43,2	1.000	
	TP3	25,0	0,8	43,2	54	43,2	1.000	
Summe TP1 bis TP3		129,6			129,6			
	Beladung	6,0	4,0	51,8	13,0	155,5	3.000	keine

	Prüfregenspenden	Prüfdauer	Niederschlagsvolumen	Durchfluss	Millisil-Zugabe	Millisil-Konzentration	Probenahme	
	[l/(s · ha)]	[h]	[m <sup>3</sup> ]	[m <sup>3</sup> /h]	[kg]	[mg/l]		
Summe Prüfdauer Tag 2		8,1						
Tag 3	Beladung	6,0	8,0	103,7	12,96	311,0	3.000	keine
Tag 4	Beladung	6,0	6,22	80,6	12,96	241,8	3.000	keine
Wartezeit (aus DIBt) 16 bis 24 h								
Tag 5	TP4	100,0	15 min	64,8	259,2	0,0	0,0	15 Proben AFS63 im Wechsel mit AFS <sub>ges</sub>
Gesamtsumme Millisilzugabe					838,0			

Die Pumpen müssen auf maximal 54 m<sup>3</sup>/h ausgelegt sein, der Zulaufbehälter muss etwa 270 m<sup>3</sup> fassen können (weniger, wenn er als Durchlaufbehälter konzipiert ist) und die Dosiervorrichtung muss 54 kg/h fördern können. Alle drei Voraussetzungen sind in den am Forschungsprojekt beteiligten Prüfstellen gegeben. Bei der zweiten, verkürzten, Variante müssten bei der dritten Prüfregenspende 108 kg Millisil je Stunde gefördert werden können. Hier ist eine weitere Dosiervorrichtung bereitzustellen.

Für die Prüfung ist Trinkwasser zu verwenden. Die Temperatur des Leitungswassers sollte nicht mehr als 18 °C betragen. Dieser Wert wurde als realistisch mit den Prüfstellen abgestimmt, die jeweils Leitungswasser als Prüfmedium verwenden. Die Zulaufmenge ist mit ± 5 % einzustellen. Das Prüfmehl ist gleichmäßig einzutragen, z. B. mit einem volumetrischen Feststoffdosierer mit Dosierschnecke. Die AFS- und AFS63-Gehalte sind in Anlehnung an die (DIN 38409-2 1987) zu bestimmen. Die Filtration ist mittels eines geeigneten Filters der Porenweite 0,45 µm durchzuführen. Bestimmungsgrenzen sind zu beachten. Die AFS63-Proben werden vor der Filtration über ein Metallsieb der Maschenweite von 63 µm gesiebt. Auch wenn optisch mit bloßem Auge keine Partikel am Sieb oder Siebrand zu erkennen sind, können feine Anteile daran anhaften, daher ist auf eine ausreichende Nachspülung des Siebes zu achten.

Die zeitliche Dauer der Prüfungen sowie die Probenahmezeitpunkte der Teilprüfungen entsprechen der DIBt-Prüfvorschrift, vgl. Tabelle 27. Die Tabelle enthält die Probenahmezeitpunkte bei der Mindestprüfdauer. Ist diese höher, um das Anlagenvolumen während der Prüfung mindestens zweimal auszutauschen, sind diese anzupassen. Es wird jeweils im zeitlichen Anschluss eine A- und B-Probe gezogen. Für dieses Forschungsvorhaben wird die A-Probe auf AFS<sub>ges</sub>, die B-Probe auf AFS63 analysiert. Für spätere Prüfungen ist jeweils in A- und B-Probe der Parameter AFS63 zu bestimmen.

**Tabelle 27: Prüfdauer und Probennahmezeitpunkte der AFS63-Prüfung gemäß der DIBt-Prüfvorschrift (DIBt 2017)**

\* die erste Teilprobe setzt sich zusammen aus 5 Einzelproben zu je 200 ml nach 2, 4, 6, 8 und 10 Minuten.

Regenspende [l/(s ha)]	Festgesetzte Prüfdauer	Probennahmezeitpunkte [min]
2,5	8 h	96/192/288/384/480
6	200 min	40/80/120/160/200
25	48 min	10*/19/29/38/48

Die Teilprüfung 1 und 2 werden an zwei aufeinanderfolgenden Tagen durchgeführt. Zwischen Teilprüfung 2 und 3 soll maximal eine Stunde liegen. Im Anschluss an die Teilprüfungen 1 bis 3 wird die restliche Beladung der Jahresfracht an Tag 2 und Tag 3 mit einer Zulaufkonzentration von 3.000 mg/l aufgebracht. Die Konzentration wird im Vergleich zur Prüfkonzentration erhöht, um die Dauer der Gesamtprüfung auf vier Tage zu begrenzen. Während einer Prüfung wurde der Austrag aus der Anlage während der Beladung bestimmt. Dieser entsprach etwa des Austrags während der Teilprüfung 2 mit  $r = 6 \text{ l/(s} \cdot \text{ha)}$ . Nach der Beladung wird eine Pause von 16 bis 24 h eingehalten, bevor der Spülstoß ohne Millisil-Zugabe erfolgt. Der Spülstoß orientiert sich an der Regenspende von  $r = 25 \text{ l/(s} \cdot \text{ha)}$  mit einer Erhöhung von 20 %, um Ungenauigkeiten bei der Drosselung zu berücksichtigen. Der daraus resultierende Durchfluss ist innerhalb einer halben Minute einzustellen. Während des 15-minütigen Spülstoßes werden insgesamt 15 Proben gezogen und (für dieses Forschungsvorhaben) im Wechsel auf AFS63 und AFS<sub>ges</sub> analysiert. Die erste Probe wird nach 30 sec gezogen.

Die Bewertung der Wirksamkeit der Anlage erfolgt in dem jeweils bei Teilprüfung 1 bis 3 die AFS63-Ablauffracht ins Verhältnis zur AFS63-Zulauffracht gesetzt wird. Die Auswirkungen des Spülstoßes werden durch Verhältnis der ausgetragenen AFS63-Fracht zur eingetragenen gesamten AFS63-Fracht berechnet. Daraus ergibt sich ein auf den Mittelwert der Wirkungsgrade der TP aufzuaddierender negativer Wirkungsgrad. Von einer Bewertung des Spülstoßes nur zur Hälfte wird abgesehen. Dies wird derzeit in der DIBt-Prüfung so praktiziert, da dort davon ausgegangen wird, dass ein Zusammentreffen von einer Regenspende von  $100 \text{ l/(s} \cdot \text{ha)}$  mit der Vollfüllung des Sedimentspeichers wenig wahrscheinlich ist. Eine Regenspende von  $25 \text{ l/(s} \cdot \text{ha)}$  zählt dagegen bei einer 15-minütigen Dauer nicht zu einem Starkregenereignis und kommt mehrmals im Jahr vor. Die Einführung eines Dichtefaktors wurde diskutiert und untersucht, sie stellte sich jedoch nach weitgehenden Untersuchungen als nicht erforderlich heraus (vgl. Kap. 8.1.2 und 8.1.3).

Mit dem ausgearbeiteten Prüfprozedere wurden die drei Anlagen B, C und D in der TRLP Würzburg getestet. Bei der Prüfung der Rinne wurde offensichtlich, dass die Beladung der Jahresfracht einen großen Einfluss auf den nachfolgenden Spülstoß hat und die drei Prüfreagenspenden TP 1 bis 3 an der fast sauberen Anlage möglicherweise zu einer zu günstigen Prüfung führt. Das Prüfprozedere wurde daraufhin so abgeändert, dass am ersten Tag der Prüfung vorbeladen wurde, vgl. Tabelle 28. Die Teilprüfungen 1 bis 3 finden somit an einer mit 51 % bis 73 % beladenen Anlage statt, dies entspricht einer Beladung von etwa sechs bis neun Monaten. Im Anschluss an die Teilprüfungen 1 bis 3 wird die restliche Jahresfracht aufgegeben und schließlich erfolgt der Spülstoß.

**Tabelle 28: Prüfprozedere für eine Anlage der Flächenkategorie II mit einer Anschlussfläche von A = 1.000 m<sup>2</sup> mit einer Teilbeladung an Tag 1 mit 51% der Jahresfracht (Unge- nauigkeiten durch Rundungsfehler)**

		Prüfregenspenden	Prüfdauer	Niederschlagsvolumen	Durchfluss	Millisilzugabe	Millisil-Konzentration	Probenahme
		[l/(s · ha)]	[h]	[m <sup>3</sup> ]	[m <sup>3</sup> /h]	[kg]	[mg/l]	
Tag 1	Beladung	6,0	7,7	16,6	2,16	49,9	3.000	keine
Tag 2	TP1	2,5	8,0	7,2	0,9	7,2	1.000	je 5 Proben auf AFS <sub>ges</sub> und AFS63
Tag 3	TP2	6,0	3,33	7,2	2,16	7,2	1.000	
	TP3	25,0	0,8	7,2	9,0	7,2	1.000	
		Summe TP1 bis TP3		21,6	21,6			
	Beladung	6,0	4,0	8,6	2,16	25,9	3.000	keine
Summe Prüfdauer Tag 3			8,1					
Wartezeit (aus DIBt) 16 bis 24 h								
Tag 4	TP4	1,2 * 25,0	15 min	2,7	10,8	0,0	0	15 Proben AFS63 im Wechsel mit AFS <sub>ges</sub>
Gesamtsumme Millisilzugabe						97,4		

Um den Effekt dieser Abänderung zu quantifizieren, wurde die Anlage B beim IKT einmal mit der Beladung zu Beginn und nach Abschluss der Teilprüfungen 1 bis 3 getestet. Die erste Prüfung mit der Beladung zu Beginn diente auch dazu, einen Vergleich der beiden Prüfstellen durchzuführen. Weiterhin wurden der Anlage C und die Anlage A mit dem angepassten Prüfprozedere getestet.

## 8 Durchführung der Prüfung von dezentralen Behandlungsanlagen

In Kap. 7.4 wurde die Entwicklung des Prüfprozedere aufgezeigt, kurz dargestellt und begründet, welche Anlage bei welcher Prüfstelle mit welchem Prüfprozedere getestet wurde.

Die Beschreibung der Prüfungen der Anlagen im folgenden Kapitel erfolgt dagegen nicht chronologisch, sondern systematisch nach Anlagentyp.

Zunächst wird die Prüfung an einer reinen Sedimentationsanlage vorgestellt (Kap. 8.1). Hier war das Ziel, anhand des Ergebnisses und im Vergleich zu Feldergebnissen einen Dichtefaktor zu ermitteln, um die höhere Dichte des Prüfstoffes im Vergleich zu Feststoffen in Niederschlagsabflüssen auszugleichen.

Die Anlage B wurden vergleichend mit dem gleichen Prüfsetup in beiden Prüfstellen getestet (Kap. 8.2.1), um die Robustheit des Prüfverfahrens darzustellen.

Nach der dritten Teilprüfung an der Anlage D (Kap. 8.4) stellte sich heraus, dass eine Vorbeladung vor den Teilprüfungen sinnvoll ist. Für weitere Prüfungen wurde beschlossen, eine Beladung mit der Halbjahresfracht an den Anfang des Prüfprozesses zu stellen, um die Folgen (Kolkation bei Filtern, Füllung des Sedimentationsraums bei Sedimentationsanlagen) realitätsnäher zu erfassen. Zwei Anlagen (Anlage B und Anlage C) wurden daher vergleichend mit einer Beladung vor und nach den Teilprüfungen getestet (Kap. 8.2 und 8.3).

### 8.1 Anlage A

Die Anlage A verfügt über keine Einbauten und wird daher in Zukunft mit Hilfe von Vorgaben im DWA Merkblatt M 179 bemessen werden können. Das Ziel der nachfolgenden Prüfung war daher, das Ergebnis der Prüfung mit der Bemessungskurve aus DWA-M 179 für reine Sedimentationsanlagen (AFS63-Wirksamkeit in Abhängigkeit von der Oberflächenbeschickung, vgl. Abbildung 2) einzuordnen, um so möglicherweise zu einem Dichtefaktor zu kommen. Die absetzwirksame Oberfläche der Anlage beträgt  $0,95 \text{ m}^2$ .

#### 8.1.1 Versuchsbeschreibung und Ergebnisse (IKT)

Die Anschlussfläche wurde im Vergleich zu Kap. 7.3.1 auf  $A_{b,a} = 800 \text{ m}^2$  verringert. Damit ergeben sich eine maximale Oberflächenbeschickung von  $q_A = 7,6 \text{ m/h}$  und das Prüfsetup nach Tabelle 29.

Von der gewünschten, noch geringeren maximalen Oberflächenbeschickung bei der Prüfung von  $q_A = 2 \text{ m/h}$  musste abgewichen werden, da der beim IKT vorhandene Schneckendosierer nicht in der Lage war, so geringe Menge an Prüfmehl unter den angestrebten Versuchsrandbedingungen zu fördern. Die Zulaufkonzentration während der Prüfungen betrug  $1.000 \text{ mg/l}$  Millisil W 4.

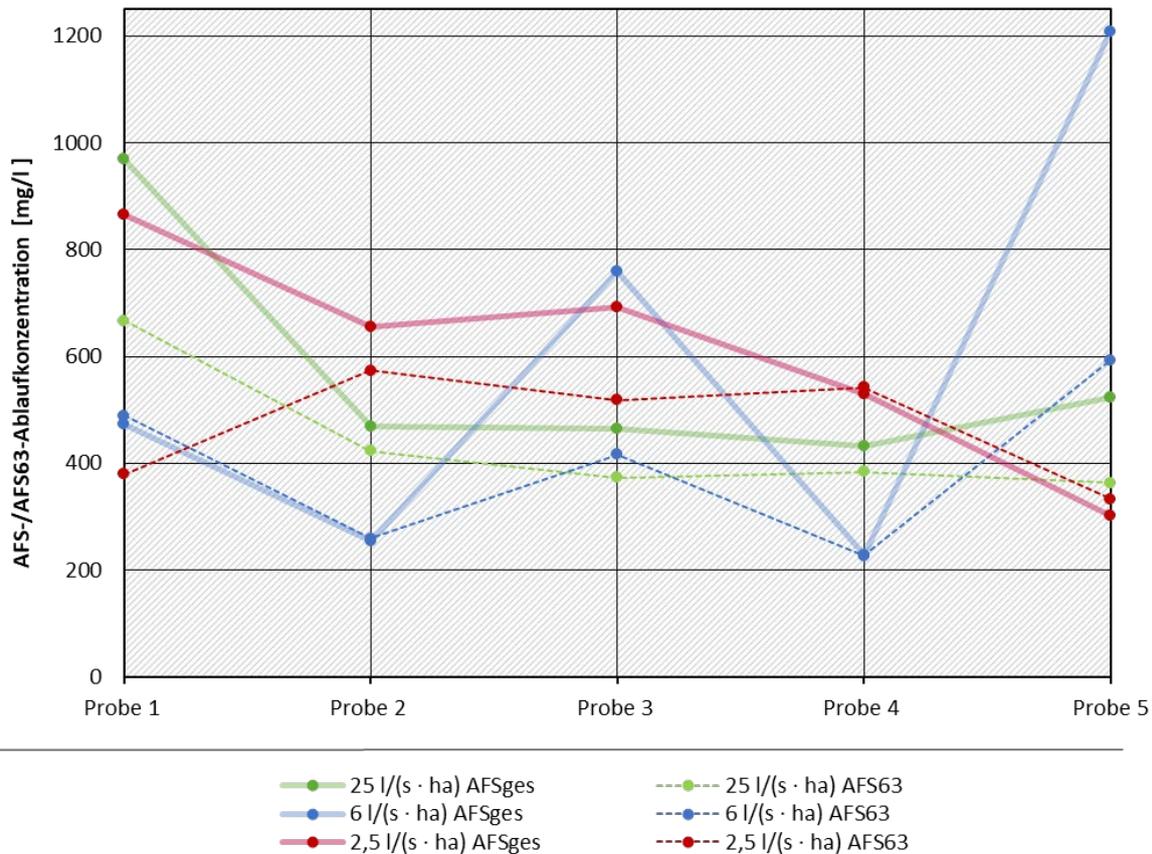
Die  $\text{AFS}_{\text{ges}}$ - und AFS63-Ablaufkonzentrationen der Teilprüfungen 1 bis 3 der Versuche sind in Abbildung 57, des Spülstoßes in Abbildung 58, dargestellt.

**Tabelle 29: Prüfsetup der Anlage A für eine Anschlussfläche von 800 m<sup>2</sup> der Flächenkategorie II (Ungenauigkeiten durch Rundungsfehler)**

		Prüfregenspenden	Prüfdauer	Niederschlagsvolumen	Durchfluss	Millisilzugabe	Millisil-Konzentration	Probenahme
		[l/(s · ha)]	[h]	[m <sup>3</sup> ]	[m <sup>3</sup> /h]	[kg]	[mg/l]	
Tag 1	Beladung	6,0	7,7	13,3	1,73	39,9	3.000	keine
Tag 2	TP1	2,5	8,0	5,8	0,72	5,8	1.000	je 5 Proben auf AFS <sub>ges</sub> und AFS63
Tag 3	TP2	6,0	3,33	5,8	1,73	5,8	1.000	
	TP3	25,0	0,8	5,8	7,2	5,8	1.000	
		<i>Summe TP1 bis TP3</i>		17,3		17,3		
	Beladung	6,0	4,0	6,9	1,73	20,7	3.000	keine
<i>Summe Prüfdauer Tag 3</i>			8,1					
<i>Wartezeit (aus DIBt) 16 bis 24 h</i>								
Tag 4	TP4	1,2 * 25,0	15 min	2,16	8,6	0,0	0,0	15 Proben AFS63 im Wechsel mit AFS <sub>ges</sub>
<i>Gesamtsumme Millisilzugabe</i>						77,9		

**Abbildung 57: AFS<sub>ges</sub>- und AFS63-Ablaufkonzentrationen der Teilprüfungen 1 bis 3 (Anlage A)**

IKT; Beladung vor TP 1 bis 3



Quelle: eigene Darstellung, Frankfurt University of Applied Sciences 2022

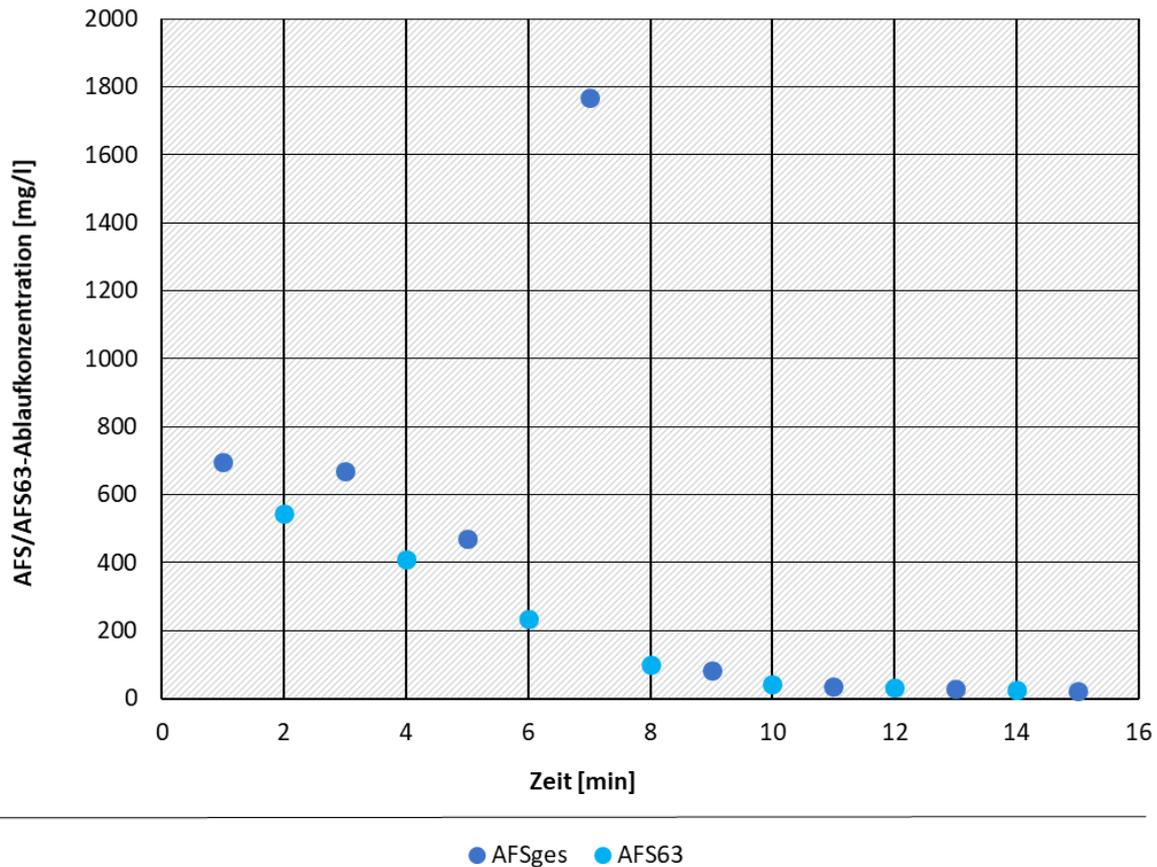
Zu erkennen ist ein – recht untypischer – unstetiger Verlauf der Ablaufkonzentrationen. Zu erwarten ist, dass sich die Ablaufkonzentrationen mit zunehmender Prüfdauer einer Gleichgewichtskonzentration nähern. Dies ist nicht der Fall. Weiterhin ist zu erwarten, dass die Ablaufkonzentration bei der fest eingestellten Millisil-Zulaufkonzentration von 1.000 mg/l mit zunehmender Regenintensität steigt. Auch dies ist nicht zu erkennen. Sämtliche Kurven mäandern unterschiedlich stark um eine Ablaufkonzentration von etwa 600 mg/l.

Es werden AFS<sub>grob</sub>-Anteile ausgespült, erkennbar an überwiegend höheren AFS<sub>ges</sub>- als AFS63-Werten. Die Zugabe über den Schneckendosierer wurde überprüft, sie erfolgte gleichförmig, so dass eine ungleichmäßige Feststoffaufgabe als Grund für den unsteten Verlauf und die Spitzen in der Ablaufkonzentration ausgeschlossen werden kann. Kurzschlussströmungen in Zusammenspiel mit dem Ausspülen des mit einer Halbjahresfracht gefüllten Schlammsammelraumes bereits bei der niedrigen Regenspense könnten eine Erklärung sein, zusätzlich zu den bereits festgestellten Ablagerungen im Ablaufrohr, vgl. Abbildung 49, die bei Erreichen einer bestimmten Höhe in nachfolgenden Regenspensen wieder ausgespült werden.

Auch beim Spülstoß ist beim ansonsten gleichförmigen Verlauf ein Ausreißer zu erkennen, der nicht erklärbar bleibt (Abbildung 58). Der AFS<sub>ges</sub> ist durchgängig etwas höher als der AFS63. Nach etwa 10 min sinkt die Ablaufkonzentration auf einen niedrigen Wert von unter 30 mg/l.

**Abbildung 58: AFS<sub>ges</sub>- und AFS63-Ablaufkonzentrationen des Spülstoßes (Anlage A)**

IKT; Beladung vor TP 1 bis 3



Quelle: eigene Darstellung, Frankfurt University of Applied Sciences 2022

In Tabelle 30 sind die für die Bewertung relevanten Daten aus dem Prüfprotokoll je Teilprüfung zusammengefasst. Aus dem Millisil-Eintrag von 76,3 kg mit einem Anteil an Partikeln < 63  $\mu\text{m}$  von 49 % ergibt sich rechnerisch ein Eintrag von 37,4 kg an AFS63, welcher für die Bewertung des Spülstoßes relevant ist.

In Tabelle 31 ist schließlich die Bewertung des AFS63-Rückhaltes aufgetragen. Aus den Wirkungsgraden der Teilprüfungen ergibt sich ein Mittelwert von  $\eta = 7,8 \%$ , abzüglich des Austrages des Spülstoßes ergibt sich ein Wirkungsgrad für die Anlage von 6,7 %.

**Tabelle 30: AFS63-Frachtein- und -austräge, Durchflüsse, Prüfdauer und Konzentrationen als Bewertungsgrundlage für die Prüfung der Anlage A sowie AFS63-Wirkungsgrad je Teilprüfung**

Teilprüfung	AFS63-Frachteintrag [kg]	Durchfluss [m³/h]	Dauer [h]	Volumen [m³]	AFS63-Ab- laufkonzentration [g/m³]	AFS63-Fracht- Austrag [kg]	AFS63- Wirkungs- grad [%]
TP 1	2,52	0,72	8	5,76	469	2,70	-7,1
TP 2	2,69	1,72	3,33	5,75	397	2,28	15,2
TP 3	2,84	7,13	0,8	5,70	422	2,41	15,3
Spülstoß	gesamt 37,4	8,63	0,25	2,16	198	0,43	-1,1

**Tabelle 31: Bewertung der Prüfung (Anlage A)**

Bezeichnung	AFS63-Wirkungsgrad [%]
TP 1	-7,1
TP 2	15,2
TP 3	15,3
Mittelwert TP1 bis 3	7,8
Spülstoß	-1,1
Anlage, gesamt	6,7
System, gesamt, abzüglich Bypass (10%)	6,0
mit Dichtefaktor 0,8	4,8
mit Dichtefaktor 0,6	3,6
ohne Bypass mit Dichtefaktor 0,8	5,3
ohne Bypass mit Dichtefaktor 0,6	4,0

Wird der nicht geprüfte Bypass von 10 % mitbewertet, ergibt sich ein Wirkungsgrad von 6 %. Dichtefaktoren (je nach Annahme) mindern den Rückhalt des Gesamtsystems noch einmal ab auf 4,8 resp. 3,6 %.

In den letzten beiden Zeilen der Tabelle 31 ist der berechnete Anlagenwirkungsgrad ohne Bewertung des Bypasses mit Berücksichtigung eines Dichtefaktors als Grundlage für den Vergleich mit der Literatur dargestellt.

### 8.1.2 Vergleich mit Werten aus der Literatur, unterschiedliche Dichte berücksichtigt

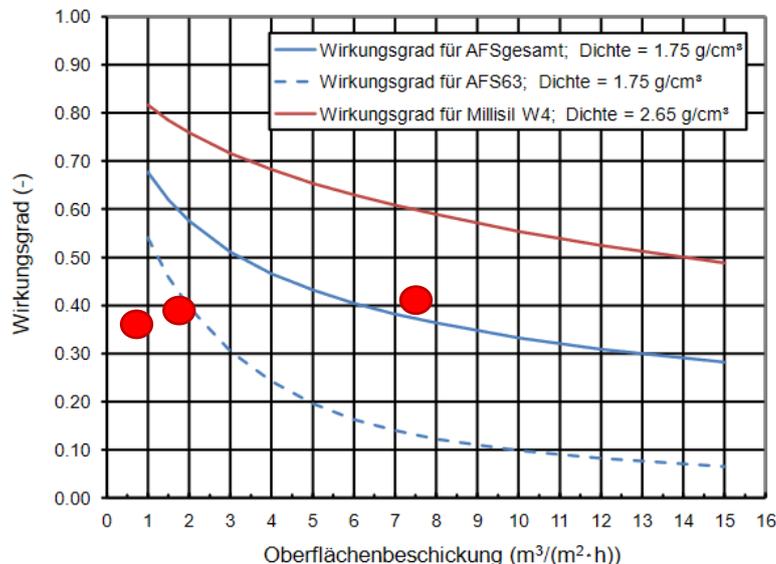
Die Bandbreite der Bewertung der Prüfung, wie in Tabelle 31 dargestellt, zeigt ganz deutlich, dass einem Dichtefaktor eine große Bedeutung zukommt. Unbestritten ist, dass die Dichte eines Partikels oder einer Partikelschar die Absetzbarkeit beeinflusst.

Bei einem Vergleich von Versuchsergebnissen mit dem Ziel der Festlegung eines zutreffenden Dichtefaktors für das neue Prüfverfahren müssen jedoch die Randbedingungen für die Ermittlung von Wirkungsgraden die gleichen sein. Deshalb seien Darstellungen aus der Literatur hier aufgegriffen und die Herangehensweise konkret beschrieben.

(Fettig und Pick 2020) veröffentlichten eine Kurvenschar berechneter Wirkungsgrade für Millisil sowie für AFS<sub>ges</sub> und AFS63 eines Stoffes mit einer Dichte von 1,75 g/cm<sup>3</sup> in Abhängigkeit von der Oberflächenbeschickung für Einzelpartikel auf der Grundlage der Stoke'schen Gleichung (Abbildung 59).

**Abbildung 59: Berechnete Wirkungsgrade eines Absetzsystems für AFS, AFS63 und Millisil W 4 bei 10 ° C**

rote Punkte: gemessene Millisil-Wirkungsgrade in diesem Projekt



Quelle: Fettig und Pick 2020

Um die an der Anlage A festgestellten Wirkungsgrade mit Abbildung 59 zu vergleichen, wird die Millisil (AFS<sub>ges</sub>)-Wirksamkeit je Prüfrengspende bezogen auf das eindosierte Millisil W 4 ermittelt, vgl. Tabelle 32.

Die Millisil-Wirkungsgrade 36,1 %, 38,8 % und 40,1 % sind jeweils als roter Punkt in Abbildung 59 eingetragen. Die Wirkungsgrade liegen jeweils deutlich unter den theoretisch zu erwartenden Werten. Im Folgenden werden die Unterschiede der Randbedingungen aufgezeigt. Der Unterschied der Temperatur ist unbedeutend: 10 ° C Annahme bei den Berechnungen und ca. 12 ° C bei der Prüfung im IKT. Ein weiterer Grund neben möglichen Kurzschlussströmungen kann der Einfluss der Ausspülung aus der zuvor erfolgten Beladung mit der Halbjahresfracht sein, bereits deutlich zu sehen bei dem geringen Wirkungsgrad bei der kleinsten Prüfrengspende. Diese Effekte sind bei der Berechnung von (Fettig und Pick 2020) nicht enthalten, scheinen für den Absetzerfolg aber sehr bedeutend zu sein.

