Karlsruher Institut für Technologie

Endbericht zum Forschungsvorhaben „Optimierung des Feststoffrückhalts im Trennsystem durch Schrägklärer“

31. Oktober 2018

Mike Kemper und Stephan Fuchs

Gefördert durch das Ministerium für Klimaschutz, Umwelt, Landwirtschaft, Natur- und Verbraucherschutz des Landes Nordrhein-Westfalen

Gefördert durch das Ministerium für Klimaschutz, Umwelt, Landwirtschaft, Natur- und Verbraucherschutz des Landes Nordrhein-Westfalen

Auftragnehmer

Karlsruher Institut für Technologie (KIT)
Institut für Wasser und Gewässerentwicklung (IWG)
Fachbereich Siedlungswasserwirtschaft und Wassergütewirtschaft
Gotthard-Franz-Str. 3
76131 Karlsruhe

Projektlaufzeit:

01/08/2015 bis 31/07/2018

……..

PD Dr.-Ing. Stephan Fuchs

Karlsruhe, den 31.10.2018

Zusammenfassung

Die Sedimentationswirksamkeit von nach den geltenden Regeln bemessenen Regenwasserbehandlungsanlagen im Misch- und Trennsystem ist gering und liegt im Jahresmittel in der Regel bei Werten von ≤ 30 %. Möglichkeiten zur Verbesserung der Leistung bestehender Anlagen liegen in der Reduzierung der Oberflächenbeschickung und in der Optimierung der Durchströmung. Beides kann mit vertretbarem Aufwand in Schrägklärern erreicht werden. Großtechnische Erfahrungen und Laboruntersuchungen zu den Anforderungen an die Gestaltung und den Betrieb von Schrägklärern sowie die erreichbaren Wirkungsgrade liegen insbesondere für Anlagen im Mischsystem vor. Die vorliegenden Untersuchungen ergänzen den vorhandenen Kenntnisstand für Trennsystemanlagen und führen die Befunde in gemeinsamen Empfehlungen zusammen.

Zusätzlich wurde im Rahmen dieses Vorhabens geprüft inwieweit Sondenmessungen die konventionelle Form der Anlagenuntersuchungen ergänzen bzw. ersetzen können. Die wesentlichen Ergebnisse zu den Fragestellungen dieses Vorhabens können wie folgt zusammengefasst werden:

Wirksamkeit im Misch- und Trennsystem

- Feststoff-Frachten und Glühverluste im Trennsystem sind mit den Ergebnissen des ReFeNi 1 Vorhabens vergleichbar sodass eine Übertragbarkeit der Ergebnisse grundsätzlich gegeben ist (Abschnitt 3.3).
- Der Einbau von Plattenelementen oder Röhrenelementen ist im Mischsystem wie im Trennsystem mit marginal unterschiedlichen Wirksamkeiten verbunden. Ein eindeutiger Wirksamkeitsgewinn durch die eine oder andere Lösung ist nicht erkennbar (Abschnitt 3.2.2).
- Standortspezifische Faktoren, wie beispielsweise die Variabilität der Feststoffkonzentrationen und der Feststoffeigenschaften, überlagern spezifische Systemeigenschaften des Trenn- und Mischsystems.
- Die systematisierten Untersuchungen zu den Wirksamkeiten bei unterschiedlichen, konstanten Oberflächenbeschickungen (Serienversuche) für Platten- und Röhrenabscheider zeigen, dass für das Misch- und Trennsystem die gleichen Wirkungszusammenhänge bestehen. Die aus den Großanlagenuntersuchungen abgeleiteten Bemessungsansätze und konstruktiven Empfehlungen (Abschnitt 3.4) gelten damit für Anlagen in beiden Entwässerungssystemen.

UV/VIS-Sonden

- Lokale Kalibrierung liefert immer genauere Ergebnisse als die global voreingestellte Kalibrierung.
- Ordinary Least Square Regression (OLS, Methode der kleinsten Quadrate) und die Partial Least Square Regression (PLS, Methode teilweise kleinsten Quadrate) sind als Regressionsanalyse grundsätzlich geeignet (Abschnitt 3.5.1). Für qualitative vergleichende Analysen sind beide Ansätze gleichwertig.
- Für den Parameter AFS führen beide Ansätze nicht zu befriedigenden quantitativen Ergebnissen.