**Tabelle 32: Millisil-Frachteinträge und -austräge, Durchflüsse, Prüfdauer und Konzentrationen als Bewertungsgrundlage für die Prüfung der einzelnen TP bei der Anlage A mit einer absetzwirksamen Oberfläche von  $A = 0,95 \text{ m}^2$**

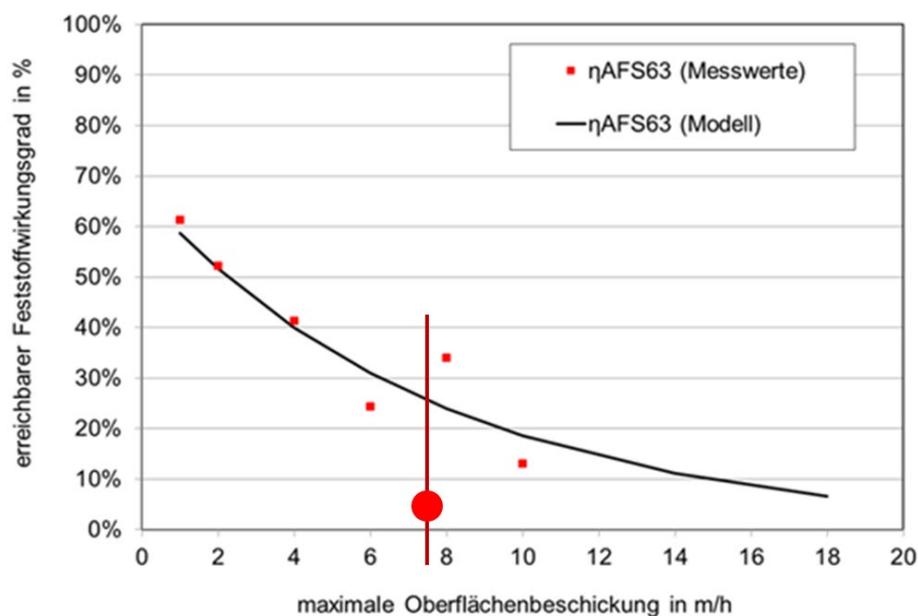
Teilprüfung	AFS63-Frachteintrag [kg]	Durchfluss [ $\text{m}^3/\text{h}$ ]	Oberflächenbeschickung [ $\text{m}/\text{h}$ ]	Dauer [h]	Volumen [ $\text{m}^3$ ]	AFS-Ablaufkonzentration [ $\text{g}/\text{m}^3$ ]	AFS-Fracht-Austrag [kg]	Millisil-Wirkungsgrad [%]
TP 1	5,15	0,72	0,76	8	5,76	571	3,29	36,1
TP 2	5,49	1,72	1,81	3,33	5,75	584	3,36	38,8
TP 3	5,80	7,13	7,58	0,8	5,70	609	3,47	40,1

Eine niedrige Dichte bzw. hoher Glühverlust ( $\rho = 1,75 \text{ g}/\text{cm}^3$  bzw.  $\text{GV} = 50 \%$ ) reduziert die AFS63-Wirksamkeit eines Sedimentationssystems nach (Fettig und Pick 2020) abhängig von der Oberflächenbeschickung zusätzlich im Bereich von 66 % bis 16 %. Die Dichte von abflusswirksamen Partikeln liegt allerdings nicht immer so niedrig. In diesem Forschungsprojekt wurde sie in einem Bereich zwischen  $1,8 - 2,5 \text{ g}/\text{cm}^3$  mit der Tendenz einer höheren Dichte bei Partikeln  $< 63 \mu\text{m}$  im Schwerpunkt bei  $2,2 \text{ g}/\text{cm}^3$  postuliert, vgl. Kap. 4.3.2.

In Abbildung 60 ist in die im Feld ermittelten Anlagen-Wirkungsgradkurve von dezentralen Sedimentationsanlagen über einen längeren Zeitraum (Kurve aus M 179) der hier im Forschungsprojekt ermittelte Wirkungsgrad unter Berücksichtigung eines Dichtefaktors von 0,6 bis 0,8 als roter Punkt mit aufgetragen. Dieser liegt deutlich unterhalb den im Feld ermittelten Wirkungsgraden für reale Straßenzuflüsse mit (leider) unbekannter Dichte. Dies bestätigt die schlechte Wirksamkeit der getesteten Anlage, zeigt aber auch, dass solche Anlagen durch das konzipierte Prüfverfahren identifiziert werden können.

**Abbildung 60: Erreichbarer Feststoffwirkungsgrad in Abhängigkeit von der Oberflächenbeschickung bei dezentralen Sedimentationsanlagen**

roter Punkt: ermittelter Anlagenwirkungsgrad mittels Prüfprozedere an der Anlage A bei  $q_A = 7,6 \text{ m}/\text{h}$

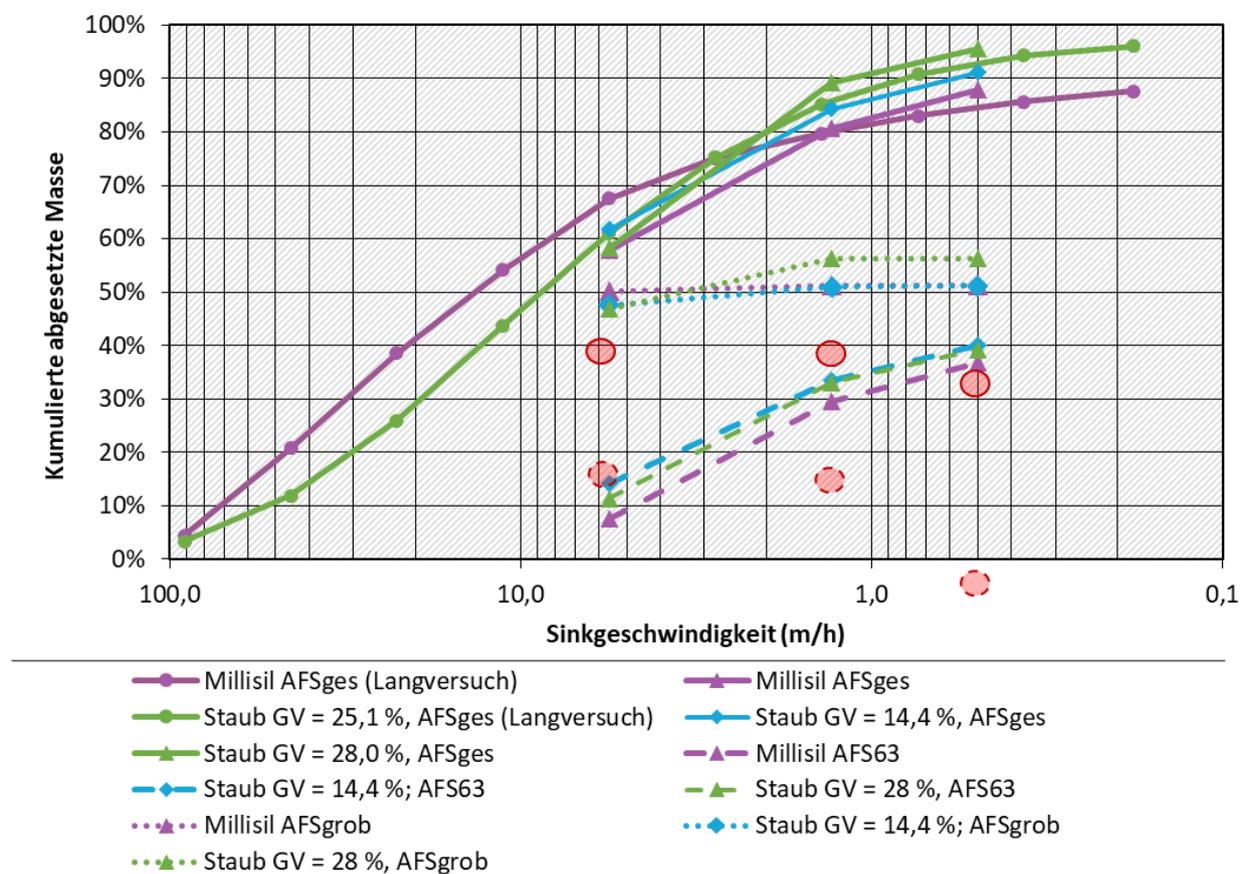


Um weitere Aussagen über den passenden Wert eines Dichtefaktors zu erhalten, wurde ein weiterer Absetzversuch mit Millisil und mit Stäuben mit einem Glühverlust von  $GV = 14,4 \%$  und  $GV = 28 \%$  durchgeführt. Es wurde jeweils 1 g Staub bzw. Millisil ( $c = 400 \text{ mg/l}$ ) in die Säule gegeben und die Abzapfzeiten entsprechend der Aufenthaltszeiten in der Anlage A ( $t = Q/V$ ;  $t_1 = 8 \text{ min}$ ,  $t_2 = 34 \text{ min}$ ,  $t_3 = 81 \text{ min}$ ) gewählt. Das abgezapfte Wasser wurde anders als in den vorherigen Absetzversuchen auf AFS63 und AFS<sub>grob</sub> analysiert. Die Summe ergibt dann den gesamten AFS.

Die Ergebnisse sind jeweils für eine Zugabekonzentration von 400 mg/l zusammen mit den Ergebnissen aus Kap. 6.5.7 für Millisil und einen Staub mit  $GV = 25,1 \%$  aufgetragen.

**Abbildung 61: Summenkurve abgesetzter Massen mit einer Sinkgeschwindigkeit  $\geq v_s$  (m/h) für Millisil und Stäube  $GV = 14,4\%$ ,  $25,1 \%$  resp.  $28,0 \%$**

1 g in deionisiertem Wasser;  $c = 400 \text{ mg/l}$ ,  $n = 3$ ; rote Punkte: Ergebnisse an der Anlage A für Millisil mit  $t = 8 \text{ min}$ ,  $34 \text{ min}$  und  $81 \text{ min}$



Quelle: eigene Darstellung, Frankfurt University of Applied Sciences 2022

Die Ergebnisse der Kurzversuche stimmen recht gut mit den Ergebnissen der Langversuche sowohl bei Millisil (lila Linien) als auch bei den organikhaltigen Stäuben (blaue und grüne Linien) überein. Weiterhin ist zu erkennen, dass sich die groben Feststoffanteile der Theorie entsprechend nach 8 min fast vollständig abgesetzt haben (gepunktete Linien). Ein Unterschied in der Absetzwirkung von Millisil und Stäuben mit einem Glühverlust von  $14,4 \%$  resp.  $28 \%$  ist nach längeren Aufenthaltszeiten kaum zu erkennen, von den organikhaltigen Stäuben haben sich sogar etwa 5 bis 10 % mehr Masse an AFS<sub>ges</sub> nach 81 min abgesetzt (durchgezogene Linien in lila, grün, blau). Dies kann daran liegen, dass der Anteil der Partikelgröße von  $< 10 \mu\text{m}$  in Millisil

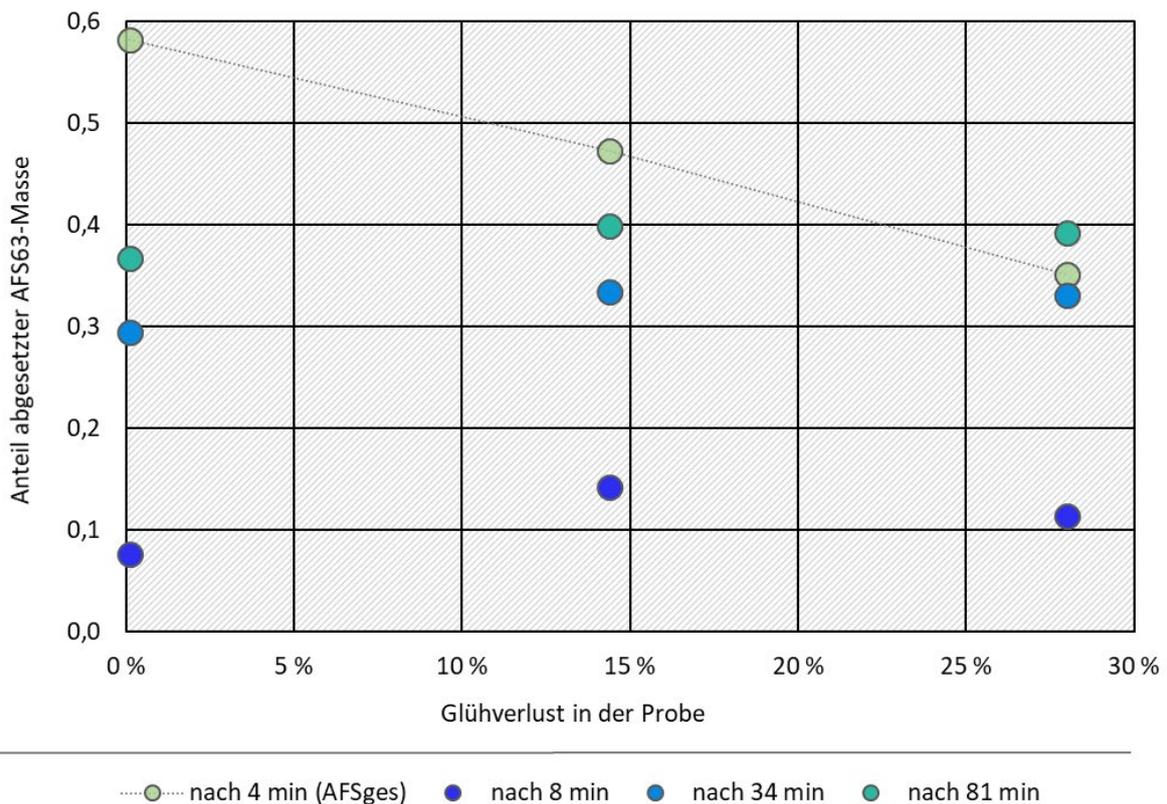
in der Fraktion 0 – 40 µm deutlich größer ist als in den organikreichen Stäuben, er liegt bei Millisil W 4 etwa bei 12 % (vgl. Abbildung 34) und bei 3 bis 5 % in den verwendeten Stäuben (mittels DIA im Wasserprüflabor der FRA UAS bestimmt). Dieser Anteil setzt sich auch nach 80 min nicht ab. Der Unterschied des Feinanteils < 63 µm in der summierten abgesetzten Masse liegt bei etwa 3 % (gestrichelte Linien).

Der erhoffte Vergleich mit den Millisil-Wirkungsgraden der Prüfung an der Anlage A ergibt leider keine Erkenntnis. Die nach einer Beladung mit der Halbjahresfracht erzielten Wirkungsgrade (im Bild eingetragene rote Punkte für Millisil, gestrichelte Punkte für Millisil < 63 µm) liegen sehr weit unterhalb der in der Absetzsäule erzielten AFS<sub>ges</sub>-Wirkungsgrade, was wie bereits in Kap. 8.1.1 neben der Ausspülung der Vorbeladung in den Teilprüfungen auch an einer ungünstigen Konstruktion der Zulaufführung liegen kann.

Die Darstellung der abgesetzten Masse der Proben mit unterschiedlichen Glühverlusten in Abbildung 62 bestätigt nochmal, dass sich der Unterschied zwischen Millisil und Proben mit einem realistischen Glühverlust (14,4 % resp. 28 %) mit der Absetzdauer (ab 8 min) nivelliert.

**Abbildung 62: Abgesetzte (AFS63-)Masse in Absetzsäulen in Abhängigkeit von der Aufenthaltszeit und des Glühverlustes in der Probe**

1 g in deionisiertem Wasser; c = 400 mg/l; n = 3



Quelle: eigene Darstellung, Frankfurt University of Applied Sciences 2022

### 8.1.3 Zusammenfassende Erkenntnisse

Nicht wirksame Anlagen können durch das ausgearbeitet Prüfverfahren identifiziert werden. Sind Anlagen nicht in der Lage, die Halbjahresfracht bei den Teilprüfungen bzw. die Jahresfracht

mit dem Spülstoß zurückzuhalten, wird auch eine sehr schlechte Gesamtwirksamkeit (schlechter als berechnete und in-Situ ermittelte Wirkungsgrade) erzielt.

Ein zielführender Dichtefaktor konnte durch weitere Versuche in Absetzsäulen nicht bestimmt werden. Es zeigte sich, dass die Dichte von Feststoffen die Absetzbarkeit nach 4 min Aufenthaltszeit deutlich beeinflusst, sich dieser Unterschied aber nach bereits 8 min Aufenthaltszeit nivelliert.

Viel wesentlicher für die Wirksamkeit von (Sedimentations-)Anlagen ist daher die Aufenthaltszeit (geringe Oberflächenbeschickung) und eine optimierte Zulaufkonzentration bzw. Verhinderung des Schlammaustrags entweder durch geeignete Anordnung des Schlammfanges oder nach Einbau im Betrieb durch regelmäßige Entleerung.

Es wird empfohlen, die Bewertung einer Prüfung mit Hilfe des ausgearbeiteten Verfahrens ohne Dichtefaktor vorzunehmen. Eine reine Berechnung mit Hilfe der Formel von Stokes, die für die Sinkgeschwindigkeit von Einzelpartikeln in Absetzreaktoren ohne einen nennenswerten Beitrag der Reynoldszahl, gilt, erscheint nicht zielführend. Die Korngröße und deren Verteilung innerhalb einer Fraktion erscheint von der Partikelseite her bedeutender für den Absetzerfolg als die Dichte und die Zulaufkonzentration zu sein.

Es herrscht nach wie vor Forschungsbedarf zum Unterschied vom Sedimentieren von realen organikhaltigen Partikelscharen im Gegenzug zu mineralischen Partikelscharen in durchflossenen Reaktoren in Abhängigkeit von der Oberflächenbeschickung, der Aufenthaltszeit und der Zulaufkonzentration. Hier könnten evtl. sowohl Versuche in sehr kleinen durchflossenen Anlagen (Durchmesser < 10 cm) und ergänzend dazu CFD-Simulationen mit zielgerichteten Fragestellungen helfen.

## 8.2 Anlage B

Die Anlage B wurde insgesamt dreimal geprüft. Das Prüfprozedere mit der Beladung nach den Teilprüfungen wurde vergleichend bei der TRLP in Würzburg sowie im IKT Gelsenkirchen angewendet, um die Vergleichbarkeit der Prüfstellen dazustellen. Weiterhin wurde dieselbe Anlage dem angepassten Prüfprozedere mit einer Teilbeladung bereits vor den Teilprüfungen unterzogen, um diese Auswirkung zu quantifizieren.

### 8.2.1 Versuchsbeschreibung und Ergebnisse (IKT, TRLP, Beladung nach TP 1 bis 3)

Die in Kap. 7.3.2 beschriebene Anlage B wurde entsprechend der Erläuterungen nach Kapitel 7.4 einer Prüfung in der Versuchshalle der TRLP Würzburg sowie anschließend gereinigt nach Transport beim IKT in Gelsenkirchen unterzogen. Das Versuchssetup ist in Tabelle 33 zusammengestellt.

Umgerechnet aus einer AFS63-Beladung von 530 kg AFS/(ha · a) ergeben sich für eine Beaufschlagung mit 90 % der Jahresfracht (10 % der Jahresfracht werden unbehandelt über den Bypass an der Anlage vorbeigeführt) 126,6 kg Millisil, die kontinuierlich mittels Schneckendosierer auf die Anlage gebracht wurden.

28,1 kg Millisil wurden in den Teilprüfungen 1 bis 3 mit den Regenspenden  $r = 2,5, 6$  und  $25 \text{ l/(s} \cdot \text{ha)}$  mit einer Konzentration von 1.000 mg/l aufgebracht. Aus einer 20 %igen Erhöhung der Regenspende von  $r = 25 \text{ l/(s} \cdot \text{ha)}$  ergab sich für den Spülstoß ein Durchfluss von  $14 \text{ m}^3/\text{h}$ .

Die berechnete Lamellenoberflächenbeschickung beträgt bei dem maximalen Durchfluss von  $Q = 11,7 \text{ m}^3/\text{h}$  während dritten Teilprüfung  $q_{A, \text{Lamelle}} = 3 \text{ m/h}$ .

Die Probennahme und Analyse erfolgten gemäß den Vorgaben nach Kapitel 7.4.

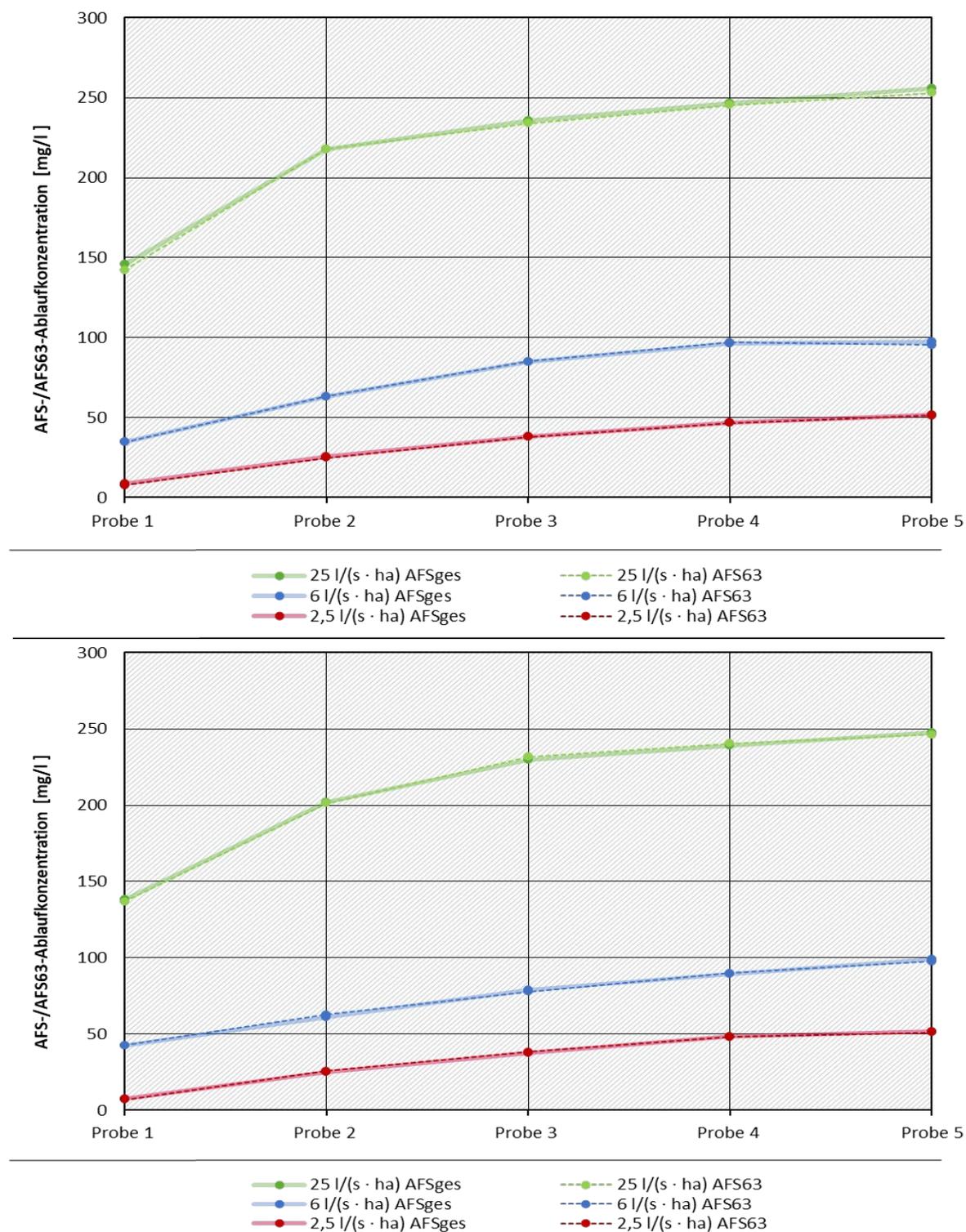
Die AFS<sub>ges</sub>- und AFS63-Ablaufkonzentrationen der Teilprüfungen 1 bis 3 beider Versuche sind in Abbildung 63, des Spülstoßes in Abbildung 64, dargestellt.

**Tabelle 33: Prüfsetup der Anlage B für eine Anschlussfläche von 1.300 m<sup>2</sup> der Flächenkategorie II (Ungenauigkeiten durch Rundungsfehler), Beladung nach TP 1 bis 3**

		Prüfregenspenden	Prüfdauer	Niederschlagsvolumen	Durchfluss	Millisilzugabe	Millisil-Konzentration	Probenahme
		[l/(s · ha)]	[h]	[m <sup>3</sup> ]	[m <sup>3</sup> /h]	[kg]	[mg/l]	
Tag 1	TP1	2,5	8,0	9,4	1,17	9,4	1.000	je 5 Proben auf AFS <sub>ges</sub> und AFS63
	TP2	6,0	3,33	9,4	2,81	9,4	1.000	
	TP3	25,0	0,8	9,4	11,7	9,4	1.000	
		<i>Summe TP1 bis TP3</i>		28,1		28,1		
Tag 2	Beladung	6,0	4,0	11,2	2,81	33,7	3.000	je 5 Proben auf AFS <sub>ges</sub> und AFS63 zur Kontrolle
<i>Summe Prüfdauer Tag 2</i>			8,1					
Tag 3	Beladung	6,0	7,7	21,6	2,81	64,8	3.000	keine
<i>Wartezeit (aus DIBt) 16 bis 24 h</i>								
Tag 4	TP4	1,2 * 25,0	15 min	3,51	14,0	0,0	0	15 Proben AFS63 im Wechsel mit AFS <sub>ges</sub>
<i>Gesamtsumme Millisilzugabe</i>						126,6		

**Abbildung 63: AFS<sub>ges</sub>- und AFS63-Ablaufkonzentrationen der Teilprüfungen 1 bis 3 (Anlage B)**

oben TRLP, unten IKT; Beladung nach TP 1 bis 3



Quelle: eigene Darstellung, Frankfurt University of Applied Sciences 2022

Der Verlauf der AFS<sub>ges</sub>- und AFS63-Konzentrationen der Teilprüfungen ist nahezu deckungsgleich. Dies zeigt, dass keine groben Feststoffe > 63 µm ausgetragen wurden. Zu erkennen ist auch, dass sich bei keiner Teilprüfung eine Gleichgewichtskonzentration im Ablauf einstellte. Dies ist auf das recht große Volumen der Anlage zurückzuführen, dass sich positiv auf die Ablaufkonzentration auswirkt und bei der Bewertung durch die Mittelwertbildung der jeweils fünf Werte einer Teilprüfung mit einbezogen wird. Die Erfahrung zeigt, dass Anlagenhersteller ihre Anlage so konzipieren, dass die Anlage möglichst nahe an den erforderlichen Prüfwert herankommt. Je größer das Volumen einer Anlage, desto besser ist die Fangwirkung und die Auswirkung auf die Gewässer. Daher wird die Vorgehensweise bei der Bewertung (Mittelwertbildung) in Anlehnung an die DIBt-Prüfung auch für dieses Prüfverfahren vorgeschlagen.

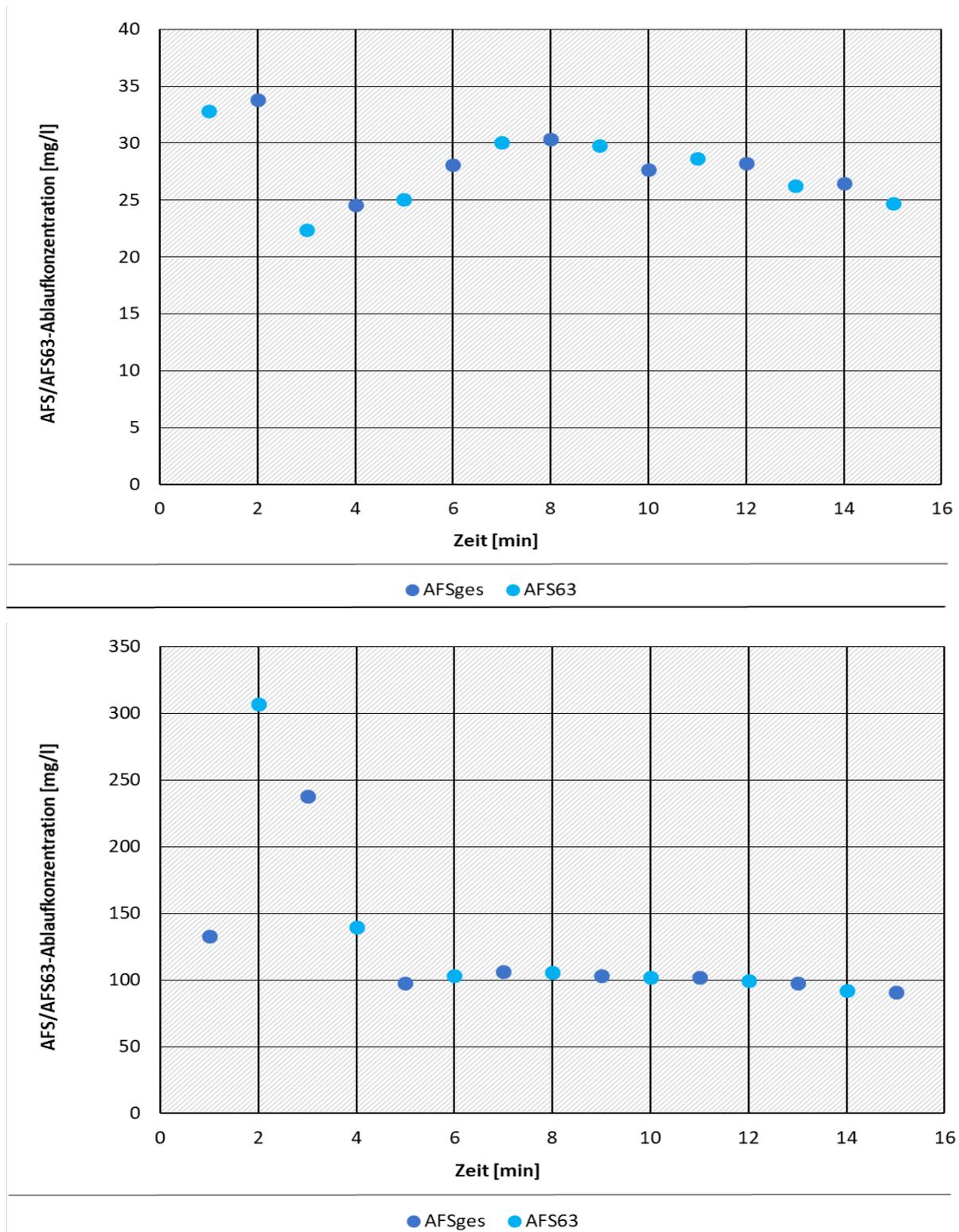
Ein Vergleich der Prüfergebnisse zwischen den beiden Prüfstellen zeigt, dass die Ablaufkonzentrationen nach den Teilprüfungen 1 bis 2 nahezu deckungsgleich sind. Dies wird auch bei den Mittelwerten der AFS63-Ablaufkonzentrationen, -frachten und Wirkungsgraden in Tabelle 34 und Tabelle 35 ersichtlich – die Wirkungsgrade der Teilprüfungen 1 und 2 unterscheiden sich zwischen den Prüfstellen jeweils im Nachkommabereich. Bei der Teilprüfung 3 werden bei der TRLP Würzburg etwas mehr Feststoffe ausgetragen, der Wirkungsgrad unterscheidet sich weniger als 1 %.

Die AFS<sub>ges</sub>- und AFS63-Ablaufproben während des Spülstoßes wurden im Wechsel gezogen. Es zeigt sich, dass auch beim Spülstoß keine groben Feststoffe > 63 µm ausgetragen wurden. Hier unterscheiden sich die Ergebnisse der Prüfstellen etwas. Die bei der TRLP in Würzburg gemessenen Ablaufkonzentrationen liegen mit zunächst etwa 33 mg/l und schließlich etwa 25 mg/l unterhalb der im IKT in Gelsenkirchen gemessenen Konzentrationen, die bis 300 mg/l ansteigen und dann bei etwa 100 mg/l verlaufen.

In Tabelle 34 und Tabelle 35 sind die für die Bewertung relevanten Daten zusammengefasst. Aus dem Millisil-Eintrag von 126,4 kg mit einem Anteil an Partikeln < 63 µm von 49 % ergeben sich rechnerisch jeweils 61,9 kg Eintrag an AFS63.

**Abbildung 64: AFS<sub>ges</sub>- und AFS63-Ablaufkonzentrationen des Spülstoßes (Anlage B)**

oben TRLP, unten IKT; Beladung nach TP 1 bis 3



Quelle: eigene Darstellung, Frankfurt University of Applied Sciences 2022

**Tabelle 34: AFS63-Frachtein- und -austräge, Durchflüsse, Prüfdauer und Konzentrationen als Bewertungsgrundlage für die Prüfung der Anlage B (TRLP) sowie AFS63-Wirkungsgrad je Teilprüfung), Beladung nach TP 1 bis 3**

Teilprüfung	AFS63-Frachteintrag [kg]	Durchfluss [m <sup>3</sup> /h]	Dauer [h]	Volumen [m <sup>3</sup> ]	AFS63-Ab- laufkonzentration [g/m <sup>3</sup> ]	AFS63-Fracht- Austrag [kg]	AFS63- Wirkungs- grad [%]
TP 1	4,61	1,17	8	9,36	33,6	0,315	93,2
TP 2	4,58	2,81	3,33	9,36	75,1	0,703	84,6
TP 3	4,57	11,70	0,8	9,36	218,5	2,045	55,3
Spülstoß	gesamt 61,9	14,04	0,25	3,51	27,5	0,096	-0,2

**Tabelle 35: AFS63-Frachtein- und -austräge, Durchflüsse, Prüfdauer und Konzentrationen als Bewertungsgrundlage für die Prüfung der Anlage B (IKT) sowie AFS63-Wirkungsgrad je Teilprüfung), Beladung nach TP 1 bis 3**

Teilprüfung	AFS63-Frachteintrag [kg]	Durchfluss [m <sup>3</sup> /h]	Dauer [h]	Volumen [m <sup>3</sup> ]	AFS63-Ab- laufkonzentration [g/m <sup>3</sup> ]	AFS63-Fracht- Austrag [kg]	AFS63- Wirkungs- grad [%]
TP 1	4,61	1,17	8	9,36	33,9	0,318	93,1
TP 2	4,58	2,81	3,33	9,36	74,1	0,693	84,8
TP 3	4,57	11,70	0,8	9,36	211,3	1,977	56,8
Spülstoß	gesamt 61,9	14,04	0,25	3,51	135,5	0,476	-0,8

In Tabelle 36 ist schließlich die Bewertung des AFS63-Rückhaltes aufgetragen.

**Tabelle 36: Bewertung der Prüfung (Anlage B; TRLP), Beladung nach TP 1 bis 3**

Bezeichnung	TRLP AFS63-Wirkungsgrad [%]	IKT AFS63-Wirkungsgrad [%]
TP 1	93,2	93,1
TP 2	84,6	84,8
TP 3	55,3	56,8
Mittelwert TP1 bis 3	77,7	78,2
Spülstoß	-0,2	-0,8
Anlage, gesamt	77,5	77,5
System, gesamt, abzüglich Bypass (10%)	69,8	69,7

Aus den Wirkungsgraden der Teilprüfungen ergibt sich ein Mittelwert von  $\eta = 77,7 \%$  bei der TRLP, von  $\eta = 78,2 \%$  beim IKT; abzüglich des Austrages des Spülstoßes ergibt sich in beiden Prüfstellen ein Wirkungsgrad für die Anlage von  $77,5 \%$ .

Wird der nicht geprüfte Bypass von  $10 \%$  mitbewertet, ergibt sich ein Wirkungsgrad von  $69,8 \%$  (TRLP) und von  $69,7 \%$  (IKT), womit das erforderliche Ziel von  $47,2 \%$  AFS63-Rückhalt zur Behandlung von Niederschlagsabflüssen der Flächenkategorie II zur Einleitung in Oberflächengewässer erreicht wäre.

### 8.2.2 Versuchsbeschreibung und Ergebnisse (IKT, Beladung vor TP 1 bis 3)

Um zu zeigen, wie der Verlauf der Beladung auf die Wirksamkeit einer Anlage wirkt, wurde ein Großteil der Beladung vor der eigentlichen Prüfung durchgeführt, vgl. Prüfsetup in Tabelle 37.

**Tabelle 37: Prüfsetup der Anlage B für eine Anschlussfläche von  $1.300 \text{ m}^2$  der Flächenkategorie II mit Teilbeladung vor TP 1 bis 3 (Rundungsfehler)**

		Prüfregenspenden	Prüfdauer	Niederschlagsvolumen	Durchfluss	Millisilzugabe	Millisil-Konzentration	Probenahme
		[l/(s · ha)]	[h]	[m <sup>3</sup> ]	[m <sup>3</sup> /h]	[kg]	[mg/l]	
Tag 1	Beladung	6,0	7,7	21,6	2,81	64,9	3.000	keine
Tag 2	TP1	2,5	8,0	9,4	1,17	9,4	1.000	je 5 Proben auf AFS <sub>ges</sub> und AFS63
Tag 3	TP2	6,0	3,33	9,4	2,81	9,4	1.000	
	TP3	25,0	0,8	9,4	11,7	9,4	1.000	
		Summe TP1 bis TP3		28,1	28,1			
	Beladung	6,0	4,0	11,2	2,81	33,7	3.000	keine
Summe Prüfdauer Tag 3			8,1					
Wartezeit (aus DIBt) 16 bis 24 h								
Tag 4	TP4	1,2 * 25,0	15 min	3,51	14,0	0,0	0	15 Proben AFS63 im Wechsel mit AFS <sub>ges</sub>
Gesamtsumme Millisilzugabe						126,6		

Somit wurde die Anlage mit mehr als einer Halbjahresfracht in TP 1 bis 3 geprüft und der Spülstoß nach Aufbringen der gesamten Jahresfracht durchgeführt.

Die AFS<sub>ges</sub>- und AFS63-Ablaufkonzentrationen der Teilprüfungen 1 bis 3 sind in Abbildung 65, die des Spülstoßes in Abbildung 66, zusammen mit den IKT-Prüfergebnissen aus Kap. 8.2.1 dargestellt.

Der AFS<sub>ges</sub>- und AFS63-Konzentrationen sind jeweils nahezu gleich hoch, das heißt, dass keine Grobanteile ausgetragen werden.

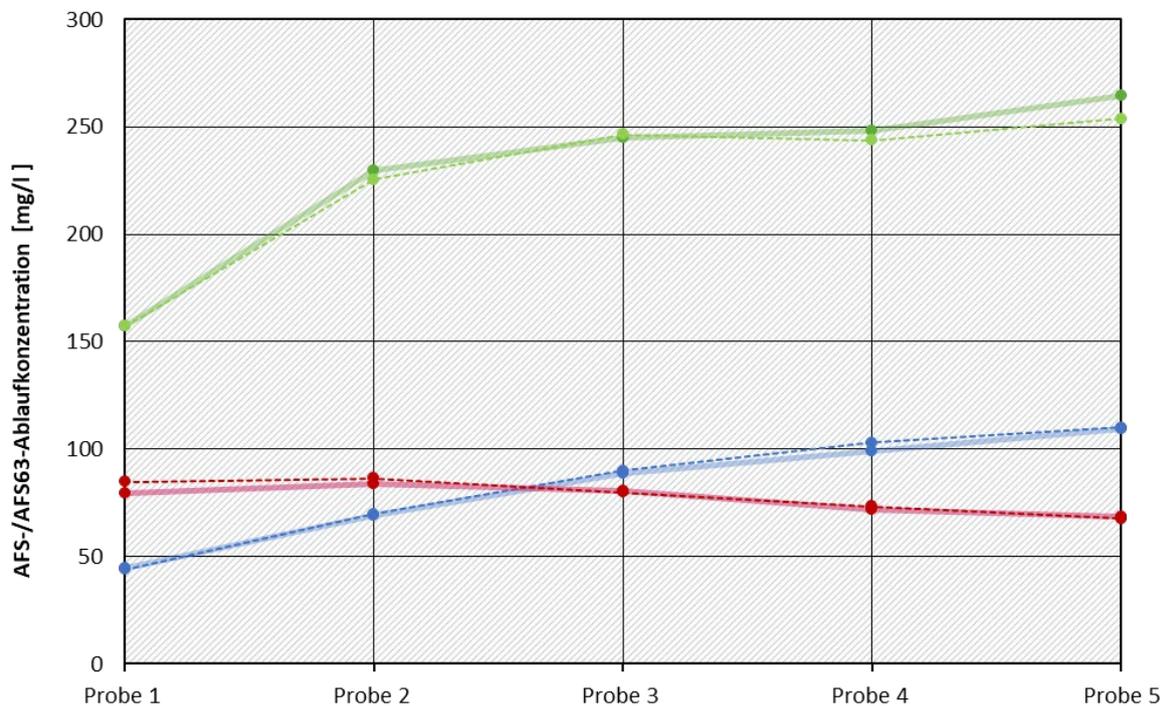
Die Auswirkung des Zeitpunktes der Vorbeladung ist bereits bei der kleinen Prüfregenspende mit einer Intensität von  $2,5 \text{ l/(s · ha)}$  (blaue Kurve) gut zu erkennen. Die Konzentration liegt zu

Beginn der Prüfung bei etwa 80 mg/l und sinkt auf 50 mg/l. Wird die Anlage im sauberen Zustand geprüft, beträgt die Ablaufkonzentration zunächst unter 10 mg/l und steigt auf 50 mg/l. Die Wirksamkeit dieser Teilprüfung verschlechtert sich durch die Vorbeladung von  $\eta = 93,1\%$  auf  $\eta = 84,2\%$ . Die Teilprüfung 2 mit einer Intensität von  $6 \text{ l}/(\text{s} \cdot \text{ha})$  unterscheidet sich dagegen kaum, auch die Wirkungsgrade liegen mit  $\eta = 83,2\%$  bzw.  $84,8\%$  dicht beieinander (siehe auch Tabelle 39). Bei der größten Regenspender mit  $r = 25 \text{ l}/(\text{s} \cdot \text{ha})$ , Teilprüfung 3, liegt die AFS-Konzentration im Ablauf leicht oberhalb des Versuchs mit der sich anschließenden Beladung aus Kap. 8.2.1. Die Wirksamkeit ist etwa 2 % schlechter.

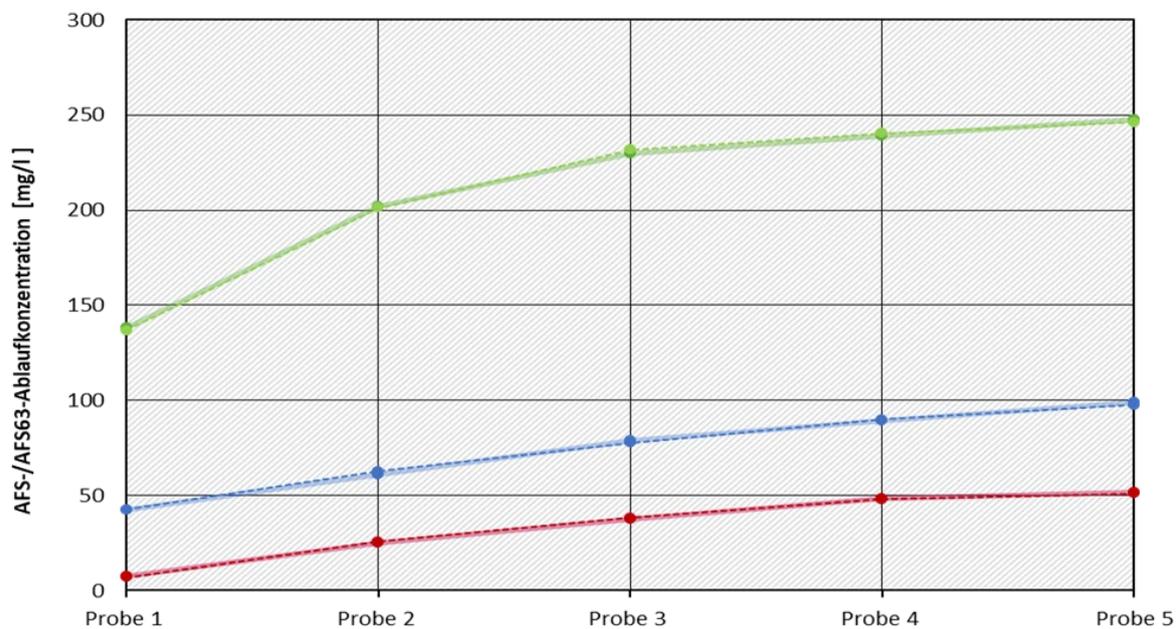
Die Ablaufkonzentrationen des Spülstoßes sind mit etwa 70 bis 100 mg/l geringer als im Versuch mit der Beladung nach den Teilprüfungen aus Kap. 8.2.1 (da: 300 bis 100 mg/l). Dies liegt daran, dass bereits etwas mehr Material mit den Teilprüfungen ausgetragen wurde. Bei der Wirksamkeit des Spülstoßes (AFS63-Austragsfracht im Bezug zur AFS63-Eintragsfracht) macht sich der Unterschied kaum bemerkbar ( $-0,5\%$  im Gegensatz zu  $-0,8\%$ ).

**Abbildung 65: AFS<sub>ges</sub>- und AFS63-Ablaufkonzentrationen der Teilprüfungen 1 bis 3 (Anlage B)**

IKT; oben: Beladung vor TP1 bis 3, unten: Beladung nach TP 1 bis 3



● 25 l/(s · ha) AFSges      - - 25 l/(s · ha) AFS63  
● 6 l/(s · ha) AFSges      - - 6 l/(s · ha) AFS63  
● 2,5 l/(s · ha) AFSges      - - 2,5 l/(s · ha) AFS63

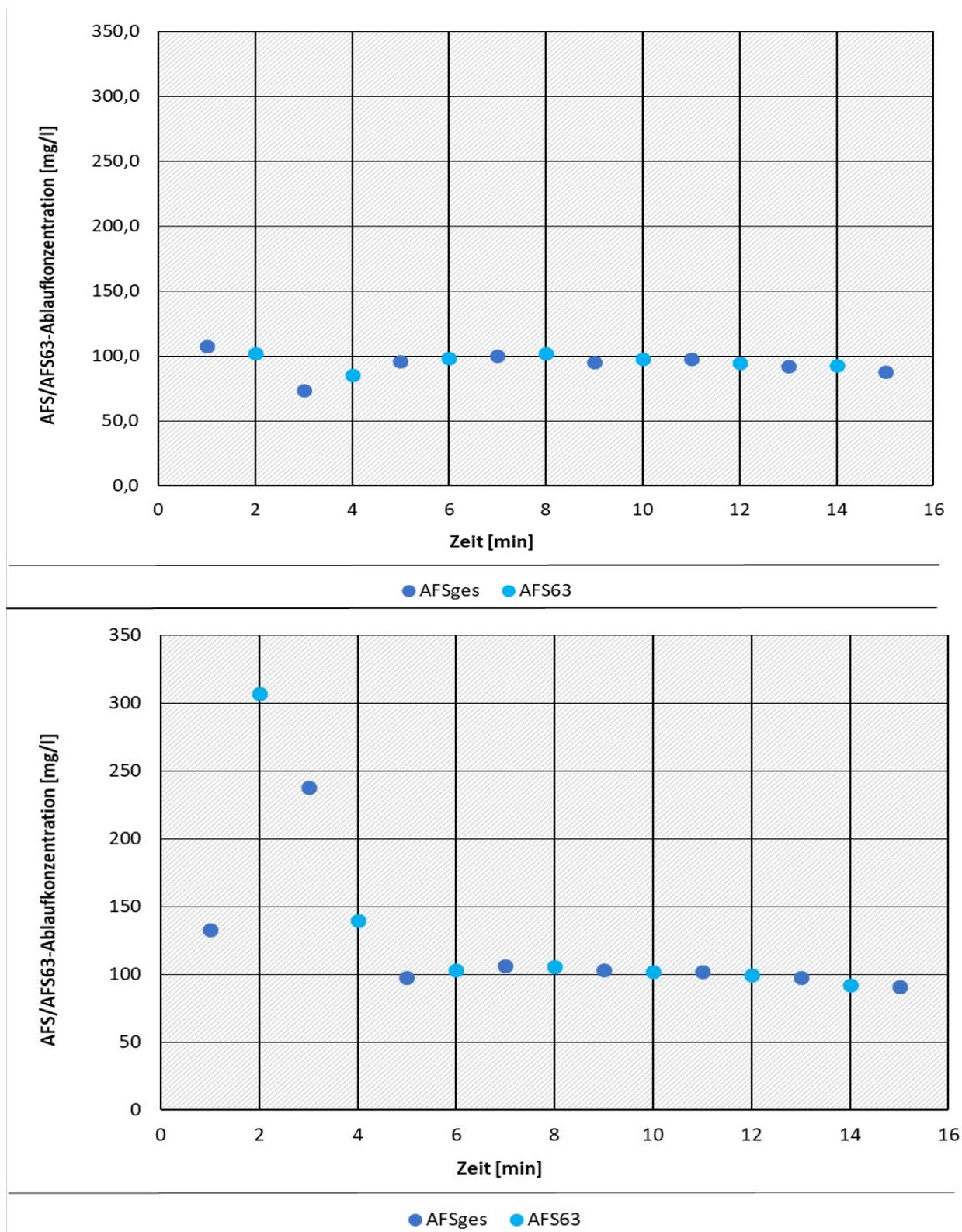


● 25 l/(s · ha) AFSges      - - 25 l/(s · ha) AFS63  
● 6 l/(s · ha) AFSges      - - 6 l/(s · ha) AFS63  
● 2,5 l/(s · ha) AFSges      - - 2,5 l/(s · ha) AFS63

Quelle: eigene Darstellung, Frankfurt University of Applied Sciences 2022

**Abbildung 66: AFS<sub>ges</sub>- und AFS63-Ablaufkonzentrationen des Spülstoßes (Anlage B)**

IKT; oben: Beladung vor TP1 bis 3, unten: Beladung nach TP 1 bis 3



Quelle: eigene Darstellung, Frankfurt University of Applied Sciences 2022

In Tabelle 38 sind die für die Bewertung relevanten Daten zusammengefasst. Aus dem Millisil-Eintrag von 126,7 kg mit einem Anteil an Partikeln < 63 µm von 49 % ergeben sich rechnerisch 62,1 kg Eintrag an AFS63.

Die Bewertung des AFS63-Rückhaltes der Anlage mittels beider Prüfverfahren ist schließlich in Tabelle 39 dargestellt.

**Tabelle 38: AFS63-Frachtein- und -austräge, Durchflüsse, Prüfdauer und Konzentrationen als Bewertungsgrundlage für die Prüfung der Anlage B (IKT) mit der Beladung vor TP 1 bis 3 sowie AFS63-Wirkungsgrad je Teilprüfung**

Teilprüfung	AFS63-Frachteintrag [kg]	Durchfluss [m <sup>3</sup> /h]	Dauer [h]	Volumen [m <sup>3</sup> ]	AFS63-Ablaufkonzentration [g/m <sup>3</sup> ]	AFS63-Fracht-Austrag [kg]	AFS63-Wirkungsgrad [%]
TP 1	4,65	1,17	8	9,36	78,3	0,733	84,2
TP 2	4,63	2,81	3,33	9,36	83,3	0,780	83,2
TP 3	4,59	11,70	0,8	9,36	225,3	2,109	54,0
Spülstoß	gesamt 62,1	14,04	0,25	3,51	96,1	0,337	-0,5

**Tabelle 39: Bewertung der Prüfung mit Teilbeladung vor TP 1 bis 3 (links) und nach TP 1 bis 3 (rechts) Anlage B (IKT)**

Bezeichnung	AFS63-Wirkungsgrad [%] Beladung vor TP 1 bis 3	AFS63-Wirkungsgrad [%] Beladung nach TP 1 bis 3
TP 1	84,2	93,1
TP 2	83,2	84,8
TP 3	54,0	56,8
Mittelwert TP1 bis 3	73,8	78,2
Spülstoß	-0,5	-0,8
Anlage, gesamt	73,3	77,5
System, gesamt, abzüglich Bypass (10%)	65,9	69,7

Der Anlagen-Wirkungsgrad geht durch die Vorbeladung mit der Halbjahresfracht um nur etwa 4 % von  $\eta = 77,5 \%$  auf  $\eta = 73,3 \%$  zurück, da die Anlage B gut konstruiert und unempfindlich gegen Schlammremobilisierungen zu sein scheint. Wird der Bypass mitbewertet, so sinkt der Wirkungsgrad von  $\eta = 69,7 \%$  auf  $\eta = 65,9 \%$ .

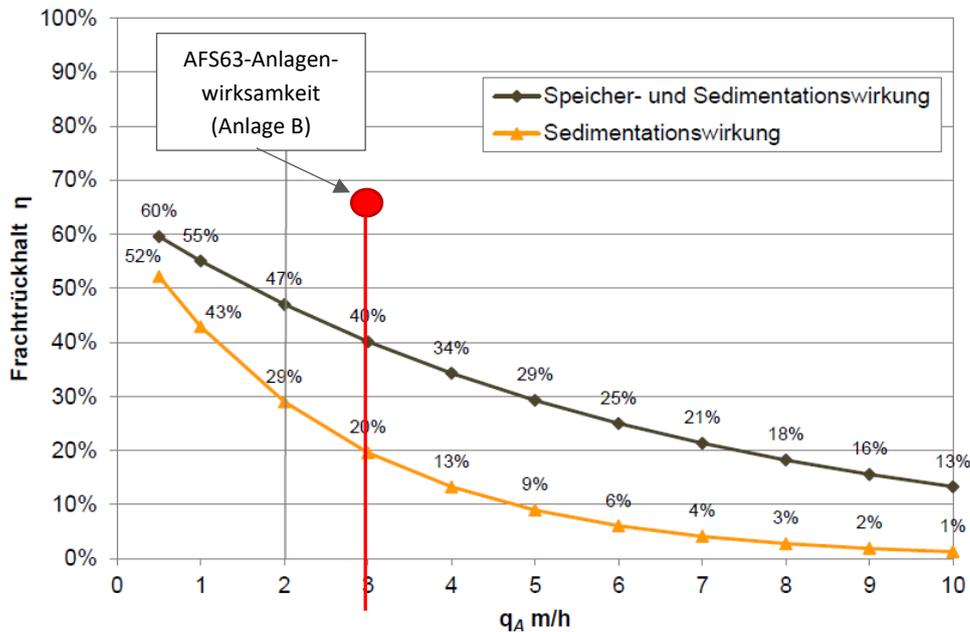
### 8.2.3 Vergleich mit Anlagen im Feld

(Kemper und Fuchs 2018) führten mittels Pumpen den Abfluss aus einem Trennsystem (Straßen, Parkflächen, Wohngebiet, Gewerbegebiet) in einen Container mit Lamellenpaket und beprobten insgesamt 27 Zu- und Ablaufzeiträume mittels Feststoffsammler. Die Oberflächenbeschickung wurde zwischen 1 und 6 m/h eingestellt. Der Median des Glühverlustes der Proben

lag bei ca. 30 %. Die Ergebnisse sind in Abbildung 67 aufgetragen. Zusätzlich ist noch die Speicherwirkung (für leerlaufende Becken) mit aufgetragen, die bei dezentralen Anlagen jedoch eine untergeordnete Rolle spielt.

**Abbildung 67: Feststoffrückhalt eines Schrägklärers (Versuchsanlage) für AFS63 im Trennsystem; Median des Glühverlustes im AFS63: ca. 30 %, n = 27.**

Roter Punkt: in diesem Projekt ermittelter Anlagenwirkungsgrad für Anlage B



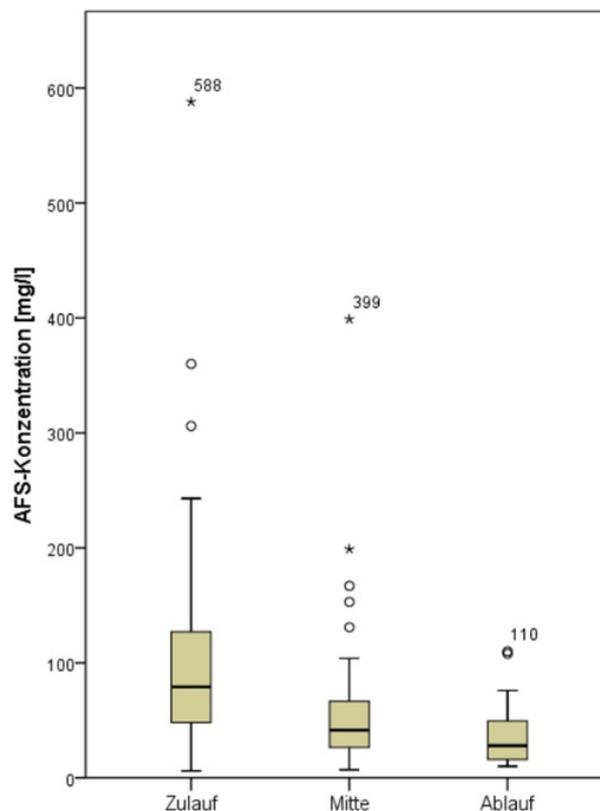
Quelle: Kemper und Fuchs 2018

Die Anlage B ist im Vergleich zu dem im Feld getesteten Schrägklärer deutlich wirksamer bezüglich des AFS63-Rückhaltes. Beim Betrachten der Anlagenkonstruktion fällt auf, dass zusätzlich zur Lamellenfläche noch weitere Oberfläche außerhalb des Lamellenpaketes vorhanden ist und möglicherweise zu einer über die Lamellenwirkung hinausgehende Wirksamkeit beiträgt. Zusätzlich zeigten die Beobachtungen während der Prüfungen ein effektives Abrutschen des Schlammes in den Schlammfang, der auch durch den Spülstoß nicht wieder aufgewirbelt wurde.

Ob im Gegensatz dazu die im Feld getestete Anlage (Lamellen in Container eingebaut als Prototyp) tatsächlich bereits optimiert betrieben wurde, kann nicht beurteilt werden.

An einer über 15 Monate intensiv beprobten Anlage an der Autobahn A 485 mit einer Anschlussfläche von  $A_E = 1$  ha (Lamellenklärer  $q_A = 3$  m/h mit sich anschließender Filterstufe) (Welker et al. 2018) wurden 80 % der Zu- und Abläufe erfasst. Aufgrund von Bepropungslücken kann hier kein gesicherter Wirkungsgrad bestimmt werden. Die Daten deuten aber eher auf einen Feststoffwirkungsgrad in Richtung  $\eta = 50$  % (siehe Abbildung 68) statt auf den in Abbildung 67 gezeigten Wirkungsgrad von 20 % bei einer Oberflächenbeschickung von  $q_A = 3$  m/h hin.

**Abbildung 68: AFS-Konzentrationen im Anlagenzulauf nach der Sedimentationsstufe (Mitte) und im Anlagenablauf; n=41 (Zulauf) bzw. n=40 (Mitte und Ablauf)**



Box: oberes/unteres Quartil, schwarzer Strich in Box: Median; Länge Whisker: 1,5-fache des Interquartilsabstands (IQR); Kreise: Ausreißer (> 1,5-fache des IQR); Sterne: Extremwerte (> 3,0-fache des IQR)

Quelle: Welker et al. 2018

#### 8.2.4 Zusammenfassende Erkenntnisse

Einer Prüfung mit einer Vorbelastung von etwa einem halben Jahr vor der ersten Teilprüfung steht nichts entgegen. Leistungsstarke Anlage können diese Fracht gut zurückhalten. Leistungsschwache Anlagen hingegen werden durch dieses Prüfprozedere identifiziert und erhalten ohne Ertüchtigungsmaßnahmen keine Zulassung.

Letztendlich geklärt werden konnte nicht, warum einige Anlagen im Feld einen viel geringeren, andere aber einen vergleichbar guten Wirkungsgrad aufweisen. Möglicherweise lag der schlechte Wirkungsgrad an der nicht gut konstruierten Prototypanlage. Das Augenmerk der Hersteller sollte auf der Zulaufkonstruktion sowie der Verhinderung einer Remobilisierung des abgesetzten Schlammes liegen. Der Fokus der Betreiber sollte bei Einbau und im Betrieb der Anlagen darin liegen, die Anlage ordnungsgemäß einzubauen und regelmäßig zu entleeren.

Diese Aspekte sind unabhängig vom entwickelten Prüfprozedere, sollten jedoch in einem mit Hilfe des Prüfprozedere erteilten Zertifikat oder einer Zulassung als Teil der Zulassung deutlich gemacht werden.

## 8.3 Anlage C

### 8.3.1 Versuchsbeschreibung (TRLP, Beladung nach TP 1 bis 3)

Als dritte Anlage wurde ein Filterschacht mit Hydrozyklon und Filter (Anlage C) einer Prüfung in der Versuchshalle der TRLP Würzburg unterzogen. Das Wasser wird in den unteren Teil der Anlage gelenkt und in einen Hydrozyklon geleitet. Hier werden die Partikel in eine nach unten gerichtete Strömung geleitet und setzen sich im Sedimentraum ab. Das feststoffarme Wasser strömt dann von unten nach oben durch eine Filtereinheit, in der weiter feine Feststoffe zurückgehalten werden, aber auch gelöste Stoffe sorbiert werden können. Die Anlage C verfügt über eine DIBt-Zulassung, nach der ein AFS-Rückhalt (Millisil) bei einer Anschlussfläche von 500 m<sup>2</sup> von mindestens 92 % erreicht wird. Da das Prüfprozedere unter Zugrundelegung eines gestatteten Bypasses im Feld oberhalb von 25 l/(s · ha) sowie eines geforderten AFS63-Rückhaltes des Gesamtsystems von 47,2 % durchgeführt wird, wurde die zu prüfende Anschlussfläche in Absprache mit dem Hersteller auf 2.000 m<sup>2</sup> erhöht.

Das Versuchssetup ist in Tabelle 40 zusammengestellt.

**Tabelle 40: Prüfsetup der Anlage C für eine Anschlussfläche von 2.000 m<sup>2</sup> der Flächenkategorie II (Ungenauigkeiten durch Rundungsfehler)**

		Prüfregenspenden [l/(s · ha)]	Prüfdauer [h]	Niederschlagsvolumen [m <sup>3</sup> ]	Durchfluss [m <sup>3</sup> /h]	Millisilzugabe [kg]	Millisilkonzentration [mg/l]	Probenahme
Tag 1	TP1	2,5	8,0	14,4	1,8	14,4	1.000	je 5 Proben auf AFS <sub>ges</sub> und AFS63
Tag 2	TP2	6,0	3,33	14,4	4,32	14,4	1.000	
	TP3	25,0	0,8	14,4	18	14,4	1.000	
Summe TP1 bis TP3				43,2	43,2			
	Beladung	6,0	4,0	17,3	4,32	51,8	3.000	keine
Summe Prüfdauer Tag 2			8,1					
Tag 3	Beladung	6,0	7,7	33,3	4,32	99,8	3.000	keine
Wartezeit (aus DIBt) 16 bis 24 h								
Tag 4	TP4	1,2 * 25,0	15 min	5,4	21,6	0,0	0,0	15 Proben AFS63 im Wechsel mit AFS <sub>ges</sub>
Gesamtsumme Millisilzugabe						194,8		

Umgerechnet aus einer AFS63-Beladung von 530 kg AFS/(ha · a) ergeben sich für eine Beaufschlagung mit 90 % der Jahresfracht (10 % der Jahresfracht werden unbehandelt über den Bypass an der Anlage vorbeigeführt) 194,8 kg Millisil, die kontinuierlich mittels Schneckendosierer auf die Anlage gebracht wurden.

43,2 kg Millisil wurden in den Teilprüfungen 1 bis 3 mit den Regenspenden  $r = 2,5, 6$  und  $25 \text{ l}/(\text{s} \cdot \text{ha})$  mit einer Konzentration von  $1.000 \text{ mg}/\text{l}$  aufgebracht. Der Spülstoß wurde mit einem Durchfluss von  $18 \text{ m}^3/\text{h}$  durchgeführt.