- Die Ableitung einer realitätsnahen CSB-Konzentration ist mit besserer Zuverlässigkeit möglich.
- Hohe Heterogenität der Abwasserzusammensetzung, hohe Matrixanteile sowie hohe Organikgehalte erschweren den Einsatz der Sonden zusätzlich.
- Der Betreuungs- und Wartungsaufwand ist sehr hoch.
- Die Daten aus der konventionellen Beprobung mit Feststoffsammlern sind nicht mit den Sondendaten vergleichbar (Abschnitt 3.5.1).
- Die Nutzung von Sondendaten führt in Abhängigkeit von dem genutzten Regressionsmodell zu signifikanten Unter- oder Überschätzungen der tatsächlichen Frachten (Abschnitt 3.5.2).
- Spektrometersonden erfassen das gesamtes Feststoffspektrum (AFS_{gesamt}) und den Konzentrationsverlauf der Feststoffe. Zu Bilanzierungszwecken sind die erzeugten Daten nicht geeignet (Abschnitt 3.6).

Die Bemessung und Konstruktionsempfehlungen (Abschnitt 4) für Schrägklärer im Misch- und Trennsystem unterscheiden sich nur insofern, dass im Mischsystem eine Grobstoffabscheidung (Abschnitt 4.4) vor dem Schrägklärer immer zu empfehlen ist, während eine entsprechende Maßnahme im Trennsystem nur bei Anlagen mit hohem Laubanfall erforderlich ist. Wie bei konventionellen Sedimentationsanlagen erfolgt die Bemessung auf Basis des Oberflächensatzes. Die anzusetzende Oberflächenbeschickung soll in niederschlagsabhängig beschickten Anlagen den Wert von 4 m/h nicht überschreiten. Damit das Leistungspotential von Schrägklärern genutzt werden kann, ist für eine gleichmäßige Durchströmung des gesamten Sedimentationsvolumens zu sorgen (Abschnitt 4.3). Entscheidend hierfür sind die Gestaltung des Einlauf- und Verteilungsbauwerks, die Geometrie des Beckens sowie die Gestaltung der Klarwasserabzüge.

Inhalt

1 Einleitung und Veranlassung 1
2 Grundlagen 2
2.1 Systemabgrenzung 2
2.2 Rechenansatz 2
2.3 Schrägklärer in der Regenwasserbehandlung 3
2.4 Versuchsanlage 5
2.4.1 Ausrüstung mit Lamellenabscheidern 6
2.4.2 Ausrüstung mit Röhrenabscheidern 8
2.5 Versuchsdurchführung 9
2.5.1 Mischsystem 9
2.5.2 Trennsystem 10
2.6 Ermittlung des Frachtrückhalts 11
2.6.1 Feststoffsammler 11
2.7 UV/VIS-Spektroskopie 13
2.7.1 Einsatz und Funktionsweise 13
2.7.2 Kalibrierung der Sonden 15
3 Ergebnisse 18
3.1 Konstruktive Gestaltung des Einlauf- und Verteilerbauwerks 18
3.2 Frachtrückhalt im Mischsystem 18
3.2.1 Plattenabscheider im Mischsystem 20
3.2.2 Vergleich Platten- und Röhrenabscheider im Mischsystem 22
3.3 Frachtrückhalt im Trennsystem 24
3.4 Zusammenführung der Ergebnisse zur Wirksamkeit im Misch- und Trennsystem 30
3.5 UV/VIS-Spektroskopie 31
3.5.1 Kalibrierergebnisse und Ganglinien 31
3.5.2 Frachtbilanzierung 37
3.6 Vergleich der Methoden Feststoffsammler und UV/VIS-Sonden 40
3.6.1 Feststoffsammler (FSS) 40
3.6.2 Spektrometersonde 40
4 Bemessungs- und Konstruktionsempfehlungen für Schrägklärer im Misch- und Trennsystem 42
4.1 Vorbemerkungen 42
4.2 Bemessungsempfehlungen 42
4.3 Konstruktionsempfehlungen für den Neubau 43
4.3.1 Geometrie 43

4.3.2 Drosselung des Anlagendurchsatzes 43
4.3.3 Einlauf- und Verteilungsbauwerk 44
4.3.4 Abstand Einlauf- und Verteilungsbauwerk zum Schrägklärer 46
4.3.5 Ausrichtung der Schrägklärerelemente 46
4.3.6 Klarwasserabzüge 46
4.4 Weitere Hinweise 47
4.5 Empfehlungen für die Aufrüstung bestehender Anlagen 48
5 Literaturverzeichnis 50
6 Anhang 52
6.1 Fotodokumentation 52
6.2 Einlauf- und Verteilerbauwerke 53
6.3 Liste laufender und kürzlich abgeschlossener Vorhaben 55
6.4 Liste von Herstellern und marktgängigen Modellen 56
6.5 Ganglinien 58
6.5.1 AFS 58
6.5.2 CSB 68