**Abbildung 69: Einbau der Anlage C in den Prüfstand. Rechts: Filterelemente von oben**

---



Quelle: G. Arnold, TRLP, Würzburg, 2022

**Abbildung 70: links: Ablauf der kleinen Prüfregenspende, rechts: Spülstoß (Bildquelle: G. Arnold, TRLP, Würzburg)**

---



Quelle: G. Arnold, TRLP, Würzburg, 2022

### 8.3.2 Versuchsbeschreibung (IKT, Beladung vor TP 1 bis 3)

Vor der erneuten Prüfung der Anlage C beim IKT wurde der Schacht gesäubert und eine neue Filtereinheit bestehend aus vier Kartuschen eingesetzt.

**Abbildung 71: Einbau der Anlage C in der Prüfhalle des IKT**

---



Quelle: M. Goerke, IKT, Gelsenkirchen 2022

Das Prüfsetup wurde verändert, in dem an Tag 1 etwa 50 % der Jahresfracht aufgebracht wurde und an Tag 2 mit den Teilprüfungen begonnen wurde (vgl. Tabelle 41).

**Tabelle 41: Prüfsetup der Anlage C für eine Anschlussfläche von 2.000 m<sup>2</sup> der Flächenkategorie II mit Teilbeladung vor TP 1 bis 3 (Ungenauigkeiten durch Rundungsfehler)**

		Prüfregen- spenden	Prüf- dauer	Nieder- schlags- volumen	Durchfluss	Millisil- Zugabe	Millisil- Konzentration	Probe- nahme
		[l/(s · ha)]	[h]	[m <sup>3</sup> ]	[m <sup>3</sup> /h]	[kg]	[mg/l]	
Tag 1	Beladung	6,0	7,7	33,3	4,32	99,8	3.000	keine
Tag 2	TP1	2,5	8,0	14,4	1,8	14,4	1.000	je 5 Proben auf AFS <sub>ges</sub> und AFS63
Tag 3	TP2	6,0	3,33	14,4	4,32	14,4	1.000	
	TP3	25,0	0,8	14,4	18,0	14,4	1.000	
		Summe TP1 bis TP3		43,2	43,2			
	Beladung	6,0	4,0	17,3	4,32	51,8	3.000	keine
Summe Prüfdauer Tag 3			8,1					
Wartezeit (aus DIBt) 16 bis 24 h								
Tag 4	TP4	1,2 * 25,0	15 min	5,4	21,6	0,0	0,0	15 Proben AFS63 im Wechsel mit AFS <sub>ges</sub>
Gesamtsumme Millisilzugabe						194,8		

### 8.3.3 Ergebnisse und Vergleich (Beladung nach und vor TP 1 bis 3)

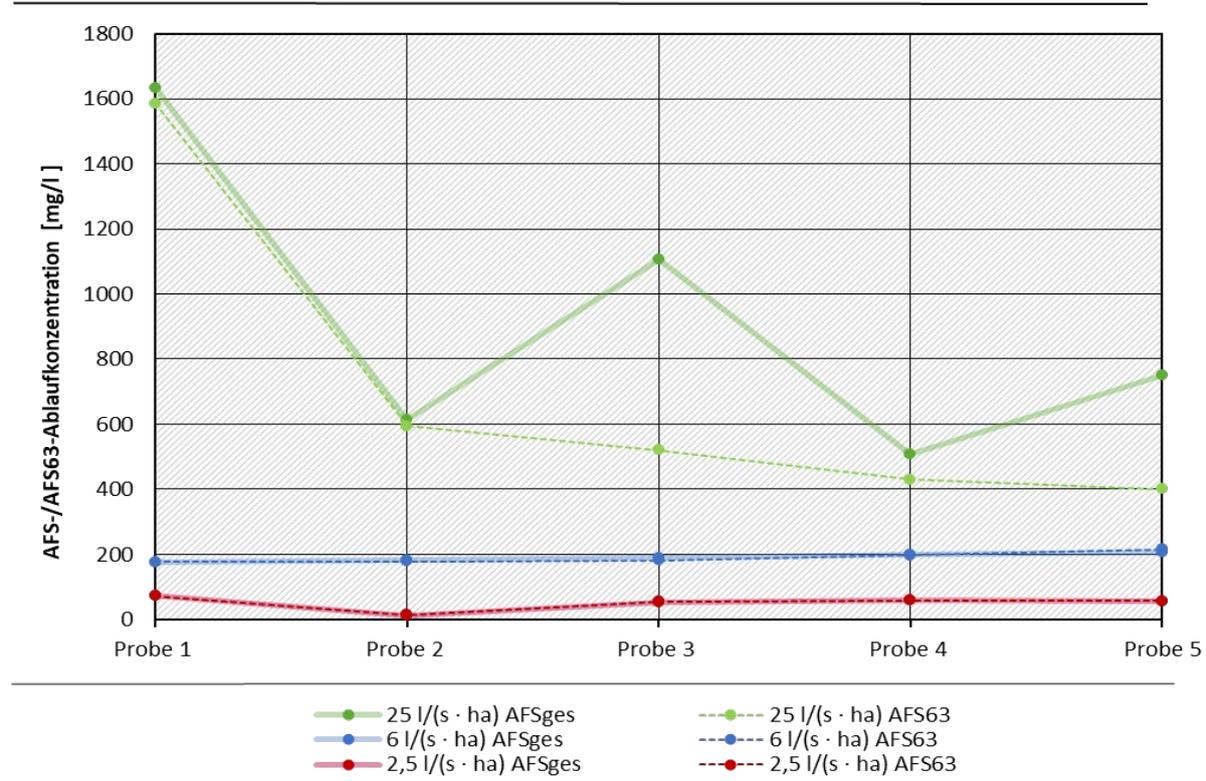
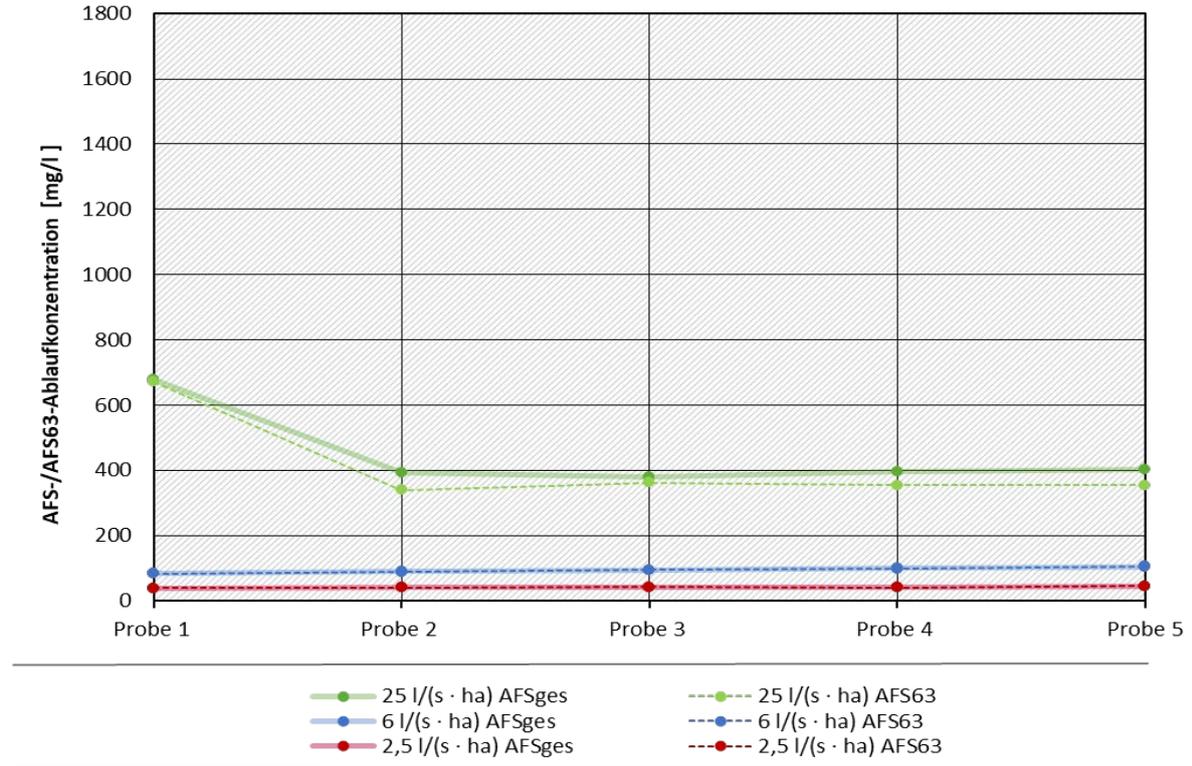
Die AFS<sub>ges</sub>- und AFS63-Ablaufkonzentrationen der Teilprüfungen 1 bis 3 sind für beide Prüfsetups beim IKT und bei der TRLP in Abbildung 72, des Spülstoßes in Abbildung 73, dargestellt.

Der Verlauf der AFS<sub>ges</sub>- und AFS63-Konzentrationen der Teilprüfungen 1 und 2 ist jeweils nahezu deckungsgleich. Dies zeigt, dass bei den kleinen Regenspenden keine groben Feststoffe > 63 µm ausgetragen wurden. Bei der großen Regenspende mit  $r = 25 \text{ l/(s} \cdot \text{ha)}$  ist jeweils bei der ersten Probe ein Spülstoßeffect zu erkennen sowie der Austrag von einem geringen Anteil an groben Feststoffen > 63 µm. In dieser Anlage stellt sich rasch eine Gleichgewichtskonzentration ein.

Die Auswirkung der Vorbeladung mit der Halbjahresfracht ist insbesondere bei der Teilprüfung 3 mit der größten Regenspende deutlich zu sehen. Während die Ablaufkonzentrationen sich im oberen Bild rasch von 600 auf 400 mg/l stabil einstellen, ist im unteren Bild eine Spitze bei 1.600 mg/l zu erkennen. Dies stellte bereits einen deutlichen Austrag bei einer Zulaufkonzentration von 490 mg/l AFS63 (1.000 mg/l Millisil) dar. Es werden auch deutlich grobe Feststoffanteile mit ausgetragen. Zum Schluss der Prüfung beträgt die AFS63-Konzentration ebenfalls etwa 400 mg/l.

**Abbildung 72: AFS<sub>ges</sub>- und AFS63-Ablaufkonzentrationen der Teilprüfungen 1 bis 3 (Anlage C)**

oben: TRLP; Beladung nach TP 1 bis 3; unten: IKT, Beladung vor TP 1 bis 3

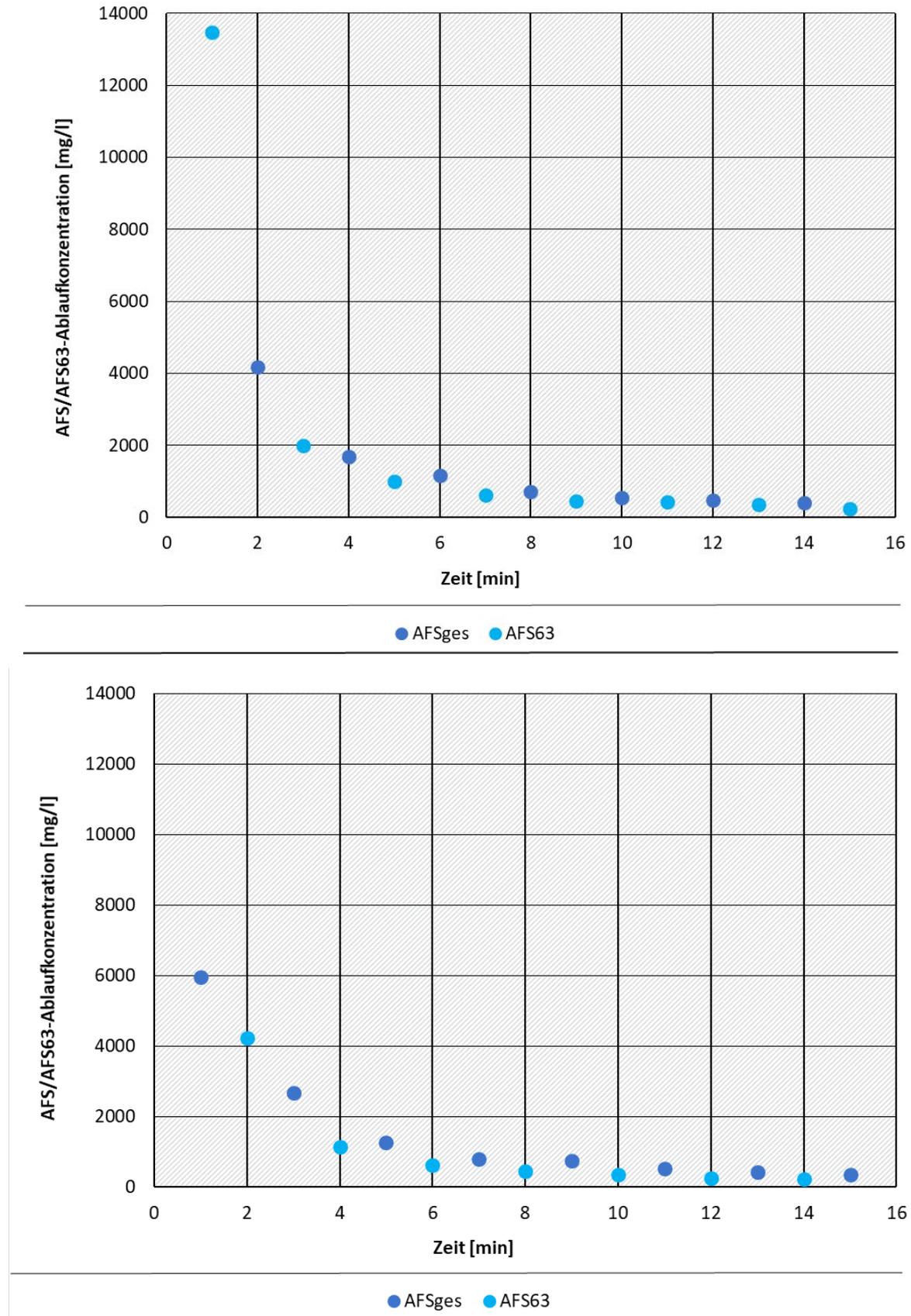


Quelle: eigene Darstellung, Frankfurt University of Applied Sciences 2022

Die AFS<sub>ges</sub>- und AFS63-Ablaufproben wurden während des Spülstoßes im Wechsel gezogen (Abbildung 73).

**Abbildung 73: AFS<sub>ges</sub>- und AFS63-Ablaufkonzentrationen des Spülstoßes (Anlage C)**

oben: TRLP; Beladung nach TP 1 bis 3; unten: IKT, Beladung vor TP 1 bis 3



Quelle: eigene Darstellung, Frankfurt University of Applied Sciences 2022

Es zeigt sich, dass wenige grobe Feststoffe > 63 µm ausgetragen wurden. Insbesondere bei der Beladung direkt vor dem Spülstoß ist in den ersten zwei Minuten ein deutlicher Austrag an Feststoffen aus den Filterelementen zu erkennen. Die Ablaufkonzentration beträgt zunächst fast 14.000 mg/l um sich schließlich einer Konzentration von 300 mg/l zu nähern. Bei der überwiegenden Beladung vor den TP 1 bis 3 wirkt sich der Spülstoß geringer aus – die Ablaufspitze erreicht maximal nur 6.000 mg/l, da einiges an Material bereits mit der TP 3 ausgetragen wurde - und pendelt sich auf eine ähnliche Konzentration ein.

In den Tabelle 43 sind die für die Berechnung der Wirksamkeit relevanten Daten der beiden Prüfungen zusammengestellt. Aus dem Millisil-Eintrag von 194,6 kg mit einem Anteil an Partikeln < 63 µm von 49 % ergeben sich rechnerisch 95,4 kg Eintrag an AFS63.

**Tabelle 42: AFS63-Frachtein- und -austräge, Durchflüsse, Prüfdauer und Konzentrationen als Bewertungsgrundlage für die Prüfung der Anlage C mit der Beladung nach TP 1 bis 3 (TRLP) sowie AFS63-Wirkungsgrad je Teilprüfung**

Teilprüfung	AFS63-Frachteintrag [kg]	Durchfluss [m³/h]	Dauer [h]	Volumen [m³]	AFS63-Ablaufkonzentration [g/m³]	AFS63-Fracht-Austrag [kg]	AFS63-Wirkungsgrad [%]
TP 1	7,13	1,8	8	14,40	41,0	0,590	91,7
TP 2	7,05	4,32	3,33	14,40	93,5	1,347	80,9
TP 3	7,08	18,00	0,8	14,40	416,3	5,995	15,3
Spülstoß	gesamt 95,4	21,60	0,25	5,40	2318,5	12,520	-13,1

**Tabelle 43: AFS63-Frachtein- und -austräge, Durchflüsse, Prüfdauer und Konzentrationen als Bewertungsgrundlage für die Prüfung der Anlage C mit der Beladung vor TP 1 bis 3 (IKT) sowie AFS63-Wirkungsgrad je Teilprüfung), Beladung vor TP 1 bis 3**

Teilprüfung	AFS63-Frachteintrag [kg]	Durchfluss [m³/h]	Dauer [h]	Volumen [m³]	AFS63-Ablaufkonzentration [g/m³]	AFS63-Fracht-Austrag [kg]	AFS63-Wirkungsgrad [%]
TP 1	6,96	1,8	8	14,40	51,5	0,7	89,4
TP 2	7,03	4,32	3,33	14,40	190,0	2,7	61,1
TP 3	7,15	18,00	0,8	14,40	705,8	10,1	-41,8
Spülstoß	gesamt 93,8	21,60	0,25	5,40	1.042,1	5,6	-6,0

In Die Wirkungsgrade der einzelnen Teilprüfungen 1 bis 3 sowie der Mittelwert aus TP 1 bis 3 zeigen deutlich den Einfluss der Vorbelastung. Während der Mittelwert der Wirkungsgrade der Teilprüfungen 1 bis 3 bei einer Beladung nach den TP  $\eta = 62,6 \%$  beträgt, sinkt dieser auf  $\eta = 36,2 \%$ , wenn die Beladung der Halbjahresfracht vor den Teilprüfungen erfolgt. Hier ist ein Remobilisierungseffekt bereits bei der dritten Teilprüfung zu erkennen, dies zeigt sich in dem negativen Wirkungsgrad von  $\eta = -41,8 \%$ . Dafür wird weniger Feststoffmasse mit dem Spülstoß ausgetragen. Der AFS63-Anlagenwirkungsgrad beträgt bei der Beladung nach den TP  $\eta = 49,5 \%$ ,

bei der Beladung vor den TP ist er mit  $\eta = 30,2 \%$  deutlich geringer. Der Bypass reduziert die Gesamtbewertung entsprechend der Formel um 10 % auf einen AFS63-Wirkungsgrad von  $\eta = 44,6 \%$  resp.  $\eta = 27,2 \%$ .

Tabelle 44 ist schließlich die Bewertung des AFS63-Rückhaltes beider Prüfungen aufgetragen.

Die Wirkungsgrade der einzelnen Teilprüfungen 1 bis 3 sowie der Mittelwert aus TP 1 bis 3 zeigen deutlich den Einfluss der Vorbelastung. Während der Mittelwert der Wirkungsgrade der Teilprüfungen 1 bis 3 bei einer Beladung nach den TP  $\eta = 62,6 \%$  beträgt, sinkt dieser auf  $\eta = 36,2 \%$ , wenn die Beladung der Halbjahresfracht vor den Teilprüfungen erfolgt. Hier ist ein Remobilisierungseffekt bereits bei der dritten Teilprüfung zu erkennen, dies zeigt sich in dem negativen Wirkungsgrad von  $\eta = -41,8 \%$ . Dafür wird weniger Feststoffmasse mit dem Spülstoß ausgetragen. Der AFS63-Anlagenwirkungsgrad beträgt bei der Beladung nach den TP  $\eta = 49,5 \%$ , bei der Beladung vor den TP ist er mit  $\eta = 30,2 \%$  deutlich geringer. Der Bypass reduziert die Gesamtbewertung entsprechend der Formel um 10 % auf einen AFS63-Wirkungsgrad von  $\eta = 44,6 \%$  resp.  $\eta = 27,2 \%$ .

**Tabelle 44: Bewertung der Prüfung (Anlage C; TRLP: Beladung nach TP 1 bis 3; IKT: Beladung vor TP 1 bis 3)**

Bezeichnung	AFS63-Wirkungsgrad [%] Beladung nach TP 1bis 3 (TRLP)	AFS63-Wirkungsgrad [%] Beladung vor TP 1bis 3 (IKT)
TP 1	91,7	89,4
TP 2	80,9	61,1
TP 3	15,3	-41,8
Mittelwert TP1 bis 3	62,6	36,2
Spülstoß	-13,1	-6,0
Anlage, gesamt	49,5	30,2
System, gesamt, abzüglich Bypass (10%)	44,6	27,2

### 8.3.4 Zusammenfassende Erkenntnisse

Für die Prüfung mit dem neu konzipierten Prüfsetup wurde die Anschlussfläche nach Abstimmung mit dem Hersteller erhöht auf 2.000 m<sup>2</sup> (vierfache Fläche im Vergleich zur durch das DIBt zugelassenen Anlage).

Wird die Jahresfracht nach den Teilprüfungen 1 bis 3 und vor dem Spülstoß aufgebracht, so ergibt sich ein AFS-Gesamtsystemwirkungsgrad 44,6 %. Durch den Spülstoß werden 13 % der eingetragenen Fracht wieder ausgeschwemmt.

Bei einer Teilbeladung vor den Teilprüfungen 1 bis 3 lässt sich bei TP 3 mit 25 l/(s · ha) bereits ein Remobilisierungseffekt erkennen (siehe Abbildung 72). Dafür ist der Feststoffaustrag mit dem Spülstoß mit zu Beginn 6.000 mg/l moderater als im Versuch mit der Beladung nach den TPs mit 14.000 mg/l AFS im Ablauf. Der Wirkungsgrad geht insgesamt nach einer Vorbelastung mit der Halbjahresfracht deutlich zurück auf 27 %.

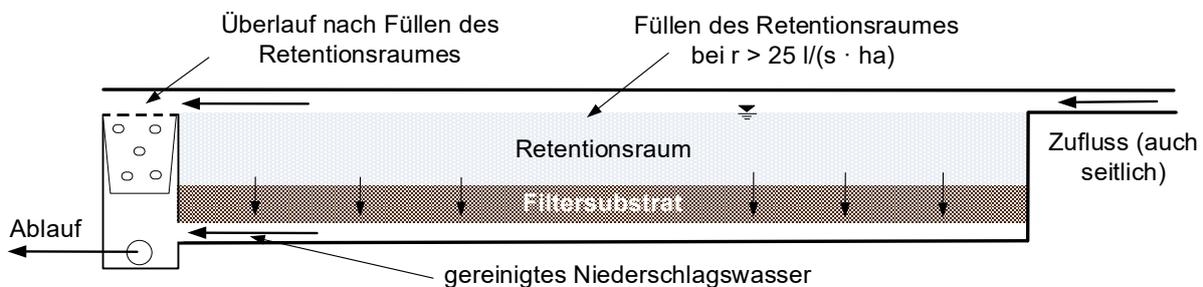
Der erforderliche Wirkungsgrad von  $\eta = 47,2 \%$ , um die Vorgabe des DWA-A 102 bei einer Flächenkategorie II zu erfüllen, kann aber auch mit einer Prüfung an einer sauberen Anlage nicht

erreicht werden, was zum einen zeigt, dass die Anschlussfläche für dieses Prüfsetup zu groß gewählt wurde und zum anderen, dass das Prüfsetup sensibel genug ist, die Grenze der Wirksamkeit von dezentralen Anlagen zu erfassen.

## 8.4 Anlage D

Eine Substratfilterrinne (Anlage D) wurde als vierte Behandlungsanlage in der IKT Versuchshalle in Gelsenkirchen getestet. Die Rinne verfügt über eine DIBt-Zulassung, nach der ein AFS-Rückhalt (Millisil) bei einer Anschlussfläche von 17 bis 18,5 m<sup>2</sup>/lfm von mindestens 92 % erreicht wird. Feldergebnisse zeigen, dass die Leistungsfähigkeit bezüglich Feststoffen sogar bis zu 100 % betragen kann. Ein Bypass ist für die Einleitung in das Grundwasser nicht vorgesehen. In NRW werden jedoch Rinnen mit einem Bypass zur Einleitung in Oberflächengewässer verwendet, vgl. Abbildung 74. Bei einer höheren als der Bemessungsregenspende wird der Filterkörper überströmt, der Wasserspiegel steigt so weit an, bis der Überlauf anspringt und teils gereinigtes und ungereinigtes Niederschlagswasser in das Gewässer abgeleitet wird.

**Abbildung 74: Anlage D mit Überstau und Bypass**



Quelle: eigene Darstellung, Frankfurt University of Applied Sciences 2022

### 8.4.1 Versuchsbeschreibung und Ergebnisse (IKT, Beladung nach TP 1 bis 3)

Für die Prüfung wurde ein halber Rinnenkörper hergestellt und gemäß den Vorgaben des Herstellers mit einer Anschlussfläche von 31 m<sup>2</sup> vorgesehen. Der Überlauf wurde entsprechend der Abbildung 75 links und der Quelle: M. Goerke, IKT Gelsenkirchen 2022

Abbildung 77 links realisiert und konnte zusammen mit dem Ablauf nach Durchströmen der Rinne beprobt werden. Dies bedeutet, dass der Spülstoß in Analogie zu den DIBt-Zulassungsgrundsätzen mit einer hohen Prüfregenspende ( $r = 100 \text{ l}/(\text{s} \cdot \text{ha})$ ) durchgeführt wurde. Der Überstau wurde mittels Drucksonde erfasst, um Aussagen über das Anspringen des Bypasses zu erhalten.

Das Versuchssetup ist in Tabelle 45 zusammengestellt.

Umgerechnet aus einer AFS63-Beladung von 530 kg AFS/(ha · a) ergeben sich für eine Beaufschlagung mit der gesamten Jahresfracht 3,353 kg Millisil, die gleichmäßig auf die schräge Teflonfläche gemäß der Hinweise für die Prüfung von Rinnen (DIBt 2019) aufgebracht und gleichmäßig abgerechnet wurden.

0,67 kg Millisil wurden in den Teilprüfungen 1 bis 3 mit den Regenspenden  $r = 2,5, 6$  und  $25 \text{ l}/(\text{s} \cdot \text{ha})$  mit einer Konzentration von 1.000 mg/l aufgebracht. Im Anschluss an die Teilprüfungen 1 bis 3 wurde die restliche Beladung aufgebracht.

**Abbildung 75:** linkes Bild: Einbau der Anlage D in den Prüfstand mit Überstau und Bypass; rechtes Bild: Blick von oben in die Rinne mit angeschlossener Teflonfläche und Überstausonde am unteren Bildrand



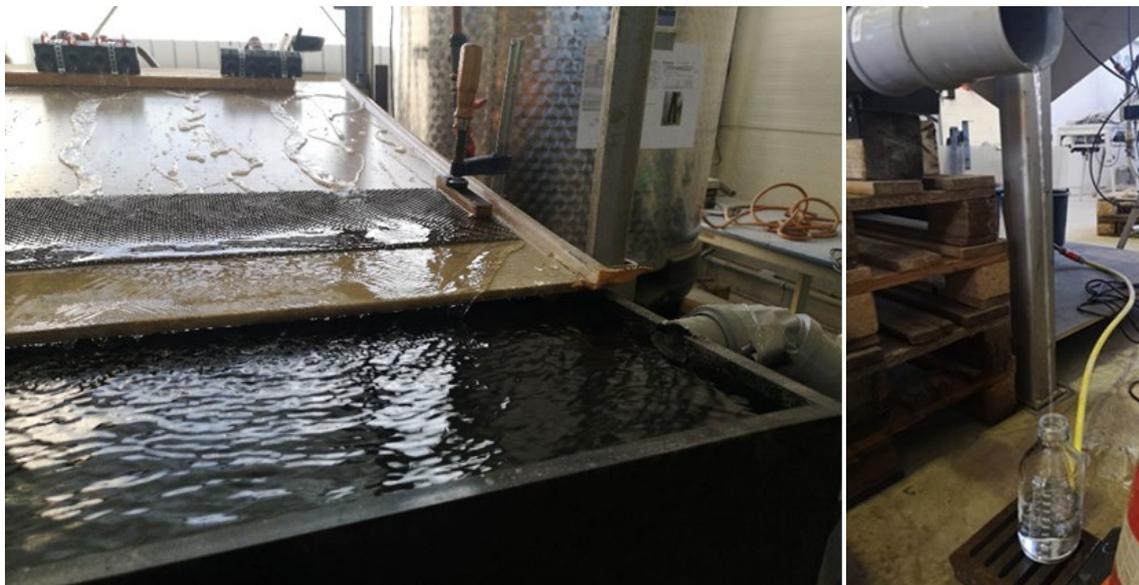
Quelle: M. Goerke, IKT Gelsenkirchen 2022

**Abbildung 76:** linkes Bild: Beregnungsanlage; rechtes Bild: Aufgabe eines Teils der Millisil-Jahresfracht



Quelle: M. Goerke, IKT Gelsenkirchen 2022

**Abbildung 77:** linkes Bild: Aufbringen des Spülstoßes mittels Gartenschläuchen (im Hintergrund); Vergleichmäßigung des Zustromes durch Gitter (in der Bildmitte); Anstau und Überlauf (im Vordergrund); rechtes Bild: Probennahme



Quelle: M. Goerke, IKT Gelsenkirchen 2022

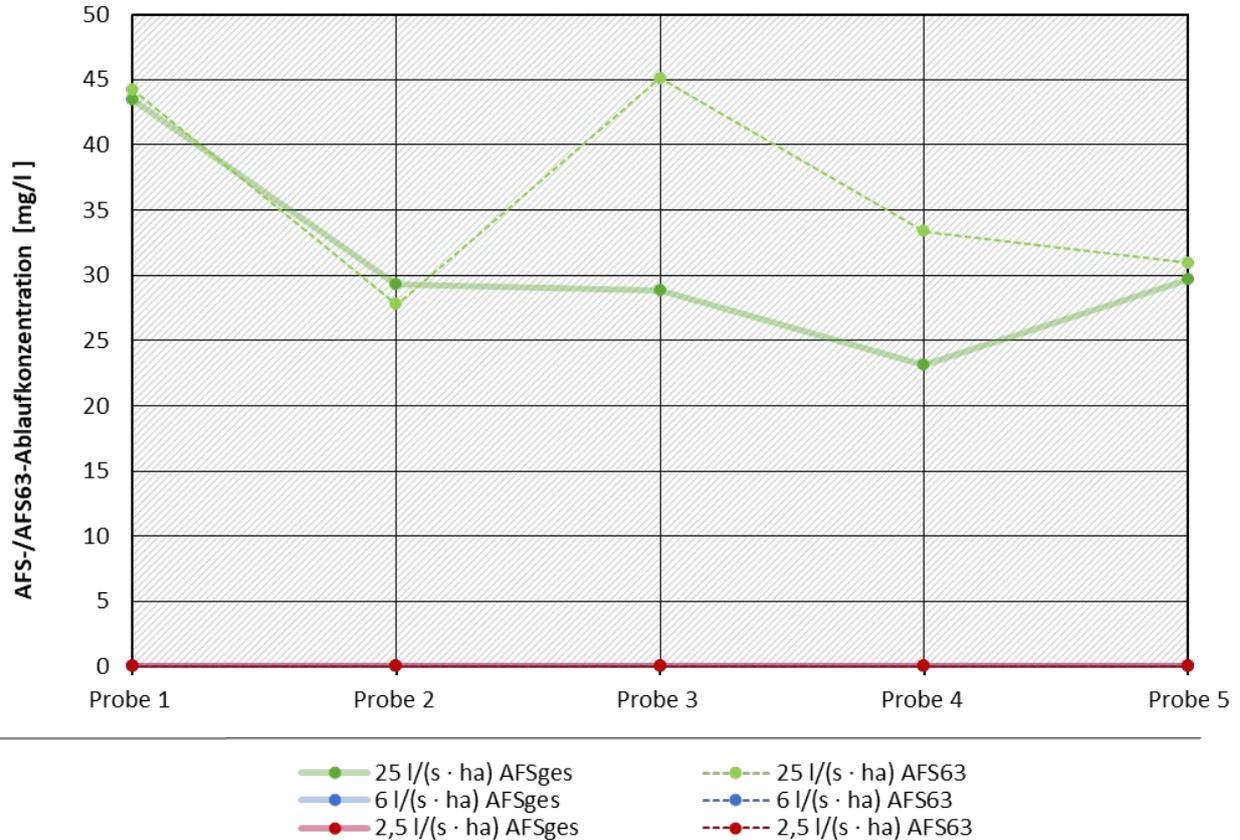
**Tabelle 45:** Prüfsetup der Anlage D für eine Anschlussfläche von 31 m<sup>2</sup> der Flächenkategorie II (Ungenauigkeiten durch Rundungsfehler)

		Prüfregenspenden	Prüfdauer	Niederschlagsvolumen	Durchfluss	Millisilzugabe	Millisil-Konzentration	Probennahme
		[l/(s · ha)]	[h]	[m <sup>3</sup> ]	[m <sup>3</sup> /h]	[kg]	[mg/l]	
Tag 1	TP1	2,5	8,0	0,223	0,0279	0,223	1.000	je 5 Proben auf AFS <sub>ges</sub> und AFS63
Tag 2	TP2	6,0	3,33	0,223	0,0670	0,223	1.000	
	TP3	25,0	0,8	0,223	0,2790	0,223	1.000	
		Summe TP1 bis TP3		0,67	0,67			
	Beladung	6,0	4,5	0,301	0,0670	0,904	3.000	keine
Summe Prüfdauer Tag 2			8,6					
Tag 3	Beladung	6,0	8,86	0,593	0,0670	1,780	3.000	keine
Wartezeit (aus DIBt) 16 bis 24 h								
Tag 4	TP4	100,0	15 min	0,279	1,1160	0,0	0,0	15 Proben AFS63 im Wechsel mit AFS <sub>ges</sub>
Gesamtsumme Millisilzugabe						3,353		

Die AFS<sub>ges</sub>- und AFS63-Ablaufkonzentrationen der Teilprüfungen 1 bis 3 sind in Abbildung 78, des Spülstoßes in Abbildung 79, dargestellt.

**Abbildung 78: AFS<sub>ges</sub>- und AFS63-Ablaufkonzentrationen der Teilprüfungen 1 bis 3 (Anlage D)**

TRLP; Beladung nach TP 1 bis 3

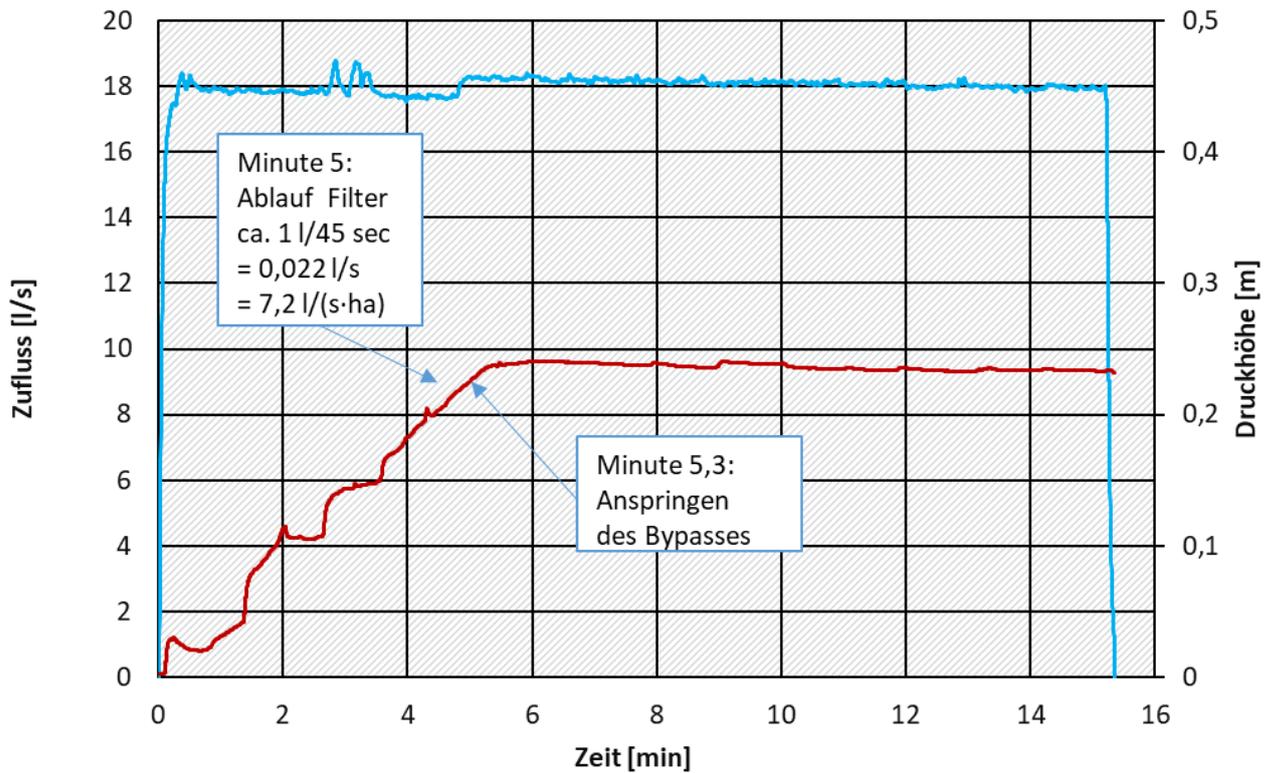


Quelle: eigene Darstellung, Frankfurt University of Applied Sciences 2022

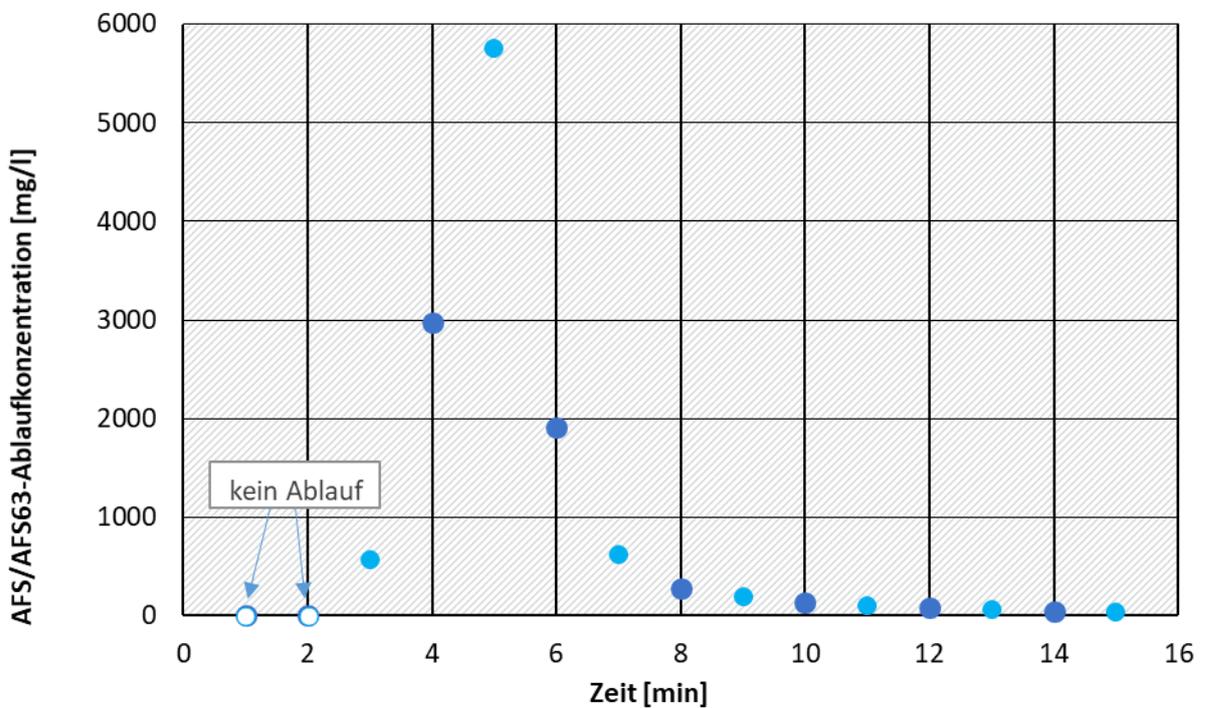
Die AFS<sub>ges</sub>- und AFS63-Konzentrationen der Teilprüfungen 1 und 2 lagen jeweils bei 0 bzw. bei der Auswiegung der Filter und Differenzbildung um den Nullpunkt herum (leicht positive, leicht negative Werte). Die Rinne ist bei kleinen Regenspenden also sehr effizient. Bei der großen Regenspende der Teilprüfung 3 mit  $r = 25 \text{ l/(s} \cdot \text{ha)}$  wurden 30 bis 40 mg/l AFS<sub>ges</sub> und AFS63 ausgetragen, vgl. Abbildung 78, was im Vergleich zu den anderen geprüften Anlagen deutlich geringer ist.

Es zeigt sich, dass auch beim Spülstoß keine groben Feststoffe  $> 63 \mu\text{m}$  ausgetragen wurde, vgl. Abbildung 79, oben. In den ersten zwei Minuten fand kein Ablauf statt, in dieser Zeit füllte sich zunächst der Überstauraum. Die Ablaufkonzentration in Probenummer 5 stieg aufgrund des Anspringens des Bypasses und Austrags von abgelagertem Material kurz auf fast 6.000 mg/l, um sich schließlich bei etwa 40 mg/l einzupendeln. Die Ablaufmenge durch den Filter kurz vor Anspringen des Bypasses kann abgeschätzt werden mit Hilfe der Angabe, dass das Füllen einer 1-l-Flasche in etwa 45 sec erfolgte ( $= 0,022 \text{ l/s}$  entspricht  $7,2 \text{ l/(s} \cdot \text{ha)}$ ). Durch die dann noch etwas gestiegene Druckhöhe wird vermutet, dass etwas mehr Wasser durch das Filtersubstrat gelangte, nicht aber der für eine Regenspende von  $25 \text{ l/(s} \cdot \text{ha)}$  konzipierte Bypass, da die Durchlässigkeit des Filtermaterials durch die Beladung mit einer Jahresfracht bereits stark herabgesetzt war.

Abbildung 79: Zufluss und Druckhöhe (oben) sowie AFS<sub>ges</sub>- und AFS63-Ablaufkonzentrationen des Spülstoßes (unten) (Anlage D)



— Zufluss [l/min] — Druckhöhe [m]



● AFS<sub>ges</sub> ● AFS63

Quelle: eigene Darstellung, Frankfurt University of Applied Sciences 2022

Für weitere Prüfungen und das Prüfprozedere wurde beschlossen, die Beladung an den Anfang des Prüfprozesses zu stellen, um die Folgen (Kolmation bei Filtern, Füllung des Sedimentationsraums bei Sedimentationsanlagen) zu erfassen.

In Tabelle 46 sind die für die Bewertung relevanten Daten zusammengefasst. Aus dem Millisil-Eintrag von 3,353 kg mit einem Anteil an Partikeln < 63 µm von 49 % ergeben sich rechnerisch 1,643 kg Eintrag an AFS63.

**Tabelle 46: AFS63-Frachtein- und -austräge, Durchflüsse, Prüfdauer und Konzentrationen als Bewertungsgrundlage für die Prüfung der Anlage D sowie AFS63-Wirkungsgrad je Teilprüfung**

Teilprüfung	AFS63-Frachteintrag [kg]	Durchfluss [m³/h]	Dauer [h]	Volumen [m³]	AFS63-Ablaufkonzentration [g/m³]	AFS63-Fracht-Austrag [kg]	AFS63-Wirkungsgrad [%]
TP 1	0,109	0,03	8	0,22	0,0	0,000	100,0
TP 2	0,109	0,07	3,33	0,22	0,0	0,000	100,0
TP 3	0,109	0,28	0,8	0,22	36,3	0,0081	92,6
Spülstoß	gesamt 1,643	1,12	0,25	0,28	917	0,2558	-0,2

In Tabelle 47 ist schließlich die Bewertung des AFS63-Rückhaltes aufgetragen. Der Bypass ist in dieser Bewertung bereits enthalten.

**Tabelle 47: Bewertung der Prüfung (Anlage D)**

Bezeichnung	AFS63-Wirkungsgrad [%] Beladung nach TP 1 bis 3
TP 1	100,0
TP 2	100,0
TP 3	92,6
Mittelwert TP1 bis 3	97,5
Spülstoß	-0,2
Anlage und System, gesamt	97,4

Daher ergibt sich ein Wirkungsgrad sowohl für die Anlage als auch für das System von 97,4 %. Die Anlage erreicht damit das erforderliche Ziel von 47,2 % AFS63-Rückhalt zur Behandlung von Niederschlagsabflüssen der Flächenkategorie II zur Einleitung in Oberflächengewässer. Ein etwas höherer Austrag ist bei der Beladung der Halbjahresfracht vor den Teilprüfungen zu erwarten.

#### **8.4.2 Zusammenfassende Erkenntnisse**

Für weitere Prüfungen und das Prüfprozedere wurde beschlossen, die Beladung mit einer Halbjahresfracht an den Anfang des Prüfprozesses zu stellen, um die Folgen (Kolmation bei Filtern, Füllung des Sedimentationsraums bei Sedimentationsanlagen) zu erfassen.

Zu diskutieren ist die Bewertung des Ablaufs, wenn der Abfluss zu Beginn der Prüfung noch nicht die Höhe des Zulaufs erreicht hat. Dies war in der vorliegenden Prüfung in Minute 3 des Spülstoßes der Fall (vgl. Tabelle 65 und Abbildung 79) – hier konnte keine gesamte Flasche befüllt werden. Da der Ablauf nicht gemessen wurde, ist eine exakte Bewertung des Frachtaustrages in diesem Fall nicht möglich. Der Austrag während des Spülstoßes war tatsächlich etwas geringer und somit die Wirksamkeit der Anlage und des gesamten Systems um abgeschätzt maximal 1 % besser. Eine Ablaufmessung verteuert die Prüfung entsprechend, der Hersteller könnte darüber entscheiden, ob sie eingebaut werden soll.

Im Fall der erwarteten Rinnentypen (viel durchlässigere Substrate als die geprüfte Anlage oder Anlagen ohne Substrat) wird davon ausgegangen, dass sich der Ablauf entsprechend des Zulaufs rasch einstellt. Diejenigen Anlagen, die mit einem wenig durchlässigen Substrat ausgestattet sind, fallen sowieso unter den Anlagentyp „Filter“ und können in Zukunft alternativ über die Filtergeschwindigkeit gemäß DWA-M 179 bewertet werden. Hier ist allerdings offen, für welchen Betriebszustand die Filtergeschwindigkeit gelten soll (sauberes Substrat oder belegtes Substrat nach x Jahren) und wie eine Kolmation detektiert werden soll. Diese Betrachtung ist aber nicht Gegenstand des vorliegenden Forschungsvorhabens.

## 9 Fazit und offene Punkte

Aus theoretischen Überlegungen heraus und als Ergebnis von systematischen Absetzversuchen konnte ein erster Entwurf für ein neues Prüfverfahren für dezentrale Behandlungsanlagen zur Einleitung in ein Oberflächengewässer erarbeitet werden. Eine mögliche Formulierung als Zulassungsgrundlage ist diesem Bericht als Anlage D beigelegt. Festgelegt wurden

- ▶ Prüfkonzentration  $c = 1000 \text{ mg/l}$

Der in Absetzversuchen ermittelte Einfluss der Konzentration auf die Wirksamkeit konnte in systematischen Versuchen an zwei realen Anlagen in den Prüfstellen nicht bestätigt werden.

- ▶ Prüfstoff (Millisil W 4).

In weiteren Absetzversuchen konnte die bessere Wirksamkeit von mineralischem Millisil im Vergleich zu realen Stäuben nach einer Absetzzeit von mehr als 8 min nicht gezeigt werden. Der zunächst angedachte Dichtefaktor ist daher obsolet. Da fraktionierte, in der Dichte bestimmte, reale Straßenstäube nur sehr aufwändig zu generieren sind, wird ein Vergleich einer Prüfung in realen Anlagen nicht möglich sein. Stattdessen könnten in Zukunft Versuche an kleinen, durchflossenen Säulen ( $d = 8 \text{ cm}$  z. B.) mit Stäuben ( $< 1 \text{ kg}$ ) und Millisil durchgeführt werden, um den Unterschied zu quantifizieren. Möglich sind auch CFD-Simulationen, die allerdings auch der Kalibrierung bedürfen und in denen Remobilisierungseffekte nicht nachzustellen sind.

- ▶ Regenspenden der Teilprüfungen mit  $r = 2,5, 6$  und  $25 \text{ l/(s} \cdot \text{ha)}$

Die Prüfregenspenden orientieren sich an den Prüfregenspenden des DIBt, die die Bandbreite der deutschen Regencharakteristiken (Auswertung 1953 – 1980 und 1993 – 2000 (Meißner 2008)) wiedergibt.

- ▶ Höhe des Spülstoßes

Die kritische Regenspende wurde im Vergleich zu zentralen Bauwerken etwas höher, auf  $r_{\text{krit}} = 25 \text{ l/(s} \cdot \text{ha)}$  für den maximalen Durchfluss, festgesetzt. Der Spülstoß erfolgt mit einem Zuschlag von 20 % ( $= 1,2 r_{\text{krit}}$ ). Der Spülstoß wird voll bewertet, da ein Regen dieser Intensität und Dauer mehrmals im Jahr vorkommen kann. Anlagen mit internem Notüberlauf und Anlagen die überströmt werden, werden mit  $r_{\text{krit}} = 100 \text{ l/(s} \cdot \text{ha)}$  geprüft.

- ▶ Aufgabe von 90 % der Jahresfracht (Annahme 10 % der Jahresfracht gehen unbehandelt als Bypass an der Anlage vorbei). Der unbehandelte Bypass wird bei der Bewertung des Systems mitberücksichtigt.
- ▶ Da durch die Teilprüfungen nicht die ganze Jahresfracht aufgegeben wird, wird die fehlende Beladung der Anlage ohne Messung der Ablaufkonzentration zugeführt.

Das Prüfkonzept wurde in zwei Prüfstellen in insgesamt vier Anlagen mit unterschiedlicher Verfahrenstechnik angewendet. Dabei zeigte sich, dass eine Vorbelastung vor den eigentlichen Prüfungen sinnvoll ist. Das Prüfkonzept wurde dahingehend abgewandelt.

- ▶ Die Beladung mit einer Halbjahresfracht (mit einer Regenspende von  $r = 6 \text{ l/(s} \cdot \text{ha)}$  und einer Zulaufkonzentration von  $C = 3.000 \text{ mg/l}$ ) wird der Anlage vor den Teilprüfungen zugeführt.
- ▶ Bei der Beladung wird ähnlich viel Material ausgetragen wie bei dem eigentlichen Versuch, vgl. Abbildung 80. Die Übertragung der Bewertung der Teilprüfungen, bei der etwa 22 %

bzw. die Fracht von 3 Monaten in die Anlage dosiert wird, auf eine Jahreswirksamkeit ist damit zutreffend.

- ▶ Die Wirksamkeit der Anlage wird mittels Wirksamkeit der Teilprüfungen, des Spülstoßes sowie des unbehandelten Bypasses berechnet. Hierbei ist jeweils Bezug auf den Feinanteil AFS63 zu nehmen.

Mit der Durchführung der Prüfungen konnten verschiedene Aspekte gezeigt werden:

- ▶ Der Vergleich zwischen den Prüfstellen mit dem gleichen Prüfsetup ist gelungen. Die vergleichende Prüfung an einer Anlage ergab exakt den gleichen Wirkungsgrad und ist somit objektiv durchführbar und wiederholbar.
- ▶ Die Vorbeladung mit einer Halbjahresfracht vor der eigentlichen Prüfung bewirkt nur einen geringen Rückgang des Wirkungsgrades bei leistungsstarken, gut konzipierten Anlagen. Anlagen mit guter Wirksamkeit und vor allem unempfindlich gegen Remobilisierungen können den nach DWA-A 102 erforderlichen AFS63-Systemwirkungsgrad erreichen.
- ▶ Das entwickelte Prüfsetup ist in der Lage, schlecht konzipierte Anlagen zu identifizieren. Anlagen mit Schwächen in der Rückhalteleistung bei Füllung mit der Halbjahresfracht erreichen einen viel schlechteren Wirkungsgrad im Vergleich zu der Prüfung mit einer Beladung nach den Teilprüfungen und gemäß Bemessungskurve nach dem DWA Merkblatt M 179 (Entwurf).

Es liegt nun ein Vorschlag für ein robustes Prüfverfahren zur Bestimmung eines AFS63-Wirkungsgrades für dezentrale Anlagen unter Laborbedingungen vor, mit dem die Eignung zur Einleitung in Oberflächengewässer durch von den Wasserbehörden zugelassene Prüfstellen festgestellt werden kann. Dieses wurde an Anlagen mit unterschiedlicher Verfahrenstechnik validiert. Leistungsschwache Anlagen können leicht identifiziert werden, leistungsstarken Anlagen kann ein guter Wirkungsgrad testiert werden.

Soll das Prüfverfahren beim DIBt angesiedelt werden, so ist eine Änderung der Landesverordnungen zur Feststellung der wasserrechtlichen Eignung von Bauprodukten und Bauarten (WASBauPVO) erforderlich, so dass das DIBt eine Rechtsgrundlage zur Prüfung dieser Anlagen hat. Derzeit sind für das DIBt nur dezentrale Anlagen zur Einleitung in das Grundwasser relevant, da sie auch auf MKW geprüft werden und somit der in der WASBauPVO aufgeführten Anlagen zur Begrenzung von Kohlenwasserstoffen in mineralöhlhaltigen Abwässern entsprechen.

Mit dem Verfahren können schließlich die Entwicklung von neuen oder verbesserten Technologien zur Entlastung der Oberflächengewässer gefördert und ein Wildwuchs an nicht gut funktionierenden Techniken verhindert werden. Beides dient langfristig dem Schutz und der Entlastung der Oberflächengewässer.

## 10 Literaturverzeichnis

- 2000/53/EG (2000): Richtlinie 2000/53/EG des Europäischen Parlaments und des Rates über Altfahrzeuge. Online verfügbar unter <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/DE/TXT/?uri=CELEX:32000L0053>, zuletzt geprüft am 07.01.2020.
- 2008/105/EG (2008): Richtlinie 2008/105/EG des Europäischen Parlaments und des Rates vom 16. Dezember 2008 über Umweltqualitätsnormen im Bereich der Wasserpolitik und zur Änderung und anschließenden Aufhebung der Richtlinien des Rates 82/176/EWG, 83/513/EWG, 84/156/EWG, 84/491/EWG und 86/280/EWG sowie zur Änderung der Richtlinie 2000/60/EG. Online verfügbar unter <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/DE/TXT/?uri=celex:32008L0105>, zuletzt geprüft am 15.10.2020.
- 2013/39/EU (2013): Richtlinie 2013/39/EU Des Europäischen Parlaments und des Rates vom 12. August 2013 zur Änderung der Richtlinien 2000/60/EG und 2008/105/EG in Bezug auf prioritäre Stoffe im Bereich der Wasserpolitik. Online verfügbar unter <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/DE/TXT/?uri=celex%3A32013L0039>, zuletzt geprüft am 15.10.2020.
- AbwV (1997): Verordnung über Anforderungen an das Einleiten von Abwasser in Gewässer (Abwasserverordnung - AbwV), Abwasserverordnung in der Fassung der Bekanntmachung vom 17. Juni 2004 (BGBl. I S. 1108, 2625), die zuletzt durch Artikel 1 der Verordnung vom 16. Juni 2020 (BGBl. I S. 1287) geändert worden ist. Bundesministerium der Justiz und für Verbraucherschutz (BJV), vom 17.06.2004. Online verfügbar unter <http://www.gesetze-im-internet.de/abwv/index.html#BJNR056610997BJNE000510118>, zuletzt geprüft am 15.10.2020.
- Adachi, K.; Tainosho, Y. (2005): Single particle characterization of size-fractionated road sediments. In: *Applied Geochemistry* 20 (5), S. 849–859. DOI: 10.1016/j.apgeochem.2005.01.005.
- Adamiec, E.; Jarosz-Krzemińska, E.; Wieszała, R. (2016): Heavy metals from non-exhaust vehicle emissions in urban and motorway road dusts. In: *Environmental Monitoring and Assessment* 188 (6), S. 369. DOI: 10.1007/s10661-016-5377-1.
- Aiguier, E.; Chebbo, G.; Bertrand-Krajewski, J. L.; Hedges, P.; Tyack, N. (1996): Methods for Determining the Settling Velocity Profiles of Solids in Storm Sewage. In: *Water Science & Technology* 33 (9), S. 117–125.
- Alves, C. A.; Vicente, A.M.P.; Calvo, A. I.; Baumgardner, D.; Amato, F.; Querol, X. et al. (2020): Physical and chemical properties of non-exhaust particles generated from wear between pavements and tyres. In: *Atmospheric Environment* 224, S. 117252. DOI: 10.1016/j.atmosenv.2019.117252.
- Andral, M. C.; Roger, S.; Montréjaud-Vignoles, M.; Herremans, L. (1999): Particle Size Distribution and Hydrodynamic Characteristics of Solid Matter Carried by Runoff from Motorways 71 (4), S. 398–407. Online verfügbar unter <http://www.jstor.org/stable/25045232>, zuletzt geprüft am 30.03.2021.
- Arnold, G. (2022): Prüfen von dezentralen Anlagen zur Niederschlagswasserbehandlung im Labor. LGA, Würzburg, 21.01.2022. mündliche Mitteilung.
- Aryal, R.; Beecham, S.; Sarkar, B.; Chong, M. N.; Kinsela, A.; Kandasamy, J.; Vigneswaran, S. (2017): Readily Wash-Off Road Dust and Associated Heavy Metals on Motorways. In: *Water, Air, & Soil Pollution* 228 (1). DOI: 10.1007/s11270-016-3178-3.
- Aryal, R.; Duong, T.T.T.; Lee, B.-K.; Hossain, M.; Kandel, D.; Kamruzzaman, M. et al. (2014): Organic matter composition variability in road sediment and its role in binding heavy metals. In: *Sustainable Environment Research* 24 (2), S. 81–91.
- ATV-A 128 (1992): Arbeitsblatt DWA-A 128 Richtlinien für die Bemessung und Gestaltung von Regenentlastungsanlagen in Mischwasserkanälen. Korr. Nachdr., April 1992. St. Augustin: Ges. zur Förderung der Abwassertechnik (ATV-Regelwerk Abwasser - Abfall Arbeitsblatt, A 128).
- ATV-DVWK-M 177 (2001): Merkblatt ATV-DVWK-M 177 Bemessung und Gestaltung von Regenentlastungsanlagen in Mischwasserkanälen. Erläuterungen und Beispiele. Stand: Juni 2001. Hennef: GFA-Gesellschaft zur Förderung der Abwassertechnik (ATV-DVWK-Regelwerk, M 177).

- Austrian Standards (2018): Regenwasser-Sickeranlagen für Abläufe von Dachflächen und befestigten Flächen - Teil 3: Filtermaterialien - Anforderungen und Prüfmethode. ÖNORM B 2506-3. Ausgabe: 2018-07-15.
- Awwad, M. T.; Shbeeb, L. (2007): The Use of Polyethylene in Hot Asphalt Mixtures. In: *American Journal of Applied Sciences* 4 (6), S. 390–396. DOI: 10.3844/ajassp.2007.390.396.
- Bäckström, M. (2002): Sediment transport in grassed swales during simulated runoff events. In: *Water Science & Technology* 45 (7), S. 41–49.
- Baensch-Baltruschat, B.; Kocher, B.; Kochleus, C.; Stock, F.; Reifferscheid, G. (2021): Tyre and road wear particles - A calculation of generation, transport and release to water and soil with special regard to German roads. In: *Science of the Total Environment* 752, S. 141939. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2020.141939.
- Baensch-Baltruschat, B.; Kocher, B.; Stock, F.; Reifferscheid, G. (2020): Tyre and road wear particles (TRWP) - A review of generation, properties, emissions, human health risk, ecotoxicity, and fate in the environment. In: *Science of the Total Environment* 733, S. 137823. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2020.137823.
- Ball, J. E.; Abustan, I. (1995): An Investigation of Particle Size Distribution During Storm Events from an Urban Catchment. Preprints of papers. In: *Second International Symposium on Urban Stormwater Management 95/02*, S. 531–535.
- Ball, J. E.; Jenks, R.; Aubourg, D. (1998): An assessment of the availability of pollutant constituents on road surfaces. In: *Science of the Total Environment* 209, S. 243–254. DOI: 10.1016/S0048-9697(98)80115-0.
- Banerjee, S.; Mandal, A.; Rooby, J. (2016): Studies on Mechanical Properties of Tyre Rubber Concrete. In: *International Journal of Civil Engineering* 3 (7), S. 18–21. DOI: 10.14445/23488352/IJCE-V3I7P103.
- Barjenbruch, M.; Heinzmann, B.; Kober, P.; Post, M.; Remy, C.; Rouault, P. et al. (2016): Dezentrale Reinigung von Straßenabflüssen Projekt im Berliner Umweltentlastungsprogramm UEPII/2 Projekt - Nr.: 11315 UEPII/2. Abschlussbericht. Berlin.
- Barjenbruch, M.; Venghaus, D.; Lau, P. (2018): Entfernung von Plastik aus Abwasser – die besondere Bedeutung des Abriebs von Autoreifen. Wasserwerkstatt 13.09.2018. 45. Berliner Wasserwerkstatt: Plastik in der aquatischen Umwelt – Makro, Mikro, Nano? TU Berlin. Berliner Wasserbetriebe. Berlin, 13.09.2018.
- Barrett, M. E.; Malina, J. F.; Charbeneau, R. J.; Ward, G. H. (1995): Characterization of Highway Runoff in the Austin, Texas Area. Technical Report - CRWR 263. Austin, Texas.
- Bartsch, N.; Röhrig, E. (2016): Waldökologie. Einführung für Mitteleuropa. 1. Aufl. 2016. Berlin, Heidelberg: Springer Spektrum. Online verfügbar unter [http://ebooks.ciando.com/book/index.cfm/bok\\_id/1880273](http://ebooks.ciando.com/book/index.cfm/bok_id/1880273).
- Baum, P.; Benisch, J.; Blumensaat, F.; Dierschke, M.; Dittmer, U.; Gelhardt, L. et al. (2018): AFS63 - Harmonisierungsbedarf und Empfehlungen für die labortechnische Bestimmung des neuen Parameters. Tagungsband Regenwasser in urbanen Räumen, aqua urbanica trifft RegenwasserTage 18./19. Juni 2018 in Landau i. d. Pfalz. In: *Schriftenreihe Wasser Infrastruktur Ressourcen* Bd. 1, S. 153–168. Online verfügbar unter [https://kluedo.ub.uni-kl.de/frontdoor/deliver/index/docId/5314/file/AU2018\\_Tagungsband\\_WIR\\_01.pdf](https://kluedo.ub.uni-kl.de/frontdoor/deliver/index/docId/5314/file/AU2018_Tagungsband_WIR_01.pdf), zuletzt geprüft am 01.12.2020.
- Baum, P.; Dittmer, U. (2017): Characteristics of Particles and Micropollutants in Stormwater Runoff. In: *14th International Conference on Urban Drainage (ICUD)*, 527-534.
- Baum, P.; Dittmer, U. (2019): Size Dependent Metal Loads of Urban Stormwater Runoff Compared to the Loads of Total Suspended Solids. In: *NOVATECH 2019, 10th International Conference on Sustainable Techniques and Strategies in Urban Water Management*, 1.-5.7.2019.
- Baum, P.; Kuch, B.; Dittmer, U. (2021): Adsorption of Metals to Particles in Urban Stormwater Runoff—Does Size Really Matter? In: *Water* 13 (3), S. 309. DOI: 10.3390/w13030309.
- Baumkataster-Frankfurt (2021): Auskünfte zu Bäumen auf öffentlichen Flächen - Geoinformationssystem. Hg. v. Grünflächenamt Frankfurt. Frankfurt am Main. Online verfügbar unter <https://geoinfo.frankfurt.de/mapbender/application/baumkataster>, zuletzt geprüft am 15.06.2021.