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 2.1: Durchlaufbecken im Nebenschluss (ATV-A 128 (1992)) 2
Abbildung 2.2: Schrägklärer im Gegenstrom-, Gleichstrom- und Kreuzstromprinzip (Weiß 2015) 4
Abbildung 2.3: Strömungsverhalten im „Supercritical Mode“ nach Leung (1983) 4
Abbildung 2.4: Röhren mit hexagonalem Querschnitt (links) und Chevron-Profil (rechts) 5
Abbildung 2.5: Längsschnitt der Pilotanlage (UFT 2012) 6
Abbildung 2.6: Längsschnitt der Pilotanlage (UFT 2012) 7
Abbildung 2.7: Versuchsanordnung im Mischsystem 10
Abbildung 2.8: Versuchsanordnung im Trennsystem 11
Abbildung 2.9: Proben aus dem Feststoffsammler und deren Verwendung 12
Abbildung 2.10: UV/VIS-Spektrometersonde; Messfenster (linkes Bild), Sonde im Zulaufrohr verbaut (rechtes Bild) (Mayer 2018) 14
Abbildung 2.11: UV/VIS-Absorptionsspektrum aus Weingartner et al. (2010) 14
Abbildung 2.12: Vakuumfiltration zur Ermittlung der abfiltrierbaren Stoffe (links); mit Partikeln beladene Glasfaserfilter nach der Filtration und Trocknung (rechts) (Mayer 2018) 16
Abbildung 2.13: Aufzeichnung des Niederschlagsereignisses am 27.10.2017 (Mayer 2018) 16
Abbildung 3.1: Feststoffkonzentrationen im Zulauf im Mischsystem 19
Abbildung 3.2: Gewichtsanteile der Feststoff-Fraktionen im Zu- und Ablauf im Mischsystem 19
Abbildung 3.3: Glühverlust der Feststoff-Fraktionen im Zu- und Ablauf im Mischsystem 20
Abbildung 3.4: Feststoffrückhalt des Schrägklärers im Mischsystem für die Fraktion < 2,0 mm im Mischsystem (Plattenabscheider) 21
Abbildung 3.5: Feststoffrückhalt des Schrägklärers im Mischsystem für die Fraktion < 0,063 mm im Mischsystem (Plattenabscheider) 22
Abbildung 3.6: Sedimentationswirksamkeit für Partikel <0,063 mm, mit Platten- bzw. mit Röhrenabscheidern im Mischsystem bei q_A = 4 m/h 23
Abbildung 3.7: Sedimentationswirksamkeit und Feststoffkonzentrationen der Versuche 24
Abbildung 3.8: Feststoffkonzentrationen im Zulauf im Trennsystem 25
Abbildung 3.9: Box-Plot zu Gewichtsanteilen der Feststoffe im Zu- und Ablauf der Schrägklärer-Anlage im Trennsystem 26
Abbildung 3.10: Glühverlust (GV) in % der Feststoffe aus dem Zu- und Ablauf der Schrägklärer-Anlage im Trennsystem 26
Abbildung 3.11: Mittlere Anteile des Glühverlustes im Versuchszeitraum 27
Abbildung 3.12: Feststoffrückhalt des Schrägklärers im Trennsystem für die Fraktion <2,0 mm im Trennsystem (Röhrenabscheider) 28
Abbildung 3.13: Feststoffrückhalt des Schrägklärers für die Fraktion <0,063 mm im Trennsystem 28
Abbildung 3.14: Zusammenhang zwischen der mittleren Zulaufkonzentration und der Wirksamkeit der Kornfraktion <0,063 mm 29
Abbildung 3.15: Sedimentationswirksamkeit für Partikel < 0,063 mm im Misch- und Trennsystem unter stationären Bedingungen 30
Abbildung 3.16: Niederschlagsereignis am 02.09.2017 – Zulauf Sonde (1) (Mayer 2018) 33