- Becouze-Lareure, C.; Dembélé, A.; Coquery, M.; Cren-Olivé, C.; Bertrand-Krajewski, J-L (2019): Assessment of 34 dissolved and particulate organic and metallic micropollutants discharged at the outlet of two contrasted urban catchments. In: *Science of the Total Environment* 651 (Pt 2), S. 1810–1818. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2018.10.042.
- Bertling, J.; Bertling, R.; Hamann, L. (2018): Kunststoffe in der Umwelt: Mikro- und Makroplastik. Ursachen, Mengen, Umweltschicksale, Wirkungen, Lösungsansätze, Empfehlungen. Hg. v. Fraunhofer-Institut für Umwelt-, Sicherheits- und Energietechnik UMSICHT. Oberhausen, zuletzt geprüft am 03.12.2018.
- BJV (2004): Bundesministerium der Justiz und für Verbraucherschutz. Verordnung über Anforderungen an das Einleiten von Abwasser in Gewässer (Abwasserverordnung - AbwV) in der Fassung der Bekanntmachung vom 17. Juni 2004 (BGBl. I S. 1108, 2625), zuletzt geändert am 16. Juni 2020 (BGBl. I S. 1287).
- Boogaard, F. (2015): Stormwater characteristics and new testing methods for certain sustainable urban drainage systems in The Netherlands. TU Delft, Delft, Niederlanden.
- Boogaard, F.; van de Ven, F.; Langeveld, J.; van de Giesen, N. (2014): Stormwater Quality Characteristics in (Dutch) Urban Areas and Performance of Settlement Basins. In: *Challenges* 5 (1), S. 112–122. DOI: 10.3390/challe5010112.
- Boucher, J.; Friot, D. (2017): Primary microplastics in the oceans. A global evaluation of sources. Gland: IUCN.
- Brauer, H.; Thiele, H. (1973): Bewegung von Partikelschwärmen. In: *Chemie Ingenieur Technik* 45 (13), S. 909–912. DOI: 10.1002/cite.330451317.
- Braun, U.; Bannick, C. G. (2019): Harmonisierung von Untersuchungsverfahren für (Mikro-)Plastik in der Umwelt. In: *Recycling und Rohstoffe – Band 12*, S. 221–231. Online verfügbar unter [https://www.vivis.de/wp-content/uploads/RuR12/2019\\_rur\\_221-232\\_braun.pdf](https://www.vivis.de/wp-content/uploads/RuR12/2019_rur_221-232_braun.pdf), zuletzt geprüft am 02.12.2020.
- Brezonik, P. L.; Stadelmann, T. H. (2002): Analysis and predictive models of stormwater runoff volumes, loads, and pollutant concentrations from watersheds in the Twin Cities metropolitan area, Minnesota, USA. In: *Water Research* 36 (7), S. 1743–1757. DOI: 10.1016/S0043-1354(01)00375-X.
- Brodie, I. M. (2007): Investigation of Stormwater Particles Generated From Common Urban Surfaces. Dissertation. University of Southern Queensland, Queensland, Australien.
- Brodie, I. M.; Dunn, P. K. (2009): Suspended particle characteristics in storm runoff from urban impervious surfaces in Toowoomba, Australia. In: *Urban Water Journal* 6 (2), S. 137–146. DOI: 10.1080/15730620802541607.
- Brombach, H.; Fuchs, S. (2003): Datenpool gemessener Verschmutzungskonzentrationen in Misch- und Trennkanalesationen. In: *KA - Abwasser, Abfall* 50 (Nr. 4/2003), S. 441–450.
- Brombach, H.; Michelbach, S.; Wöhrle, C. (1992): Sedimentationsvorgänge und Remobilisierungsvorgänge im Abwasserkanal - Teilprojekt 3 - Schlussbericht 1988-1991 Phase 1. Niederschlagsbedingte Schmutzbelastung der Gewässer aus städtischen befestigten Flächen. Bad Mergentheim.
- Bund-Länder-Arbeitsgruppe (BLAG) (2008): „Entwürfe für einen „Anhang Niederschlagswasser“ zur Abwasserverordnung“ 21.02.2008.
- Burkhardt, M. (2019): Belastungsklassen und Leistungsprüfung von technischen Regenwasserbehandlungsanlagen (Adsorbern). Vortragsfolien. Rapperswill: HSR Hochschule für Technik Rapperswill. Online verfügbar unter [https://www.comleam.ch/user/pages/01.home/08.\\_downloads/Download\\_09\\_Burkhardt\\_Leistungspr%C3%BCfung.pdf](https://www.comleam.ch/user/pages/01.home/08._downloads/Download_09_Burkhardt_Leistungspr%C3%BCfung.pdf).
- Burkhardt, M.; Englert, A.; Adolph, G. (2018): Behandlung von Gleisabwasser. Bau und Betrieb einer neuartigen Pilotanlage. In: *Aqua & Gas* 4, S. 58–67.
- Butler, D.; Thedchanamoorthy, S.; Payne, J. A. (1992): Aspects of Surface Sediment Characteristics on an Urban Catchment in London. In: *Water Science & Technology* 25 (8), S. 13–19. DOI: 10.2166/wst.1992.0174.

- BWK-M3 (2001): Ableitung von immissionsorientierten Anforderungen an Misch- und Niederschlagswassereinleitungen unter Berücksichtigung örtlicher Verhältnisse. April 2001. Düsseldorf: Bund der Ingenieure für Wasserwirtschaft, Abfallwirtschaft und Kulturbau (BWK) e.V (BWK-Merkblatt, 3).
- BWK-M7 (2007): Detaillierte Nachweisführung immissionsorientierter Anforderungen an Misch- und Niederschlagswassereinleitungen gemäß BWK - Merkblatt 3. Sindelfingen: BWK (BWK-Merkblatt, 7).
- Charters, F. J.; Cochran, T. A.; O'Sullivan, A. (2015): Particle Size Distribution Variance in Untreated Urban Runoff and its Implication on Treatment Selection. In: *Water Research* 85, S. 337–345.
- Chow, M. F.; Yusop, Z.; Abustan, I. (2015): Relationship between sediment build-up characteristics and antecedent dry days on different urban road surfaces in Malaysia. In: *Urban Water Journal* 12 (3), S. 240–247. DOI: 10.1080/1573062X.2013.839718.
- Coceal, O.; Belcher, S. E. (2005): Mean Winds Through an Inhomogeneous Urban Canopy. In: *Boundary-Layer Meteorology* 115 (1), S. 47–68. DOI: 10.1007/s10546-004-1591-4.
- Council, Terry B.; Duckenfield, Kea U.; Landa, Edward R.; Callender, Edward (2004): Tire-wear particles as a source of zinc to the environment. In: *Environmental Science & Technology* 38 (15), S. 4206–4214. DOI: 10.1021/es034631f.
- Cristina, C.; Tramonte, J.; Sansalone, J. J. (2002): A Granulometry-based Methodology for Separation of Traffic-generated Particles in Urban Highway Snowmelt Runoff. In: *Water, Air, & Soil Pollution* 136 (1/4), S. 33–53. DOI: 10.1023/A:1015239831619.
- Davis, B.; Birch, G. (2010): Comparison of heavy metal loads in stormwater runoff from major and minor urban roads using pollutant yield rating curves. In: *Environmental Pollution* 158 (8), S. 2541–2545. DOI: 10.1016/j.envpol.2010.05.021.
- Deletic, Ana; Orr, David W. (2005): Pollution Buildup on Road Surfaces. In: *Journal of Environmental Engineering* 131 (1), S. 49–59. DOI: 10.1061/(ASCE)0733-9372(2005)131:1(49).
- Depree, C. (2008): Contaminant characterisation and toxicity of road sweepings and catchpit sediments. Towards more sustainable reuse options. Wellington, New Zealand (Land Transport New Zealand research report). Online verfügbar unter <https://trid.trb.org/view/868878>, zuletzt geprüft am 14.01.2021.
- DIBt (2012): Zulassungsgrundsätze Niederschlagswasserbehandlungsanlagen. Teil 2. Wasserdurchlässige Beläge für Kfz-Verkehrsflächen für die Behandlung des Abwassers zur anschließenden Versickerung in Boden und Grundwasser (Abwasserbehandelnde Flächenbeläge). Hg. v. Deutsches Institut für Bautechnik. Berlin.
- DIBt (2017): Zulassungsgrundsätze Niederschlagswasserbehandlungsanlagen. Teil 1. Anlagen zur dezentralen Behandlung des Abwassers von Kfz-Verkehrsflächen zur anschließenden Versickerung in Boden und Grundwasser. Deutsches Institut für Bautechnik. Berlin.
- DIBt (2019): Hinweise für die Prüfung von Filterrinnen nach den Zulassungsgrundsätzen für Niederschlagswasserbehandlungsanlagen Teil 1 und Teil 2. Deutsches Institut für Bautechnik. Berlin.
- DIBt (2021): Verzeichnis der allgemeinen bauaufsichtlichen Zulassungen. Deutsches Institut für Bautechnik. Berlin. Online verfügbar unter [https://www.dibt.de/fileadmin/verzeichnisse/NAT\\_n/zv\\_referat\\_II3/SVA\\_84.htm](https://www.dibt.de/fileadmin/verzeichnisse/NAT_n/zv_referat_II3/SVA_84.htm), zuletzt aktualisiert am 23.03.2021, zuletzt geprüft am 29.03.2021.
- Dierkes, C. (2021): Persönliche Mitteilung über die Feststoffprüfung in der Axel Zangenberg GmbH Co. KG, Gutedelstraße 33, 79418 Schliengen. H2O-Research. Münster, Februar 2021.
- Dierschke, M. (2014a): Aufkommen und Verbleib von feinen Feststoffen in Verkehrsflächenabflüssen. In: *Wasser und Abfall* 9, S. 18–23.
- Dierschke, M. (2014b): Methodischer Ansatz zur Quantifizierung von Feinpartikeln (PM63) in Niederschlagsabflüssen in Abhängigkeit von der Herkunftsfläche. Dissertation. TU Kaiserslautern, Kaiserslautern. Fachbereich Bauingenieurwesen.
- Dierschke, M.; Welker, A. (2013): Feine Feststoffe (PM63) in Dachabflüssen. In: *gwf Wasser - Abwasser* 154 (11), S. 1242–1249.

- Dierschke, M.; Welker, A. (2015): Bestimmung von Feststoffen in Niederschlagsabflüssen. In: *gwf Wasser - Abwasser* 4/2015, S. 440–446.
- Dierschke, M.; Welker, A.; Dierkes, C. (2010): Selection of a reference material for the testing of decentralized stormwater treatment facilities. In: *7th International Conference on Sustainable Techniques and Strategies for Urban Water Management, Novatech, Lyon, Frankreich, 28.06. - 01.07.2010*.
- Dietrich, W. E. (1982): Settling velocity of natural particles. In: *Water Resources Research* 18 (6), S. 1615–1626. DOI: 10.1029/WR018i006p01615.
- DIN 38409-2 (1987): Deutsche Einheitsverfahren zur Wasser-, Abwasser- und Schlammuntersuchung. Summarische Wirkungs- und Stoffkenngrößen (Gruppe H) - Bestimmung der abfiltrierbaren Stoffe und des Glührückstandes. DIN Deutsches Institut für Normung e. V. Berlin.
- DIN 66137-2 (2019): Bestimmung der Dichte fester Stoffe - Teil 2: Gaspyknometrie. DIN Deutsches Institut für Normung e. V.
- DIN EN 15169 (2007): Determination of loss on ignition in waste, sludge and sediments. Charakterisierung von Abfall – Bestimmung des Glühverlustes in Abfall, Schlamm und Sedimenten. DIN Deutsches Institut für Normung e. V. Berlin.
- DIN EN 872 (2005): Wasserbeschaffenheit - Bestimmung suspendierter Stoffe - Verfahren durch Abtrennung mittels Glasfaserfilter. DIN Deutsches Institut für Normung e. V.
- Djukić, A.; Lekić, B.; Rajaković-Ognjanović, V.; Veljović, D.; Vulić, T.; Djolić, M. et al. (2016): Further insight into the mechanism of heavy metals partitioning in stormwater runoff. In: *Journal of Environmental Management* 168, S. 104–110. DOI: 10.1016/j.jenvman.2015.11.035.
- Drapper, D. (Hg.) (2014): Particle Size Distribution of Urban Runoff - Australia vs. International: Ten Years ON. Peer Reviewed Paper. Stormwater. Adelaide.
- Drapper, D.; Tomlinson, R.; Williams, P. (2000): Pollutant Concentrations in Road Runoff. Southeast Queensland Case Study. In: *Journal of Environmental Engineering*, S. 313–320.
- Droppo, I. G.; Leppard, G. G.; Flannigan, D. T.; Liss, S. N. (1997): The freshwater floc. In: *Water, Air, & Soil Pollution* 99 (1-4), S. 43–53. DOI: 10.1007/BF02406843.
- Duncan, H. (1999): Urban stormwater quality. A statistical overview. Clayton, Vic.: CRC for Catchment Hydrology (Research report / Cooperative Research Centre for Catchment Hydrology, 99/3).
- DWA-A 102-1 (2020): Arbeitsblatt DWA-A 102-1/BWK-A 3-1 Grundsätze zur Bewirtschaftung und Behandlung von Regenwetterabflüssen zur Einleitung in Oberflächengewässer – Teil 1: Allgemeines. Dezember 2020, 1. Auflage. Hennef: Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall e.V. (DWA) (DWA-Regelwerk, A 102-1/BWK-A 3-1).
- DWA-A 102-2 (2020): Arbeitsblatt DWA-A 102-2/BWK-A 3-2 Grundsätze zur Bewirtschaftung und Behandlung von Regenwetterabflüssen zur Einleitung in Oberflächengewässer - Teil 2: Emissionsbezogene Bewertungen und Regelungen. Dezember 2020. Hennef: Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall e.V (DWA-Arbeitsblatt, 102-2).
- DWA-A 111 (2010): Arbeitsblatt DWA-A 111 Hydraulische Dimensionierung und betrieblicher Leistungsnachweis von Anlagen zur Abfluss- und Wasserstandsbegrenzung in Entwässerungssystemen. Dezember 2010. Hennef (Sieg): DWA (DWA-Regelwerk, A 111).
- DWA-A 138 (2005): Arbeitsblatt DWA-A 138 Planung, Bau und Betrieb von Anlagen zur Versickerung von Niederschlagswasser. 2., redaktionell korr. Aufl. Hennef: DWA (DWA-Regelwerk, 138).
- DWA-A 138-1 - Entwurf (2020): Arbeitsblatt DWA-A 138 Anlagen zur Versickerung von Niederschlagswasser - Teil 1: Planung, Bau, Betrieb - Entwurf. Hennef: DWA (DWA-Regelwerk, 138).
- DWA-A 166 (2013): Arbeitsblatt DWA-A 166 Bauwerke der zentralen Regenwasserbehandlung und -rückhaltung. Konstruktive Gestaltung und Ausrüstung. November 2013. Hennef: DWA (DWA-Regelwerk, A 166).

- DWA-A 178 (2019): Arbeitsblatt DWA-A 178 Retentionsbodenfilteranlagen. Juni 2019. Hennef: Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall (DWA-Regelwerk, 178).
- DWA-A/M 102 (2020): Arbeits- und Merkblattreihe DWA-A/M 102 (BWK-A/M 3) Grundsätze zur Bewirtschaftung und Behandlung von Regenwetterabflüssen zur Einleitung in Oberflächengewässer. Dezember 2020. Hennef: Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall (DWA-Arbeitsblatt, 102).
- DWA-M 102-4 Entwurf (2020): Merkblatt DWA-M 102-4/BWK-A 3-4 Grundsätze zur Bewirtschaftung und Behandlung von Regenwetterabflüssen zur Einleitung in Oberflächengewässer - Teil 4: Wasserhaushaltsbilanz für die Bewirtschaftung des Niederschlagswassers. Dezember 2020. Hennef: Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall (DWA-Regelwerk, 102-4).
- DWA-M 153 (2007): Merkblatt DWA-M 153 Handlungsempfehlungen zum Umgang mit Regenwasser. August 2007. Hennef: DWA (DWA-Regelwerk, M 153).
- DWA-M 179 (in Bearbeitung): Merkblatt DWA-M 179 Empfehlungen für Planung und Betrieb von dezentralen Anlagen zur Niederschlagswasserbehandlung. Hennef: Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall e.V (DWA-Merkblatt, 179).
- DWA-M 378 (2008): Merkblatt DWA-M 378 Umgang mit Straßenkehricht. Juli 2008. Hennef (DWA-Regelwerk, M 378).
- Egodawatta, P.; Goonetilleke, A. (2006): Characteristics of pollution build-up on residential road surfaces. In: *Proceedings of the 7th International Conference on HydroScience and Engineering, Philadelphia, USA*, 10.-13. September 2006.
- Eyckmanns-Wolters, R.; Fuchs, S.; Maus, C.; Sommer, M.; Voßwinkel, N.; Mohn, R. et al. (2013): Reduktion des Feststoffeintrages durch Niederschlagswassereinleitungen. Phase 1. Projektbericht. Hg. v. Auftraggeber MKULNV NRW. Online verfügbar unter [https://isww.iwg.kit.edu/medien/Abschlussbericht\\_ReduktionFeststoffeintragPhase1.pdf](https://isww.iwg.kit.edu/medien/Abschlussbericht_ReduktionFeststoffeintragPhase1.pdf), zuletzt geprüft am 26.08.2022.
- Fettig, J.; Oldenburg, M.; Pick, V. (2020): Erfassung und weitergehende Charakterisierung der Fraktion AFSfein im Zu- und Ablauf von dezentralen Anlagen zur Behandlung des Niederschlagswassers von Verkehrsflächen. AFSfein Charakterisierung. Abschlussbericht Förderbereich 6 "Ressourceneffiziente Abwasserbeseitigung" im Auftrag des Ministeriums für Umwelt, Landwirtschaft, Natur- und Verbraucherschutz des Landes NRW. Hg. v. Technische Hochschule Ostwestfalen-Lippe. Höxter. Online verfügbar unter [https://www.lanuv.nrw.de/fileadmin/forschung/Abschlussbericht\\_ResA6\\_Projekt\\_AFSfein\\_print.pdf](https://www.lanuv.nrw.de/fileadmin/forschung/Abschlussbericht_ResA6_Projekt_AFSfein_print.pdf), zuletzt geprüft am 09.06.2022.
- Fettig, J.; Pick, V. (2020): Neue Erkenntnisse zu Feststoffen in Straßenabläufen und Folgerungen bezüglich der Wirksamkeit von dezentralen Anlagen. Projektergebnisse der Technischen Hochschule Ostwestfalen-Lippe. LANUV, NRW (BEW-Kurs-Nr. DW021E2011, 12.11.2020, Aktuelle Aspekte der Beseitigung von Niederschlagswasser).
- Frank, H.; Reinsberg, H. (2014): Leitfaden Fahrbahnmarkierung. Schriftenreihe 17. Hg. v. Deutsche Verkehrssicherheitsrat (DVR) und die Deutsche Studiengesellschaft für Straßenmarkierungen (DSGS). Bonn.
- Fuchs, S. (2021): Empfehlungen für Planung und Betrieb von dezentralen Anlagen zur Niederschlagswasserbehandlung - Merkblatt DWA-M 179. Vortragsfolien. RegenwasserTage Tagung mit digitaler Fachausstellung 22./23. Juni 2021. DWA Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall e.V., 22.06.2021.
- Fuchs, S.; Kemper, M.; Morling, K.; Ebbert, S.; Mohn, R.; Precht, S. et al. (2019a): Reduktion des Feststoffeintrages durch Niederschlagswassereinleitungen – Phase 2. Abschlussbericht zum Forschungsvorhaben Berichtsteil 2/2. Hg. v. Ministerium für Umwelt, Landwirtschaft, Natur- und Verbraucherschutz des Landes Nordrhein-Westfalen. MULNV NRW. Düsseldorf.

- Fuchs, S.; Kemper, M.; Nickel, J. P. (2019b): Feststoffe in der Regenwasserbehandlung. In: *52. Essener Tagung, Gesellschaft zur Förderung der Siedlungswasserwirtschaft an der RWTH Aachen* (Band 250).
- Fuchs, S.; Lambert, B.; Grotehusmann, D. (2010): Neue Aspekte in der Behandlung von Siedlungsabflüssen. In: *Umweltwissenschaften und Schadstoff-Forschung* 22 (6), S. 661–667. DOI: 10.1007/s12302-010-0161-2.
- Fuchs, S.; Toshovski, S.; Kaiser, M.; Sacher, F.; Thoma, A. (2020): Belastung der Umwelt mit Bioziden realistischer erfassen - Schwerpunkt Einträge über Kläranlagen. Abschlussbericht. Hg. v. Umweltbundesamt. Dessau-Roßlau (TEXTE 169/2020). Online verfügbar unter <https://www.umweltbundesamt.de/publikationen/belastung-der-umwelt-bioziden-realistischer>, zuletzt geprüft am 07.10.2020.
- Furumai, H.; Balmer, H.; Boller, M. (2002): Dynamic Behavior of Suspended Pollutants and Particle Size Distribution in Highway Runoff. In: *Water Science & Technology* 46 (11-12), S. 413–418.
- Gelhardt, L. (2020): Charakterisierung von Feststoffen auf urbanen Verkehrsflächen als potenzielle Schadstoffträger im Niederschlagsabfluss - Entwicklung einer Methode zur Messung der Sinkgeschwindigkeit und absetzrelevanter Kenngrößen. Doktorarbeit. TU Kaiserslautern, Kaiserslautern. Fachbereich Bauingenieurwesen. Online verfügbar unter <https://nbn-resolving.org/html/urn:nbn:de:hbz:386-kluedo-61569>, zuletzt geprüft am 22.05.2021.
- Gelhardt, L.; Dittmer, U.; Welker, A. (2021): Relationship of particle density and organic content in sieve fractions of road-deposited sediments from varying traffic sites based on a novel data set. In: *Science of the Total Environment* 794, S. 148812. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2021.148812.
- Gillar, M.; Goerke, M.; Ulutas, S. (2018): Hinweisleitfaden für Bau und Betrieb von Drosselorganen. gefördert durch das MKULNV NRW, Düsseldorf; beauftragt durch den Eftverband, Bergheim. Hg. v. Institut für Unterirdische Infrastruktur (IKT). Gelsenkirchen.
- Glenn, D. W.; Sansalone, J. J. (2002): Accretion and Partitioning of Heavy Metals Associated with Snow Exposed to Urban Traffic and Winter Storm Maintenance Activities. II. In: *Journal of Environmental Engineering* 128 (2), S. 167–185.
- Gnecco, I.; Palla, A.; Sansalone, J. J. (2019): Partitioning of zinc, copper and lead in urban drainage from paved source area catchments. In: *Journal of Hydrology* 578, S. 124128. DOI: 10.1016/j.jhydrol.2019.124128.
- Goncalves, C.; van Seters, T. (2012): Characterization of Particle Size Distributions of Runoff from High Impervious Urban Catchments in the Greater Toronto Area. Hg. v. Toronto and Region Conservation Authority.
- Gromaire, M.C; Garnaud, S.; Saad, M.; Chebbo, G. (2001): Contribution of different sources to the pollution of wet weather flows in combined sewers. In: *Water Research* 35 (2), S. 521–533. DOI: 10.1016/S0043-1354(00)00261-X.
- Gromaire-Mertz, M. C.; Garnaud, S.; Gonzalez, A.; Chebbo, G. (1999): Characterisation of urban runoff pollution in Paris. In: *Water Science & Technology* 39 (2), S. 1–8. DOI: 10.1016/S0273-1223(99)00002-5.
- Grotehusmann, D.; Kornmayer, K. (2018): Immissionsbezogene Bewertung der Einleitung von Straßenabflüssen. Auftraggeber: Niedersächsische Landesbehörde für Straßenbau und Verkehr. Hannover.
- Grotehusmann, D.; Lambert, B.; Fuchs, S.; Graf, J. (2017): Konzentrationen und Frachten organischer Schadstoffe im Straßenabfluss (Berichte der Bundesanstalt für Straßenwesen: V, Verkehrstechnik, V295).
- Grottker, M. (1987): Runoff quality from a street with medium traffic loading. In: *Science of the Total Environment* 59, S. 457–466. DOI: 10.1016/0048-9697(87)90469-4.
- Gunawardana, C.; Goonetilleke, A.; Egodawatta, P. (2013): Adsorption of heavy metals by road deposited solids. In: *Water Science & Technology* 67 (11), S. 2622–2629. DOI: 10.2166/wst.2013.171.
- Gustafsson, M.; Blomqvist, G.; Järlskog, I.; Lundberg, J.; Janhäll, S.; Elmgren, M. et al. (2019): Road dust load dynamics and influencing factors for six winter seasons in Stockholm, Sweden. In: *Atmospheric Environment: X* 2, S. 100014. DOI: 10.1016/j.aeaoa.2019.100014.

- Haile, T. M.; Hobiger, G.; Kammerer, G.; Allabashi, R.; Schaerfing, B.; Fuerhacker, M. (2016): Hydraulic Performance and Pollutant Concentration Profile in a Stormwater Runoff Filtration Systems. In: *Water, Air, & Soil Pollution* 227 (1), S. 398. DOI: 10.1007/s11270-015-2736-4.
- Hallermeier, R. J. (1981): Terminal settling velocity of commonly occurring sand grains. In: *Sedimentology* 28 (6), S. 859–865. DOI: 10.1111/j.1365-3091.1981.tb01948.x.
- Hartmann, N. B.; Hüffer, T.; Thompson, R. C.; Hassellöv, M.; Verschoor, A.; Daugaard, A. E. et al. (2019): Are We Speaking the Same Language? Recommendations for a Definition and Categorization Framework for Plastic Debris. In: *Environmental Science & Technology* 53 (3), S. 1039–1047. DOI: 10.1021/acs.est.8b05297.
- Helmreich, B.; Hilliges, R.; Schriewer, A.; Horn, H. (2010): Runoff pollutants of a highly trafficked urban road – Correlation analysis and seasonal influences. In: *Chemosphere* 80 (9), S. 991–997. DOI: 10.1016/j.chemosphere.2010.05.037.
- Helmreich, B.; Horn, H. (2010): Prüfung einer Behandlungsanlage für Metaldachabflüsse nach den Prüfkriterien des Bayerischen Landesamtes für Umwelt. In: *KA - Abwasser, Abfall* 57 (8), S. 756–764.
- Hessen (2010): Abwassereigenkontrollverordnung (EKVO) vom 23. Juli 2010.
- Hichri, Y.; Descartes, S.; Cerezo, V.; Do, M.-T. (2019): Understanding the behavior of fine particles at the tire/road interface. In: *Tribology International*. DOI: 10.1016/j.triboint.2019.02.043.
- Hillebrand, G. (2008): Transportverhalten kohäsiver Sedimente in turbulenten Strömungen – Untersuchungen im offenen Kreisgerinne. Dissertation. Universität Fridericiana zu Karlsruhe (TH), Karlsruhe. Bauingenieur-, Geo- und Umweltwissenschaften.
- Hilliges, R.; Endres, M.; Tiffert, A.; Brenner, E.; Marks, T. (2017): Characterization of road runoff with regard to seasonal variations, particle size distribution and the correlation of fine particles and pollutants. In: *Water Science & Technology* 75 (5), S. 1169–1176. DOI: 10.2166/wst.2016.576.
- Hinislioglu, S.; Agar, E. (2004): Use of waste high density polyethylene as bitumen modifier in asphalt concrete mix. In: *Materials Letters* 58 (3-4), S. 267–271. DOI: 10.1016/S0167-577X(03)00458-0.
- HLNUG (2016): Durchflussmesseinrichtungen und Drosselorgane in Abwasseranlagen. Merkblatt D 2.10. Gestaltungsgrundsätze, Planungshinweise, Prüfmethode im Hinblick auf die hessische. Hg. v. Hessisches Landesamt für Naturschutz, Umwelt und Geologie. Wiesbaden.
- Horstmeyer, N.; Huber, M.; Drewes, J. E.; Helmreich, B. (2016): Evaluation of site-specific factors influencing heavy metal contents in the topsoil of vegetated infiltration swales. In: *Science of the Total Environment* 560-561, S. 19–28. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2016.04.051.
- Horwath, J. A.; Bannerman, R. T. (2012): Parking Lot Runoff Quality and Treatment Efficiencies of a Hydrodynamic-Settling Device in Madison, Wisconsin, 2005–6. Scientific Investigations Report 2011–5145. U.S. Geological Survey.
- Huber, M.; Welker, A.; Drewes, J. E.; Helmreich, B. (2015): Auftausalze im Straßenwinterdienst – Aufkommen und Bedeutung für dezentrale Behandlungsanlagen von Verkehrsflächenabflüssen zur Versickerung. FACHBERICHTE Regenwasserbewirtschaftung. In: *gwf Wasser - Abwasser* 11, S. 1139–1152, zuletzt geprüft am 16.04.2019.
- Huber, M.; Welker, A.; Helmreich, B. (2016): Critical review of heavy metal pollution of traffic area runoff. Occurrence, influencing factors, and partitioning. In: *Science of the Total Environment* 541, S. 895–919. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2015.09.033.
- Jacopin, Ch.; Bertrand-Krajewski, J. L.; Desbordes, M. (1999): Characterisation and settling of solids in an open, grassed, stormwater sewer network detention basin. In: *Water Science & Technology* 39 (2). DOI: 10.1016/S0273-1223(99)00017-7.
- Jayarathne, A.; Egodawatta, P.; Ayoko, G. A.; Goonetilleke, A. (2017): Geochemical phase and particle size relationships of metals in urban road dust. In: *Environmental Pollution* 230, S. 218–226. DOI: 10.1016/j.envpol.2017.06.059.

- Jayarathne, A.; Egodawatta, P.; Ayoko, G. A.; Goonetilleke, A. (2018): Role of residence time on the transformation of Zn, Cu, Pb and Cd attached to road dust in different land uses. In: *Ecotoxicology and Environmental Safety* 153, S. 195–203. DOI: 10.1016/j.ecoenv.2018.02.007.
- Jayarathne, A.; Egodawatta, P.; Ayoko, G. A.; Goonetilleke, A. (2019a): Transformation processes of metals associated with urban road dust: A critical review. In: *Critical Reviews in Environmental Science and Technology* 25 (1), S. 1–25. DOI: 10.1080/10643389.2019.1579630.
- Jayarathne, A.; Wijesiri, B.; Egodawatta, P.; Ayoko, G. A.; Goonetilleke, A. (2019b): Role of adsorption behavior on metal build-up in urban road dust. In: *Journal of Environmental Sciences* 83, S. 85–95. DOI: 10.1016/j.jes.2019.03.023.
- Jiménez, J. A.; Madsen, O. S. (2003): A Simple Formula to Estimate Settling Velocity of Natural Sediments. In: *Journal of Waterway, Port, Coastal, and Ocean Engineering* 129 (2), S. 70–78. DOI: 10.1061/(ASCE)0733-950X(2003)129:2(70).
- Karamalegos, A. M.; Barrett, M. E.; Lawler, D. F.; Malina, J. F. (2005): Particle Size Distribution of Highway Runoff and Modification Through Stormwater Treatment. CRWR Online Report 05-10. Center for Research in Water Resources, The University of Texas.
- Kaskas, A. A. (1970): Schwarmgeschwindigkeiten in Mehrkornsuspensionen am Beispiel der Sedimentation. Dissertation. TU Berlin, Berlin. Fakultät für Maschinenwesen.
- Kayhanian, M.; McKenzie, E. R.; Leatherbarrow, J. E.; Young, T. M. (2012): Characteristics of road sediment fractionated particles captured from paved surfaces, surface run-off and detention basins. In: *Science of the Total Environment* 439, S. 172–186. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2012.08.077.
- Kayhanian, M.; Rasa, E.; Vichare, A.; Leatherbarrow, J. E. (2008): Utility of Suspended Solid Measurements for Storm-Water Runoff Treatment. In: *Journal of Environmental Engineering* 134 (9), S. 712–721. DOI: 10.1061/(ASCE)0733-9372(2008)134:9(712).
- Kemper, M.; Fuchs, S. (2018): Optimierung des Feststoffrückhalts im Trennsystem durch Schrägklärer - „Opti-Trenn“. Endbericht F&E-Projekt zur Abwasserbeseitigung, ResA. Hg. v. gefördert durch das Ministerium für Klimaschutz, Umwelt, Landwirtschaft, Natur- und Verbraucherschutz des Landes Nordrhein-Westfalen. Karlsruher Institut für Technologie (KIT). Karlsruhe.
- Kim, D. G.; Jeong, S. O. (2014): Removal of Road-Deposited Sediments by Sweeping and its Contribution to Highway Runoff Quality in Korea. In: *Environmental Technology* 35 (20), S. 2546–2555.
- Kim, J. Y.; Sansalone, J. (2008): Event-based Size Distribution of Particulate Matter Transported during Urban Rainfall-Runoff Events. In: *Water Research* 42, S. 2756–2768.
- Klepszewski, K. (2020): AFS63 als Leitparameter der Niederschlagswasserbehandlung Einführung in gesetzliche Rahmenbedingungen. Konstituierende Sitzung DIN-Arbeitskreis Bestimmung Referenzparameter AFS63. Ministerium für Umwelt und Verbraucherschutz Saarland, 03.11.2020.
- Klöckner, P.; Reemtsma, T.; Eisentraut, P.; Braun, U.; Ruhl, A. S.; Wagner, S. (2019): Tire and road wear particles in road environment - Quantification and assessment of particle dynamics by Zn determination after density separation. In: *Chemosphere* 222, S. 714–721. DOI: 10.1016/j.chemosphere.2019.01.176.
- Klöckner, Philipp; Seiwert, Bettina; Eisentraut, Paul; Braun, Ulrike; Reemtsma, Thorsten; Wagner, Stephan (2020): Characterization of tire and road wear particles from road runoff indicates highly dynamic particle properties. In: *Water Research* 185, S. 116262. DOI: 10.1016/j.watres.2020.116262.
- Kobriger, N. K.; Geinopolos, A. (1984): Sources and Migration of Highway Runoff Pollutants. Volume 1-4. Research Report. Report No. FHWA/RD-84/057-060. Federal Highway Administration.
- Koglin, B. (1971): Statistische Verteilung der Sedimentationsgeschwindigkeit in niedrig konzentrierten Suspensionen. In: *Chemie Ingenieur Technik* 43 (13), S. 761–764. DOI: 10.1002/cite.330431306.
- Kole, P. J.; Löhr, A. J.; van Belleghem, F. G. A. J.; Ragas, A. M. J. (2017): Wear and Tear of Tyres. A Stealthy Source of Microplastics in the Environment. In: *International Journal of Environmental Research and Public Health* 14 (10). DOI: 10.3390/ijerph14101265.

- Kreider, Marisa L.; Panko, Julie M.; McAtee, Britt L.; Sweet, Leonard I.; Finley, Brent L. (2010): Physical and chemical characterization of tire-related particles: comparison of particles generated using different methodologies. In: *Science of the Total Environment* 408 (3), S. 652–659. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2009.10.016.
- Krömer, S.; Kreipe, E.; Reichenbach, D.; Stark, R. (1999): Produkt-Ökobilanz eines PKW-Reifens. Hg. v. Continental AG. Hannover. Online verfügbar unter [http://www.dgengineering.de/download/open/Studie\\_Continental\\_Oekobilanz.pdf](http://www.dgengineering.de/download/open/Studie_Continental_Oekobilanz.pdf), zuletzt geprüft am 04.12.2019.
- Lambert, B. (2010): Eigenschaften und Behandlung von Regenabflüssen kleiner Einzugsgebiete, Park- und Hofflächen. Dezentrale Behandlung Niederschlagsabflüssen, Hauraton, Herbst 2010.
- LANUV (2012): Nachweis der Vergleichbarkeit von dezentralen Behandlungsanlagen Zusammenfassende Darstellung der Prüfungsvorgaben vom 25.9.2012. Landesamt für Natur, Umwelt und Verbraucherschutz, NRW.
- Lau, S. L.; Stenstrom, M. K. (2005): Metals and PAHs Adsorbed to Street Particles. In: *Water Research* 39, S. 4083–4092. DOI: 10.1016/j.watres.2005.08.002.
- Leutnant, D.; Henrichs, M.; Uhl, M. (2020): Teilstrombehandlung von Regenwetterabflüssen. In: *gwf Wasser - Abwasser* 161 (1), S. 73–78.
- 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. DOI: 10.3390/w8070299.
- LfU (2011): Prüfkriterien zur Beurteilung von Anlagen zum Rückhalt von Metallionen aus Niederschlagsabflüssen von Metalldächern. Az.: 66-4402-46665/2010. Landesamt für Umwelt, Bayern, Referat 66. Augsburg.
- Li, H.; Shi, A.; Zhang, X. (2015): Particle size distribution and characteristics of heavy metals in road-deposited sediments from Beijing Olympic Park. In: *Journal of Environmental Sciences* 32 (1. Juni, 2015). DOI: 10.1016/j.jes.2014.11.014.
- Li, M. H.; Barrett, M. E. (2008): Relationship Between Antecedent Dry Period and Highway Pollutant. Conceptual Models of Buildup and Removal Processes. In: *Water Environment Research* 80 (8), S. 740–747.
- Li, Y.; Lau, S. L.; Kayhanian, M.; Stenstrom, M. K. (2005): Particle Size Distribution in Highway Runoff. In: *Journal of Environmental Engineering* September 2005, S. 1267–1276. DOI: 10.1061/(ASCE)0733-9372(2005)131:9(1267).
- Lindfors, S.; Österlund, H.; Lundy, L.; Viklander, M. (2020): Metal size distribution in rainfall and snowmelt-induced runoff from three urban catchments. In: *Science of the Total Environment* 743, S. 140813. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2020.140813.
- Liu, A.; Egodawatta, P.; Guan, Y.; Goonetilleke, A. (2013): Influence of rainfall and catchment characteristics on urban stormwater quality. In: *Science of the Total Environment* 444, S. 255–262. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2012.11.053.
- Loganathan, P.; Vigneswaran, S.; Kandasamy, J. (2013): Road-Deposited Sediment Pollutants. In: *Critical Reviews in Environmental Science and Technology* 43 (13), S. 1315–1348. DOI: 10.1080/10643389.2011.644222.
- Lucas-Aiguier, E.; Chebbo, G.; Bertrand-Krajewski, J.-L.; Gagné, B.; Hedges, P. (1998): Analysis of the methods for determining the settling characteristics of sewage and stormwater solids. In: *Water Science & Technology* 37 (1), S. 53–60. DOI: 10.1016/S0273-1223(97)00755-5.
- Lucke, T.; Nichols, P.; Shaver, E.; Lenhart, J.; Welker, A.; Huber, M. (2017): Pathways for the Evaluation of Stormwater Quality Improvement Devices - The Experience of Six Countries. In: *Clean – Soil, Air, Water*. DOI: 10.1002/clen.201600596.
- Lygren, E.; Gjessing, E.; Berglund, L. (1984): Pollution Transport from a Highway. In: *Science of the Total Environment* 33, S. 147–159.

- Ma, Y.; Hao, S.; Zhao, H.; Fang, J.; Zhao, J.; Li, X. (2018): Pollutant transport analysis and source apportionment of the entire non-point source pollution process in separate sewer systems. In: *Chemosphere* 211, S. 557–565. DOI: 10.1016/j.chemosphere.2018.07.184.
- McKenzie, E. R.; Wong, C. M.; Green, P. G.; Kayhanian, M.; Young, T. M. (2008): Size dependent elemental composition of road-associated particles. In: *Science of the Total Environment* 398 (1-3), S. 145–153. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2008.02.052.
- Meißner, E. (2008): Grundlagen zum Prüfverfahren von Regenwasserbehandlungsanlagen. unveröffentlichter Bericht. LfU Augsburg; Referat 66. Augsburg.
- Mills, G. (1997): An urban canopy-layer climate model. In: *Theoretical and Applied Climatology* 57 (3-4), S. 229–244. DOI: 10.1007/BF00863615.
- MKULNV (2013): Ministerium für Klimaschutz, Umwelt, Landwirtschaft, Natur- und Verbraucherschutz - Verordnung zur Selbstüberwachung von Abwasseranlagen - Selbstüberwachungsverordnung Abwasser. SüwVO Abw, vom 17.10.2013. Fundstelle: GV. NRW. S. 133.
- Monrabal-Martinez, C.; Meyn, T.; Muthanna, T. M. (2019): Characterization and temporal variation of urban runoff in a cold climate - design implications for SuDS. In: *Urban Water Journal* 16 (6), S. 451–459. DOI: 10.1080/1573062X.2018.1536758.
- Mosley, L. M.; Peake, B. M. (2001): Partitioning of metals (Fe, Pb, Cu, Zn) in urban run-off from the Kaikorai Valley, Dunedin, New Zealand. In: *New Zealand Journal of Marine and Freshwater Research* 35 (3), S. 615–624. DOI: 10.1080/00288330.2001.9517027.
- MUNLV (26.05.2004): Anforderungen an die Niederschlagsentwässerung im Trennverfahren, IV-9 031 001 2104. Ministerium für Umwelt, Landwirtschaft, Natur- und Verbraucherschutz des Landes Nordrhein-Westfalen. Online verfügbar unter [https://recht.nrw.de/lmi/owa/br\\_bes\\_text?anw\\_nr=1&gld\\_nr=7&ugl\\_nr=772&bes\\_id=2837](https://recht.nrw.de/lmi/owa/br_bes_text?anw_nr=1&gld_nr=7&ugl_nr=772&bes_id=2837), zuletzt geprüft am 02.12.2020.
- Muthusamy, M.; Tait, S.; Schellart, A.; Beg, M. N. A.; Carvalho, R. F.; Lima, J. (2018): Improving understanding of the underlying physical process of sediment wash-off from urban road surfaces. In: *Journal of Hydrology* 557, S. 426–433. DOI: 10.1016/j.jhydrol.2017.11.047.
- Nadler, A.; Meißner, E. (2007): Versickerung des Niederschlagswassers von befestigten Verkehrsflächen. Abschlußbericht Entwicklungsvorhaben Oktober 1996 - Oktober 2005. Stand: Dezember 2007. Augsburg: Bayerisches Landesamt für Umwelt (UmweltSpezial).
- Neupert, J. W.; Lau, P.; Venghaus, D.; Barjenbruch, M. (2021): Development of a New Testing Approach for Decentralised Technical Sustainable Drainage Systems. In: *Water* 13 (5), S. 722. DOI: 10.3390/w13050722.
- NJDEP (2013): Procedure for Obtaining Verification of a Stormwater Manufactured Treatment Device from New Jersey Corporation for Advanced Technology. Department of Environmental Protection, State of New Jersey.
- NJDEP (2021): New Jersey Department of Environmental Protection Laboratory Protocol to Assess Total Suspended Solids Removal by a Hydrodynamic Sedimentation Manufactured Treatment Device.
- OGewV (2016): Verordnung zum Schutz der Oberflächengewässer (Oberflächengewässerverordnung - OGewV), Oberflächengewässerverordnung vom 20. Juni 2016 (BGBl. I S. 1373), die durch Artikel 255 der Verordnung vom 19. Juni 2020 (BGBl. I S. 1328) geändert worden ist. Online verfügbar unter [http://www.gesetze-im-internet.de/ogewv\\_2016/index.html](http://www.gesetze-im-internet.de/ogewv_2016/index.html), zuletzt geprüft am 15.10.2020.
- Panko, J. M.; Chu, J.; Kreider, M. L.; Unice, K. M. (2013): Measurement of airborne concentrations of tire and road wear particles in urban and rural areas of France, Japan, and the United States. In: *Atmospheric Environment* 72, S. 192–199. DOI: 10.1016/j.atmosenv.2013.01.040.
- Pick, V.; Fettig, J.; Miethel, M. (2008): Modifikation eines dezentralen Behandlungssystems für Niederschlagswasser von Verkehrsflächen und Nachweis des Leistungsvermögens unter realen

- Bedingungen. Hg. v. Ministerium für Umwelt, Landwirtschaft, Natur- und Verbraucherschutz des Landes Nordrhein-Westfalen. Hochschule Ostwestfalen-Lippe. Düsseldorf.
- Polukarova, M.; Markiewicz, A.; Björklund, K.; Strömvall, A.-M.; Galfi, H.; Andersson Sköld, Y. et al. (2020): Organic pollutants, nano- and microparticles in street sweeping road dust and washwater. In: *Environment International* 135, S. 105337. DOI: 10.1016/j.envint.2019.105337.
- Preisung, W. (2018): Verkehrsstärke Frankfurt am Main (Stand: Dezember 2018). Emailkorrespondenz. Unter Mitarbeit von M. Dierschke. Frankfurt am Main, 07.12.2018.
- Quarzwerte GmbH (2014): Stoffdaten MILLISIL®-Mehle Werk Haltern. Frechen.
- Raudkivi, A. J. (1998): Loose boundary hydraulics. [4. ed.]. Rotterdam: Balkema.
- REWS (2021): Richtlinien für die Entwässerung von Straßen. 4. März 2022. Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen (FGSV). Köln (FGSV 539).
- Rhodes, E. P.; Ren, Z.; Mays, D. C. (2012): Zinc leaching from tire crumb rubber. In: *Environmental Science & Technology* 46 (23), S. 12856–12863. DOI: 10.1021/es3024379.
- RiStWag (2016): Richtlinien für bautechnische Maßnahmen an Straßen in Wasserschutzgebieten. Ausgabe 2016. Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen. Köln (FGSV R1 - Regelwerke, FGSV 514).
- Roger, S.; Montrejaud-Vignoles, M.; Andral, M.C.; Herremans, L.; Fortune, J.P (1998): Mineral, physical and chemical analysis of the solid matter carried by motorway runoff water. In: *Water Research* 32 (4), S. 1119–1125. DOI: 10.1016/S0043-1354(97)00262-5.
- Rogge, W. F.; Hildemann, L. M.; Mazurek, M. A.; Cass, G. R.; Simoneit, B. R. T. (1993): Sources of fine organic aerosol. 3. Road dust, tire debris, and organometallic brake lining dust. Roads as sources and sinks. In: *Environmental Science & Technology* 27 (9), S. 1892–1904. DOI: 10.1021/es00046a019.
- Rommel, S.; Helmreich, B. (2018): Influence of Temperature and De-Icing Salt on the Sedimentation of Particulate Matter in Traffic Area Runoff. In: *Water* 10 (12), S. 1738. DOI: 10.3390/w10121738.
- Rommel, S.; Helmreich, B. (2019): Are different catchment areas at one heavily trafficked road comparable as monitoring sites for stormwater quality improvement devices? In: *NOVATECH 2019, 10th International Conference on Sustainable Techniques and Strategies in Urban Water Management*, 1.-5.7.2019.
- Rommel, S. H.; Gelhardt, L.; Welker, A.; Helmreich, B. (2020): Settling of Road-Deposited Sediment: Influence of Particle Density, Shape, Low Temperatures, and Deicing Salt. In: *Water* 12 (11), S. 3126. DOI: 10.3390/w12113126.
- Salinas Salas, G. E. (2007): Sedimentationsverhalten von Submikrometerpartikeln in wässrigen Suspensionen. Dissertation. TU Dresden, Dresden. Fakultät Maschinenwesen, zuletzt geprüft am 09.12.2018.
- Sansalone, J. J.; Koran, J. M.; Smithson, J. A.; Buchberger, S. G. (1998): Physical Characteristics Of Urban Roadway Solids Transported During Rain Events. In: *Journal of Environmental Engineering* 124 (5), S. 427–440.
- Sansalone, J. J.; Lin, H.; Ying, G. (2009): Experimental and Field Studies of Type I Settling for Particulate Matter Transported by Urban Runoff. In: *Journal of Environmental Engineering* 135 (10), S. 953–963. DOI: 10.1061/(ASCE)EE.1943-7870.0000078.
- Sansalone, J. J.; Tittlebaum, M. E. (2001): Storm Water Transport of Particulate Matter From Elevated Urban Transportation Corridors into Waterways of Louisiana - The Role of Partitioning and Implications for Treatment. Louisiana Water Resources Research Institute Annual Technical Report.
- Sansalone, J. J.; Tribouillard, T. (1999): Variation in Characteristics of Abraded Roadway Particles as a Function of Particle Size. Implications for Water Quality and Drainage. In: *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board* 1690, S. 153–163. DOI: 10.3141/1690-18.
- Sartor, J. D.; Boyd, G. B. (1972): Water Pollution Aspects of Street Surface Contaminants. U.S. Environmental Protection Agency (EPA). Washington (Environmental Protection Technology Series, EPA-R2-72-081).
- Schmitt, T. G.; Welker, A.; Dierschke, M.; Uhl, M.; Maus, C.; Remmler, F. (2010): Entwicklung von Prüfverfahren für Anlagen zur dezentralen Niederschlagswasserbehandlung im Trennverfahren. Abschlussbericht über ein

- Entwicklungsprojekt, gefördert unter dem Az: 26840-23 von der Deutschen Bundesstiftung Umwelt. DWA Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall e.V.
- Selbig, W. R.; Fienen, M. N.; Horwath, J. A.; Bannerman, R. T. (2016): The Effect of Particle Size Distribution on the Design of Urban Stormwater Control Measures. In: *Water* 8 (1), S. 1–17.
- Semadeni-Davies, A. (2009): Fall Velocities of Stormwater Sediment Particles. Literature Review. Hg. v. NIWA Ltd for Auckland Regional Council. Auckland (Auckland Regional Council Technical Report, 2009/035).
- Shen, Z.; Liu, J.; Aini, G.; Gong, Y. (2016): A comparative study of the grain-size distribution of surface dust and stormwater runoff quality on typical urban roads and roofs in Beijing, China. In: *Environmental Science and Pollution Research International* 23 (3), S. 2693–2704. DOI: 10.1007/s11356-015-5512-5.
- Sommer, F.; Dietze, V.; Baum, A.; Sauer, J.; Gilge, S.; Maschowski, C.; Gieré, R. (2018): Tire Abrasion as a Major Source of Microplastics in the Environment. In: *Aerosol and Air Quality Research* 18 (8), S. 2014–2028. DOI: 10.4209/aaqr.2018.03.0099.
- StEB (2011): Dezentrale Niederschlagswasserbehandlung in Trennsystemen - Umsetzung des Trennerlasses. Abschlussbericht des Forschungsprojektes Gefördert vom Ministerium für Klimaschutz, Umwelt, Landwirtschaft, Natur- und Verbraucherschutz des Landes Nordrhein-Westfalen und der Bezirksregierung Köln. Projektlaufzeit: 10.07.2008 – 30.12.2010. Hg. v. Stadtentwässerungsbetriebe Köln. LANUV, NRW. Köln.
- Steinman, A. J. (2017): Impact of Transportation Infrastructure on Stream Water Quality: Contribution from Stormwater Runoff. Master thesis. University of Tennessee. Environmental Engineering.
- Stieß, M. (2009): Mechanische Verfahrenstechnik - Partikeltechnologie 1. 3., vollst. neu bearb. Aufl. Berlin [u.a.]: Springer (Springer-Lehrbuch, / Matthias Stieß ; 1).
- Stormwater Australia (2018): Stormwater Quality Improvement Device Evaluation Protocol - Field Monitoring. Version 1.2. Stormwater Australia.
- Sutherland, R. A. (2003): Lead in grain size fractions of road-deposited sediment. In: *Environmental Pollution* 121 (2), S. 229–237. DOI: 10.1016/S0269-7491(02)00219-1.
- TARP (2003): Protocol for Stormwater Best Management Practice Demonstrations. Technology Acceptance Reciprocity Partnership. California, Massachusetts, Maryland, New Jersey, Pennsylvania, Virginia, USA.
- Tedoldi, D.; Charafeddine, R.; Branchu, P.; Thomas, E.; Gromaire, M.-C. (2020): Intra- and inter-site variability of soil contamination in road shoulders - Implications for maintenance operations. In: *Science of the Total Environment* 769, S. 144862. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2020.144862.
- Toronto and Region Conservation Authority (2014): Procedure for Laboratory Testing of Oil-Grit Separators. For: The Canadian Environmental Technology Verification Program. Toronto and Region Conservation Authority.
- Trocmé, M. M.; Brodmann, R.; Gutmann, M.; Boivin, P.; Kaufmann, P. (2013): Strassenabwasserbehandlung an Nationalstrassen. Richtlinie - ASTRA 18005. V1.20. Hg. v. Bundesamt für Straßen ASTRA.
- Valotto, G.; Zannoni, D.; Guerriero, P.; Rampazzo, G.; Visin, F. (2019): Characterization of road dust and resuspended particles close to a busy road of Venice mainland (Italy). In: *International Journal of Environmental Science and Technology* 275 (Part A), S. 31. DOI: 10.1007/s13762-019-02246-1.
- Vaze, J.; Chiew, F.H.S. (2002): Experimental Study of Pollutant Accumulation on an Urban Road Surface. In: *Urban Water* 4, S. 379–389. DOI: 10.1016/S1462-0758(02)00027-4.
- Vesting, A. (2018): Entwicklung und Evaluation eines dezentralen Behandlungssystems zum Rückhalt von organischen Spurenstoffen und Schwermetallen aus Verkehrsflächenabflüssen. Schriftenreihe Siedlungswasserwirtschaft Bochum 74. Doktorarbeit. Ruhr-Universität Bochum, Bochum.
- Vogelsang, C.; Lusher, A. L.; Dadkhah, M. E.; Sundvor, I.; Umar, M.; Ranneklev, S. B. et al. (2019): Microplastics in road dust – characteristics, pathways and measures. Report no. 7361-2019. NIVA - Norwegian Institute for Water Research. Online verfügbar unter

- <https://www.miljodirektoratet.no/Documents/publikasjoner/M959/M959.pdf>, zuletzt geprüft am 31.03.2021.
- Voßwinkel, N.; Wietbüscher, M.; Schomaker-Loth J.; Mohn; R.; Uhl, M.; Grüning, H. (2018): Abschlussbericht zum Forschungsprojekt. NRW MEREBEN Maßnahmen zur Ertüchtigung von Regenklärbecken und Hinweise zu deren Neubau, Ministeriums für Umwelt, Landwirtschaft, Natur- und Verbraucherschutz des Landes Nordrhein-Westfalen – Phase 2: Neubau von Regenklärbecken –. Förderprogramm: ResA II. Fachhochschule Münster, Institut Für Wasser · Ressourcen · Umwelt.
- VSA-Merkblatt (2019): VSA-Leistungsprüfung für Behandlungsanlagen; Merkblatt „Leistungsprüfung für Adsorbentmaterialien und dezentrale technische Anlagen zur Behandlung von Niederschlagswasser. Verband Schweizer Abwasser- und Gewässerschutzfachleute (VSA). Glattbrugg.
- Wang, Q.; Zhang, Q.; Wang, X. C.; Huang, J.; Ge, Y. (2020): Impacts of key factors on heavy metal accumulation in urban road-deposited sediments (RDS): Implications for RDS management. In: *Chemosphere* 261, S. 127786. DOI: 10.1016/j.chemosphere.2020.127786.
- WashDoE (2011): Technology Guidance Manual for Evaluating Emerging Stormwater Treatment Technologies. Technology Assessment Protocol – Ecology (TAPE). Publication Number 11-10-061. Department of Ecology State of Washington (WashDoE). Washington. Online verfügbar unter <https://apps.ecology.wa.gov/publications/documents/1110061.pdf>, zuletzt geprüft am 16.06.2021.
- WashDoE (2018): Technology Assessment Protocol – Ecology (TAPE). Process overview. Publication Number 18-10-039. Department of Ecology State of Washington (WashDoE). Washington. Online verfügbar unter <https://apps.ecology.wa.gov/publications/documents/1810039.pdf>, zuletzt geprüft am 16.06.2021.
- Welker, A. (2004): Schadstoffströme im urbanen Wasserkreislauf - Aufkommen und Verteilung, insbesondere in den Abwasserentsorgungssystemen. Schriftenreihe des FG Siedlungswasserwirtschaft, Band 20. Habilitationsschrift. Technische Universität Kaiserslautern, Kaiserslautern. Online verfügbar unter <https://kluedo.ub.uni-kl.de/frontdoor/index/index/year/2005/docId/1678>, zuletzt geprüft am 07.10.2020.
- Welker, A.; Dierschke, M.; Gelhardt, L. (2019a): Methodische Untersuchungen zur Bestimmung von AFS63 (Feine Abfiltrierbare Stoffe) in Verkehrsflächenabflüssen. Fachbericht. In: *gwf Wasser - Abwasser* 04, S. 79–88.
- Welker, A.; Dierschke, M.; Heusch, S. (2018): Semizentrale Anlage zur Behandlung von Verkehrsflächenabflüssen – Messprogramm an der A 485 in Gießen. In: *Straße und Autobahn* 69 (12), S. 999–1008.
- Welker, A.; Dierschke, M.; Schmitt, T. G. (2008a): Entwicklung eines Prüfverfahrens für den Rückhalt von Metallionen in Niederschlagsabflüssen von Metalldächern, Schlussbericht Phase I: Grundlagen und Entwurf eines Prüfverfahrens. im Auftrag des LfU Bayern, Fachgebiet Siedlungswasserwirtschaft. TU Kaiserslautern. Augsburg.
- Welker, A.; Dierschke, M.; Schmitt, T. G. (2008b): Entwicklung eines Prüfverfahrens für den Rückhalt von Metallionen in Niederschlagsabflüssen von Metalldächern, Schlussbericht Phase II: Fortschreibung, Konzeption des Prüfstandes, Aufstellen eines Messplanes zur Verifikation des Prüfverfahrens. im Auftrag des LfU Bayern, Fachgebiet Siedlungswasserwirtschaft. TU Kaiserslautern. Augsburg.
- Welker, A.; Dierschke, M.; Schmitt, T. G. (2012): Entwicklung eines Prüfverfahrens für den Rückhalt von Metallionen in Niederschlagsabflüssen von Metalldächern, Schlussbericht, Phase III: Verifizierung des Prüfverfahrens und Versuche zur Dauerhaftigkeit. 1. Ergänzung zu Phase III: Dauerhaftigkeit, Juli 2010 2. Ergänzung zu Phase III: Tracerveruche, Schwermetallprüfung, Nov. 2011 tectraa, TU Kaiserslautern. Im Auftrag des LfU Bayern. Augsburg.
- Welker, A.; Gelhardt, L.; Dierschke, M. (2019b): Vegetation and temporal variability of particle-size distribution (PSD) and organic matter of urban road-deposited sediments in Frankfurt am Main. Poster Paper. In: *NOVATECH 2019, 10th International Conference on Sustainable Techniques and Strategies in Urban Water Management*, 1.-5.7.2019.

- WHG (2009): Gesetz zur Ordnung des Wasserhaushalts (Wasserhaushaltsgesetz - WHG), Wasserhaushaltsgesetz vom 31. Juli 2009 (BGBl. I S. 2585), das zuletzt durch Artikel 1 des Gesetzes vom 19. Juni 2020 (BGBl. I S. 1408) geändert worden ist. Online verfügbar unter [http://www.gesetze-im-internet.de/whg\\_2009/BJNR258510009.html#BJNR258510009BJNG000400000](http://www.gesetze-im-internet.de/whg_2009/BJNR258510009.html#BJNR258510009BJNG000400000), zuletzt geprüft am 15.10.2020.
- Wicke, D.; Cochrane, T. A.; O'Sullivan, A. D. (2012): Atmospheric deposition and storm induced runoff of heavy metals from different impermeable urban surfaces. In: *Journal of Environmental Monitoring* 14 (1), S. 209–216. DOI: 10.1039/c1em10643k.
- Winston, R. J.; Anderson, A. R.; Hunt, W. F. (2015): Characterization of Runoff Particle Size Distribution (PSD), Nutrients, and Gross Solids from Roadways across North Carolina and Modeling Sediment Reduction in Roadway Stormwater Control Measures using a Coupled Particle Settling and Hydraulic Model. NCDOT Research Project 2011-35 Final Report. North Carolina Department of Transportation, zuletzt geprüft am 05.11.2018.
- Winston, R. J.; Hunt, W. F. (2017): Characterizing Runoff from Roads: Particle Size Distributions, Nutrients, and Gross Solids. In: *Journal of Environmental Engineering* 143 (1), S. 4016074. DOI: 10.1061/(ASCE)EE.1943-7870.0001148.
- Winston, R. J.; Witter, J. D. (2019): Evaluating the Particle Size Distribution and Gross Solids Contribution of Stormwater Runoff from Ohio's Roads. Final Report. State Job Number 135258. Columbus, Ohio, USA.
- Wu, J.; Ren, Y.; Wang, X.; Chen, L.; Liu, G. (2015): Nitrogen and phosphorus associating with different size suspended solids in roof and road runoff in Beijing, China. In: *Environmental Science and Pollution Research International* 22 (20), S. 15788–15795. DOI: 10.1007/s11356-015-4743-9.
- Ying, G.; Sansalone, J. (2008): Granulometric Relationships for Urban Source Area Runoff as a Function of Hydrologic Event Classification and Sedimentation. In: *Water, Air, & Soil Pollution* 193 (1-4), S. 229–246. DOI: 10.1007/s11270-008-9685-0.
- Yu, J.; Yu, H.; Xu, L.; Tao, T.; Zhang, Y.; Hua, Y.; Nkolola, N. B. (2017): Characteristic comparison of heavy metal contamination between road-deposited and roof-deposited sediments in suburban area. In: *Environmental Science and Pollution Research International* 24 (14), S. 12871–12881. DOI: 10.1007/s11356-017-8872-1.
- Yuen, J. Q.; Olin, P. H.; Lim, H. S.; Benner, S. G.; Sutherland, R. A.; Ziegler, A. D. (2012): Accumulation of potentially toxic elements in road deposited sediments in residential and light industrial neighborhoods of Singapore. In: *Journal of Environmental Management* 101, S. 151–163. DOI: 10.1016/j.jenvman.2011.11.017.
- Yun, Y.; Park, H.; Kim, L.; Ko, S. (2010): Size Distributions and Settling Velocities of Suspended Particles from Road and Highway. In: *Journal of Civil Engineering* 14 (4), S. 481–488.
- Zafra, C. A.; Temprano, J.; Tejero, I. (2008): Particle size distribution of accumulated sediments on an urban road in rainy weather. In: *Environmental Technology* 29 (5), S. 571–582. DOI: 10.1080/09593330801983532.
- Zafra-Mejía, C.; Rondón-Quintana, H.; Gutiérrez-Malaxechebarria, Á. (2018): Heavy metal contribution by runoff in a high-altitude megacity: a method based on the road-deposited sediment characterization. In: *DYNA* 85 (206), S. 85–94. DOI: 10.15446/dyna.v85n206.64839.
- Zanders, J. M. (2005): Road sediment. Characterization and implications for the performance of vegetated strips for treating road run-off. In: *Science of the Total Environment* 339 (1-3), S. 41–47. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2004.07.023.
- Zarezadeh, V.; Lung, T.; Dorman, T.; Shipley, H. J.; Giacomoni, M. (2018): Assessing the performance of sand filter basins in treating urban stormwater runoff. In: *Environmental Monitoring and Assessment* 190 (12), S. 697. DOI: 10.1007/s10661-018-7069-5.

- Zhang, J.; H., Pei; Krebs, P. (2016): The influences of dissolved organic matter and surfactant on the desorption of Cu and Zn from road-deposited sediment. In: *Chemosphere* 150, S. 63–70. DOI: 10.1016/j.chemosphere.2016.02.015.
- Zhang, J.; Hua, P.; Krebs, P. (2015): The build-up dynamic and chemical fractionation of Cu, Zn and Cd in road-deposited sediment. In: *Science of the Total Environment* 532, S. 723–732. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2015.06.074.
- Zhao, B.; Liu, A.; Wu, G.; Li, D.; Guan, Y. (2017): Characterization of heavy metal desorption from road-deposited sediment under acid rain scenarios. In: *Journal of Environmental Sciences* 51, S. 284–293. DOI: 10.1016/j.jes.2016.05.032.
- Zhao, H.; Chen, X.; Hao, S.; Jiang, Y.; Zhao, J.; Zou, C.; Xie, W. (2016): Is the wash-off process of road-deposited sediment source limited or transport limited? In: *Science of the Total Environment* 563-564, S. 62–70. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2016.04.123.
- Zhao, H.; Jiang, Q.; Ma, Y.; Xie, W.; Li, X.; Yin, C. (2018a): Influence of urban surface roughness on build-up and wash-off dynamics of road-deposited sediment. In: *Environmental Pollution*. DOI: 10.1016/j.envpol.2018.09.105.
- Zhao, H.; Jiang, Q.; Xie, W.; Li, X.; Yin, C. (2018b): Role of urban surface roughness in road-deposited sediment build-up and wash-off. In: *Journal of Hydrology* 560, S. 75–85. DOI: 10.1016/j.jhydrol.2018.03.016.
- Zhao, H.; Yin, C.; Chen, M.; Wang, W. (2009): Risk Assessment of Heavy Metals in Street Dust Particles to a Stream Network. In: *Soil and Sediment Contamination* 18 (2), S. 173–183. DOI: 10.1080/15320380802660263.
- Zhiyao, S.; Tingting, W.; Fumin, X.; Ruijie, L. (2008): A simple formula for predicting settling velocity of sediment particles. In: *Water Science and Engineering* 1 (1), S. 37–43. DOI: 10.1016/S1674-2370(15)30017-X.
- Zhu, W.; Bian, B.; Li, L. (2008): Heavy metal contamination of road-deposited sediments in a medium size city of China. In: *Environmental Monitoring and Assessment* 147 (1-3), S. 171–181. DOI: 10.1007/s10661-007-0108-2.
- Zuo, X.; Fu, D.; Li, H.; Singh, R. P. (2011): Distribution Characteristics of Pollutants and Their Mutual Influence in Highway Runoff. In: *Clean – Soil, Air, Water* 39 (10), S. 956–963. DOI: 10.1002/clen.201000422.

## A Anlage – Versuchsrandbedingungen in den Prüfstellen

### A.1 IKT Gelsenkirchen

Das beim IKT (Institut für Unterirdische Infrastruktur gGmbH), Exterbruch 1, 45886 Gelsenkirchen verwendete Trinkwasser des Verbundwasserwerks Essen hatte 2021 eine Leitfähigkeit von im Durchschnitt 488  $\mu\text{S}/\text{cm}$ , einen pH-Wert von 7,9 und eine Temperatur von 12 °C. Das Prüfmehl wurde über eine volumetrische Feststoffdosierung mit Dosierschnecke (Typ K-MV-KT20, Firma K-TRON Deutschland GmbH) dosiert. Die AFS- und AFS63-Bestimmung erfolgte in Anlehnung an die DIN 38409-2 mittels Unterdruck-Membranfiltration (0,45  $\mu\text{m}$  Cellulosenitrat-Filter mit einem Durchmesser von  $d = 100 \text{ mm}$ ). Die AFS63-Proben wurden vor der Filtration über ein Metallsieb,  $d = 10 \text{ cm}$ , mit einer Maschenweite von 63  $\mu\text{m}$  gesiebt.

### A.2 TRLP Würzburg

Das bei der TRLP (TÜV Rheinland TRLP Products GmbH), Dreikronenstraße 31, 97082 Würzburg verwendete Trinkwasser der Stadtwerke Würzburg AG aus dem Hochbehälter Galgenberg hatte 2021 eine Leitfähigkeit von im Durchschnitt 1.237  $\mu\text{S}/\text{cm}$ , einen pH-Wert von 7,15 und eine Temperatur von 14 bis 15°C. Das Prüfmehl wurde über eine volumetrische Feststoffdosierung mit Dosierschnecke (Typ K-MV-KT20, Firma K-TRON Deutschland GmbH) dosiert. Die AFS- und AFS63-Bestimmung erfolgte in Anlehnung an die DIN 38409-2 mittels Unterdruck-Membranfiltration (0,45  $\mu\text{m}$  Celluloseazetat-Filter mit einem Durchmesser von  $d = 47 \text{ mm}$ ). Die AFS63-Proben wurden vor der Filtration über ein Metallsieb,  $d = 10 \text{ cm}$ , mit einer Maschenweite von 63  $\mu\text{m}$  gesiebt.

## B Anlage – Versuchssetup und Ergebnisse Voruntersuchungen des Einflusses der Konzentration auf den Wirkungsgrad

### B.1 Anlage A

#### B.1.1 Versuchssetup

Tabelle 48: Versuchssetup zur Variation der Eingangskonzentration (Anlage A)

	Prüfregenspenden [l/(s · ha)]	Prüfdauer [h]	Niederschlagsabflussvolumen [m <sup>3</sup> ]	Durchfluss [m <sup>3</sup> /h]	Millisil-Zugabe [kg]	Millisil-Konzentration [mg/l]	Probennahme		
Tag 1	2,5	2	3,1	1,6	0,8	250	je 4 Proben auf AFS63 und AFSges nach 60 min, 80 min, 100 min, 120 min Austauschvolumen nach < 1 h 40 Proben		
	Pause	1							
	2,5	2	3,1	1,6	1,6	500			
	Pause	1							
	2,5	2	3,1	1,6	3,1	1.000			
	<b>Summe Tag 1</b>	<b>8</b>	<b>9,4</b>		<b>5,5</b>				
nachts									
Tag 2	2,5	2	3,1	1,6	6,2	2.000			
	Pause	1							
	2,5	2	3,1	1,6	12,5	4.000			
	<b>Zwischen-summe</b>	<b>5</b>	<b>6,2</b>		<b>18,7</b>				
	Pause	1							
	Einstellphase	0,5							
Tag 2	25	0,8	12,5	15,6	3,1	250	je 4 Proben auf AFS63 und AFSges nach 12, 24, 36, 48 min Austauschvolumen < 5 min 40 Proben		
	<b>Summe Tag 2</b>	<b>7,3</b>	<b>18,7</b>		<b>21,8</b>				
	nachts								
	Tag 3	25	0,8	12,5	15,6	6,2		500	
Pause		1							
25		0,8	12,5	15,6	12,5	1.000			
Pause		1							
25		0,8	12,5	15,6	25,0	2.000			
Pause		1							
25		0,8	12,5	15,6	49,9	4.000			
<b>Summe Tag 3</b>	<b>6,2</b>	<b>49,9</b>		<b>93,6</b>					

## B.1.2 Versuchsprotokolle

**Tabelle 49: Versuch 1 mit  $r = 2,5 \text{ l/(s} \cdot \text{ha)}$**

Durchgang		1	2	3	4	5
<b>Soll-Konzentration</b>	<b>mg/l</b>	<b>250</b>	<b>500</b>	<b>1.000</b>	<b>2.000</b>	<b>4.000</b>
Versuchsdauer	s	7.200	7.200	7.200	7.200	7.200
Volumenstrom	l/s	0,44	0,44	0,44	0,44	0,44
Wassermenge	l	3.168	3.168	3.168	3.168	3.168
Dosierung Millisil	g/s	0,111	0,222	0,444	0,889	1,778
Menge Millisil	g	800	1.600	3.200	6.400	12.800
Ist-Konzentration	mg/l	253	505	1.010	2.020	4.040

**Tabelle 50: Versuch 2 mit  $r = 25 \text{ l/(s} \cdot \text{ha)}$**

Durchgang		1	2	3	4	5
<b>Soll-Konzentration</b>	<b>mg/l</b>	<b>250</b>	<b>500</b>	<b>1.000</b>	<b>2.000</b>	<b>4.000</b>
Versuchsdauer	s	2.880	2.880	2.880	2.880	2.880
Volumenstrom	l/s	4,3	4,3	4,3	4,3	4,3
Wassermenge	l	12.384	12.384	12.384	12.384	12.384
Dosierung Millisil	g/s	1,076	2,153	4,340	8,681	17,326
Menge Millisil	g	3.100	6.200	12.500	25.000	49.900
Ist-Konzentration	mg/l	250	501	1.009	2.019	4.029

### B.1.3 Versuchsergebnisse

**Tabelle 51: Ablaufkonzentrationen Anlage A mit  $r = 2,5 \text{ l}/(\text{s} \cdot \text{ha})$**

Ablaufkonzentration mg/l		Probe 1 (60. Min.)	Probe 2 (80. Min.)	Probe 3 (100. Min.)	Probe 4 (120. Min.)	Mittelwert
Durchgang 1 250 mg/l	AFSges	46	47	54	50	<b>49</b>
	AFS63	44	47	53	51	<b>48</b>
Durchgang 2 500 mg/l	AFSges	104	150	115	119	<b>122</b>
	AFS63	106	164	116	110	<b>124</b>
Durchgang 3 1.000 mg/l	AFSges	219	292	214	196	<b>230</b>
	AFS63	196	274	217	247	<b>234</b>
Durchgang 4 2.000 mg/l	AFSges	398	426	410	558	<b>448</b>
	AFS63	378	429	448	563	<b>455</b>
Durchgang 5 4.000 mg/l	AFSges	1.337	1.403	980	1.804	<b>1.381</b>
	AFS63	1.176	1.177	971	1.406	<b>1.182</b>

**Tabelle 52: Ablaufkonzentrationen Anlage A mit  $r = 25 \text{ l}/(\text{s} \cdot \text{ha})$**

Ablaufkonzentration mg/l		Probe 1 (12. Min.)	Probe 2 (24. Min.)	Probe 3 (36. Min.)	Probe 4 (48. Min.)	Mittelwert
Durchgang 1 250 mg/l	AFSges	174	147	137	161	<b>155</b>
	AFS63	184	124	96	99	<b>126</b>
Durchgang 2 500 mg/l	AFSges	273	296	280	278	<b>282</b>
	AFS63	176	201	183	195	<b>189</b>
Durchgang 3 1.000 mg/l	AFSges	566	580	380	601	<b>532</b>
	AFS63	378	379	253	415	<b>356</b>
Durchgang 4 2.000 mg/l	AFSges	1.054	1.104	1.135	1.110	<b>1.100</b>
	AFS63	740	786	799	773	<b>775</b>
Durchgang 5 4.000 mg/l	AFSges	2.228	2.044	2.197	1.710	<b>2.045</b>
	AFS63	1.511	1.523	1.569	1.458	<b>1.515</b>

## B.2 Anlage B

### B.2.1 Versuchssetup

Tabelle 53: Versuchssetup zur Variation der Eingangskonzentration (Anlage B)

	Prüfregenspenden [l/(s *ha)]	Prüfdauer [h]	Niederschlagsvolumen [m³]	Durchfluss [m³/h]	Millisil-Zugabe [kg]	Millisil-Konzentration [mg/l]	Probennahme	
Tag 1	2,5	2	2,3	1,2	0,6	250	keine	
	2,5	2	2,3	1,2	1,2	500		
	Pause	1						
	2,5	2	2,3	1,2	2,3	1.000		
	<b>Summe Tag 1</b>	<b>7</b>	<b>7,0</b>		<b>4,1</b>			
nachts							je 4 Proben auf AFS63 und AFSges nach 60 min, 80 min, 100 min, 120 min Austauschvolumen nach < 1 h 40 Proben	
Tag 2	2,5	2	2,3	1,2	4,7	2.000		
	Pause	1						
	2,5	2	2,3	1,2	7,0	3.000		
	Pause	1						
	2,5	2	2,3	1,2	9,4	4.000		
<b>Summe Tag 2</b>	<b>8</b>	<b>7,0</b>		<b>21,1</b>				
nachts							je 4 Proben auf AFS63 und AFSges nach 12, 24, 36, 48 min Austauschvolumen < 5 min 40 Proben	
Tag 3	Einstellphase	0,5						
	25	0,8	9,4	11,7	4,7	500		
	Pause	1						
	25	0,8	9,4	11,7	9,4	1.000		
	Pause	1						
	25	0,8	9,4	11,7	18,7	2.000		
	Pause	1						
	25	0,8	9,4	11,7	28,1	3.000		
	Pause	1						
25	0,8	9,4	11,7	37,4	4.000			
<b>Summe Tag 3</b>	<b>8,5</b>	<b>46,8</b>		<b>98,3</b>				

## B.2.2 Versuchsprotokolle

**Tabelle 54: Versuch 1 mit  $r = 2,5 \text{ l}/(\text{s} \cdot \text{ha})$**

Durchgang		Vorbe- lastung, 0	1	2	3	4	5
Soll-Konzentration	mg/l	250	500	1.000	2.000	3.000	4.000
Wassermenge	l	2.340	2.340	2.340	2.340	2.340	2.340
Versuchsdauer	s	7.200	7.200	7.200	7.200	7.200	7.200
Volumenstrom	l/s	0,325	0,325	0,325	0,325	0,325	0,325
Dosierung Millisil	g/s	0,081	0,163	0,325	0,650	0,975	1,300
Ist-Millisil- Konzentration	mg/l	246	503	995	2.000	3.000	4.000
AFS63-Konzentration	mg/l	121	246	487	980	1.470	1.960

**Tabelle 55: Versuch 2 mit  $r = 25 \text{ l}/(\text{s} \cdot \text{ha})$**

Durchgang		1	2	3	4	5
Soll-Konzentration	mg/l	500	1.000	2.000	3.000	4.000
Wassermenge	l	9.360	9.360	9.360	9.360	9.360
Versuchsdauer	s	2.880	2.880	2.880	2.880	2.880
Volumenstrom	l/s	3,25	3,25	3,25	3,25	3,25
Dosierung Millisil	g/s	1,625	3,25	6,50	9,75	13,00
Ist-Millisil- Konzentration	mg/l	499	997	1.995	3.000	3.990
AFS63-Konzentration	mg/l	244	489	977	1.470	1.955

### B.2.3 Versuchsergebnisse

**Tabelle 56: Ablaufkonzentrationen Anlage B mit  $r = 2,5 \text{ l/(s} \cdot \text{ha)}$**

Ablaufkonzentration mg/l		Probe 1 (60. Min.)	Probe 2 (80. Min.)	Probe 3 (100. Min.)	Probe 4 (120. Min.)	Mittelwert
Durchgang 0 250 mg/l	AFSges			2	3	<b>2,5</b>
	AFS63			2	3	<b>2,5</b>
Durchgang 1 500 mg/l	AFSges	6	7	9	11	<b>8</b>
	AFS63	6	7	8	11	<b>8</b>
Durchgang 2 1.000 mg/l	AFSges	16	19	22	25	<b>20</b>
	AFS63	16	19	21	24	<b>20</b>
Durchgang 3 2.000 mg/l	AFSges	20	26	32	39	<b>29</b>
	AFS63	20	25	31	38	<b>28</b>
Durchgang 4 3.000 mg/l	AFSges	52	62	71	79	<b>66</b>
	AFS63	52	62	71	79	<b>66</b>
Durchgang 5 4.000 mg/l	AFSges	89	102	109	118	<b>105</b>
	AFS63	89	86	109	116	<b>100</b>

**Tabelle 57: Ablaufkonzentrationen Anlage B mit  $r = 25 \text{ l}/(\text{s} \cdot \text{ha})$**

Ablaufkonzentration mg/l		Probe 1 (12. Min.)	Probe 2 (24. Min.)	Probe 3 (36. Min.)	Probe 4 (48. Min.)	Mittelwert
Durchgang 1 500 mg/l	AFSges	81	110	122	130	<b>111</b>
	AFS63	81	111	112	127	<b>108</b>
Durchgang 2 1.000 mg/l	AFSges	115	187	257	244	<b>201</b>
	AFS63	114	185	210	234	<b>186</b>
Durchgang 3 2.000 mg/l	AFSges	202	349	432	477	<b>365</b>
	AFS63	185	328	427	437	<b>345</b>
Durchgang 4 3.000 mg/l	AFSges	393	527	637	700	<b>564</b>
	AFS63	389	519	636	676	<b>555</b>
Durchgang 5 4.000 mg/l	AFSges	541	730	849	965	<b>771</b>
	AFS63	517	721	842	937	<b>754</b>

## C Anlage – detaillierte Prüfergebnisse

### C.1 Anlage A

Tabelle 58: Ergebnisse AFS-, AFS63-Konzentration je Teilprüfung (Beladung vor TP1 bis 3; IKT)

	Prüfregenspende l/(s · ha)	Probe Nr.	AFSges mg/l	AFS63 mg/l
TP1	2,5	1	865	379
		2	655	573
		3	693	519
		4	531	542
		5	302	333
		<b>Mittelwert</b>	<b>609</b>	<b>469</b>
TP2	6	1	474	488
		2	254	259
		3	758	416
		4	227	226
		5	1208	593
		<b>Mittelwert</b>	<b>584</b>	<b>396</b>
TP3	25	1	969	667
		2	468	423
		3	465	373
		4	431	383
		5	523	363
		<b>Mittelwert</b>	<b>571</b>	<b>442</b>
Spülstoß	1,2 · 25	1	698	
		2		543
		3	669	
		4		409
		5	470	
		6		236
		7	1768	
		8		98
		9	83	
		10		41
		11	37	
		12		33
		13	30	
		14		24
		15	24	
<b>Mittelwert</b>	<b>472</b>	<b>198</b>		

## C.2 Anlage B

**Tabelle 59: Ergebnisse AFS-, AFS63-Konzentration je Teilprüfung (Beladung nach TP1 bis 3; TRLP)**

Teilprüfung	Prüfregenspende l/(s · ha)	Probe Nr.	AFSges mg/l	AFS63 mg/l
TP1	2,5	1	9	8
		2	25	25
		3	38	38
		4	47	47
		5	52	51
		<b>Mittelwert</b>	<b>34</b>	<b>34</b>
TP2	6	1	35	35
		2	63	63
		3	85	85
		4	97	97
		5	97	95
		<b>Mittelwert</b>	<b>75</b>	<b>75</b>
TP3	25	1	146	142
		2	218	218
		3	236	234
		4	247	245
		5	256	253
		<b>Mittelwert</b>	<b>220</b>	<b>218</b>
Spülstoß	1,2 · 25	1		33
		2	34	
		3		22
		4	25	
		5		25
		6	28	
		7		30
		8	30	
		9		30
		10	28	
		11		29
		12	28	
		13		26
		14	26	
		15		25
<b>Mittelwert</b>	<b>28</b>	<b>27</b>		

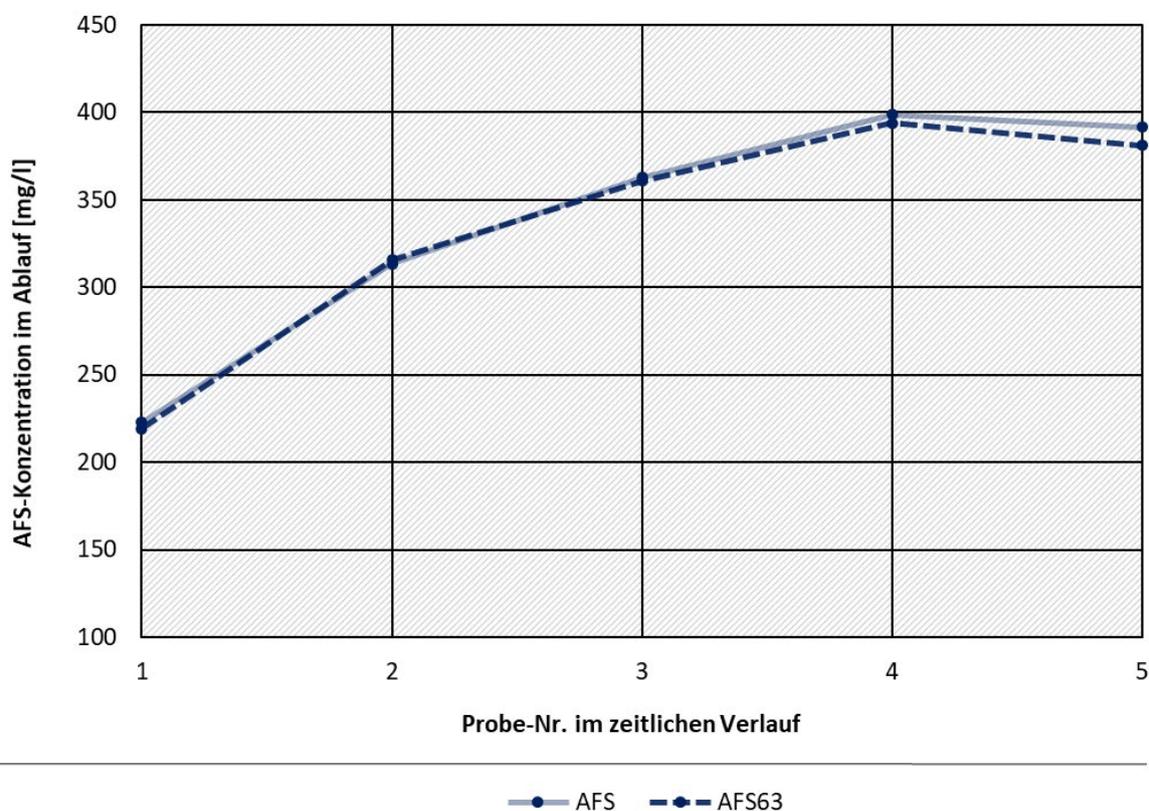
**Tabelle 60: Ergebnisse AFS-, AFS63-Konzentration je Teilprüfung (Beladung nach TP1 bis 3; IKT)**

Teilprüfung	Prüfregenspende l/(s · ha)	Probe Nr.	AFSges mg/l	AFS63 mg/l
TP1	2,5	1	7	7
		2	25	26
		3	38	38
		4	49	48
		5	52	51
		<b>Mittelwert</b>	<b>9</b>	<b>8</b>
TP2	6	1	42	43
		2	61	63
		3	79	78
		4	89	90
		5	99	98
		<b>Mittelwert</b>	<b>35</b>	<b>35</b>
TP3	25	1	138	137
		2	202	201
		3	230	232
		4	239	240
		5	248	246
		<b>Mittelwert</b>	<b>146</b>	<b>142</b>
Spülstoß	1,2 · 25	1	133	
		2		307
		3	238	
		4		139
		5	98	
		6		103
		7	106	
		8		106
		9	103	
		10		102
		11	102	
		12		99
		13	98	
		14		92
		15	91	
<b>Mittelwert</b>	<b>121</b>	<b>135</b>		

**Tabelle 61: Ergebnisse AFS-, AFS63-Konzentration während der Beladung nach TP1 bis 3 (IKT)**

	Beladung (c = 3.000 mg/l)	
	AFS [mg/l]	AFS63 [mg/l]
Probe 1	223	219
Probe 2	313	316
Probe 3	363	361
Probe 4	399	394
Probe 5	392	381

**Abbildung 80: Ablaufkonzentrationen während der Beladung mit C = 3.000 mg/l und r = 6 l/(s · ha)**



Quelle: eigene Darstellung, Frankfurt University of Applied Sciences 2022

Der Wirkungsgrad während der Beladung betrug  $\eta_{\text{AFS63}} = 77\%$  und ist damit ähnlich des Wirkungsgrads der Teilprüfung 2 des Versuchs aus Kap. 8.2.2 mit einer Zulaufkonzentration von  $C = 1.000 \text{ mg/l}$ , einer Regenspender von  $r = 6 \text{ l/(s} \cdot \text{ha)}$  und einer Vorbeladung vor den Teilprüfungen mit  $\eta_{\text{AFS63}} = 83\%$ .

**Tabelle 62: Ergebnisse AFS-, AFS63-Konzentration je Teilprüfung (Beladung vor TP1 bis 3; IKT)**

Teilprüfung	Prüfregenspende l/(s · ha)	Probe Nr.	AFSges mg/l	AFS63 mg/l
TP1	2,5	1	80	85
		2	84	86
		3	80	80
		4	72	73
		5	69	68
		<b>Mittelwert</b>	<b>77</b>	<b>78</b>
TP2	6	1	45	44
		2	69	70
		3	89	90
		4	99	103
		5	109	110
		<b>Mittelwert</b>	<b>82</b>	<b>83</b>
TP3	25	1	157	157
		2	230	226
		3	245	246
		4	248	244
		5	264	254
		<b>Mittelwert</b>	<b>229</b>	<b>225</b>
Spülstoß	1,2 · 25	1	108	
		2		102
		3	74	
		4		86
		5	96	
		6		98
		7	100	
		8		102
		9	95	
		10		97
		11	97	
		12		95
		13	92	
		14		93
		15	88	
<b>Mittelwert</b>	<b>94</b>	<b>96</b>		

### C.3 Anlage C

**Tabelle 63: Ergebnisse AFS-, AFS63-Konzentration je Teilprüfung (Beladung nach TP1 bis 3; TRLP)**

Teilprüfung	Prüfregenspende l/(s · ha)	Probe Nr.	AFSges mg/l	AFS63 mg/l
TP1	2,5	1	38	38
		2	40	40
		3	42	42,
		4	42	41
		5	44	44
		Mittelwert	41	41
TP2	6	1	83	83
		2	90	87
		3	95	95
		4	101	98
		5	105	105
		Mittelwert	94	94
TP3	25	1	679	671
		2	393	340
		3	378	362
		4	395	354
		5	404	354
		Mittelwert	450	416
Spülstoß	1,2 · 25	1		13478
		2	4187	
		3		1993
		4	1680	
		5		996
		6	1162	
		7		619
		8	716	
		9		450
		10	549	
		11		422
		12	474	
		13		346
		14	408	
		15		244
<b>Mittelwert</b>		<b>1311</b>	<b>2319</b>	

**Tabelle 64: Ergebnisse AFS-, AFS63-Konzentration je Teilprüfung (Beladung vor TP1 bis 3; IKT)**

Teilprüfung	Prüfregenspende l/(s · ha)	Probe Nr.	AFSges mg/l	AFS63 mg/l
TP1	2,5	1	723	78
		2	13	14
		3	54	55
		4	59	59
		5	57	58
		<b>Mittelwert</b>	<b>51</b>	<b>52</b>
TP2	6	1	176	177
		2	183	179
		3	188	182
		4	199	197
		5	207	215
		<b>Mittelwert</b>	<b>191</b>	<b>190</b>
TP3	25	1	1632	1586
		2	615	594
		3	1177	520
		4	506	429
		5	751	400
		<b>Mittelwert</b>	<b>922</b>	<b>706</b>
Spülstoß	1,2 · 25	1	5970	
		2		4237
		3	2672	
		4		1147
		5	1270	
		6		619
		7	788	
		8		454
		9	755	
		10		364
		11	522	
		12		251
		13	429	
		14		224
		15	345	
<b>Mittelwert</b>	<b>1594</b>	<b>1042</b>		

## C.4 Anlage D

**Tabelle 65: Ergebnisse AFS-, AFS63-Konzentration je Teilprüfung (Beladung nach TP1 bis 3; TRLP)**

Teilprüfung	Prüfregenspende l/(s · ha)	Probe Nr.	AFSges mg/l	AFS63 mg/l
TP1	2,5	1	0	0
		2	0	0
		3	0	0
		4	0	0
		5	0	0
		<b>Mittelwert</b>	<b>0</b>	<b>0</b>
TP2	6	1	0	0
		2	0	0
		3	0	0
		4	0	0
		5	0	0
		<b>Mittelwert</b>	<b>0</b>	<b>0</b>
TP3	25	1	43	44
		2	29	28
		3	29	45
		4	23	33
		5	30	31
		<b>Mittelwert</b>	<b>31</b>	<b>36</b>
Spülstoß	100	1		0 (kein Ablauf)
		2	0 (kein Ablauf)	
		3		563 (halbe Flasche)
		4	2969	
		5		5757
		6	1916	
		7		616
		8	276	
		9		198
		10	128	
		11		106
		12	76	
		13		59
		14	48	
		15		40
<b>Mittelwert</b>	<b>773</b>	<b>917</b>		

## **D Anlage - Ausformuliertes Prüfverfahren (expliziter Bericht)**

## **E Anlage - Übersicht über recherchierte dezentrale Niederschlagswasserbehandlungsanlagen (expliziter Bericht)**