Abbildung 3.17: Niederschlagsereignis am 15.09.2017 – Zulauf Sonde (1) – Parameter AFS (Mayer 2018) 34
Abbildung 3.18: Niederschlagsereignis am 12.07.2017 – Zulauf Sonde (1) (Mayer 2018) 35
Abbildung 3.19: Niederschlagsereignis am 20.07.2017 – Zulauf Sonde (1) Parameter CSB (Mayer 2018) 36
Abbildung 3.20: Frachtbilanz des Niederschlagsereignisses am 21.07.2017 – Sonde *Zu 1* und *Ab* – AFS, OLS-Methode – q_A = 2 m/h (Mayer 2018) 37
Abbildung 3.21: Frachtbilanz des Niederschlagsereignisses am 21.07.2017 – Sonde *Zu 1* und *Ab* – AFS, PLS Methode – q_A = 2 m/h (Mayer 2018) 38
Abbildung 4.1: Schematische Darstellung eines Einlauf- und Verteilungsbauwerks mit hoher Einlaufschwelle 44
Abbildung 4.2: Schematische Darstellung eines Einlauf- und Verteilungsbauwerks als Einlaufwand mit Prallwand und seitlichen Palisaden 45
Abbildung 4.3: Schematische Darstellung eines Einlauf- und Verteilungsbauwerks mit Einlaufwand und horizontalem Einlaufschlitz 45
Abbildung 4.4: Anordnung der Trennwände und Klarwasserrinnen 47
Abbildung 4.5: Schematische Darstellung eines Schrägklärers mit seitlich angeordneten Sammelrinnen im Trennsystem 47
Abbildung 6.1: Sedimentationskammer ohne Schrägklärer 52
Abbildung 6.2: Schrägklärer mit Plattenelementen 52
Abbildung 6.3: Schrägklärer mit Röhrenelementen 52
Abbildung 6.4: Rohreinläufe unten liegend 53
Abbildung 6.5: Rohreinläufe oben liegend 53
Abbildung 6.6: Rohreinlauf unten liegend mit Prallblech 53
Abbildung 6.7: Verteilerrohre im Längsschnitt 53
Abbildung 6.8: Verteilerrohre im Querschnitt mit zwei Ausläufen 53
Abbildung 6.9: Verteilerrohre im Querschnitt mit vier Ausläufen 54
Abbildung 6.10: Schwellen 54
Abbildung 6.11: Ganglinien des Niederschlagsereignisses am 12.07.2017 – Sonde *Zu 1* und *Ab* – Parameter AFS – q_A = 2 m/h (Mayer 2018) 58
Abbildung 6.12: Ganglinien des Niederschlagsereignisses am 20.07.2017 – Sonde Zu 1 und Ab – Parameter AFS – qA = 2 m/h (Mayer 2018) 58
Abbildung 6.13: Ganglinien des Niederschlagsereignisses am 21.07.2017 – Sonde *Zu 1* und *Ab* – Parameter AFS – q_A = 2 m/h (Mayer 2018) 59
Abbildung 6.14: Ganglinien des Niederschlagsereignisses am 24.07.2017 – Sonde *Zu 1* und *Ab* – Parameter AFS – q_A = 2 m/h 59
Abbildung 6.15: Ganglinien des Niederschlagsereignisses vom 25.07. bis 26.07.2017 – Sonde *Zu 1* und *Ab* – Parameter AFS – q_A = 2 m/h (Mayer 2018) 60
Abbildung 6.16: Ganglinien des Niederschlagsereignisses am 01.08.2017 – Sonde *Zu 1* und *Ab* – Parameter AFS – q_A = 1 m/h (Mayer 2018) 60
Abbildung 6.17: Ganglinien des Niederschlagsereignisses am 19.08.2017 – Sonde *Zu 2* und *Ab* – Parameter AFS – q_A = 1 m/h (Mayer 2018) 61
Abbildung 6.18: Ganglinien des Niederschlagsereignisses am 02.09.2017 – Sonde *Zu 1* und *Ab* – Parameter AFS – q_A = 1 m/h (Mayer 2018) 61
Abbildung 6.19: Ganglinien des Niederschlagsereignisses am 15.09.2017 – Sonde *Zu 1* und *Ab* – Parameter AFS – q_A = 3 m/h (Mayer 2018) 62

Abbildung 6.20: Ganglinien des Niederschlagsereignisses am 05.10.2017 – Sonde *Zu 2* und *Ab* – Parameter AFS – q_A = 3 m/h (Mayer 2018) 62
Abbildung 6.21: Ganglinien des Niederschlagsereignisses am 06.10.2017 – Sonde *Zu 2* und *Ab* – Parameter AFS – q_A = 3 m/h (Mayer 2018) 63
Abbildung 6.22: Ganglinien des Niederschlagsereignisses am 08.10.2017 – Sonde *Zu 2* und *Ab* – Parameter AFS – q_A = 3 m/h 63
Abbildung 6.23: Ganglinien des Niederschlagsereignisses vom 21.10. bis 22.10.2017 – Sonde *Zu 2* und *Ab* – Parameter AFS – q_A = 4 m/h (Mayer 2018) 64
Abbildung 6.24: Ganglinien des Niederschlagsereignisses am 22.10.2017 – Sonde Zu *2* und *Ab* – Parameter AFS – q_A = 4 m/h (Mayer 2018) 64
Abbildung 6.25: Ganglinien des Niederschlagsereignisses am 23.10.2017 – Sonde *Zu 2* und *Ab* – Parameter AFS – q_A = 4 m/h (Mayer 2018) 65
Abbildung 6.26: Ganglinien des Niederschlagsereignisses am 08.11.2017 – Sonde *Zu 2* und *Ab* – Parameter AFS – q_A = 1 m/h (Mayer 2018) 65
Abbildung 6.27: Ganglinien des Niederschlagsereignisses vom 11.11. bis 12.11.2017 – Sonde *Zu 2* und *Ab* – Parameter AFS – q_A = 1 m/h (Mayer 2018) 66
Abbildung 6.28: Ganglinien des Niederschlagsereignisses am 19.11.2017 – Sonde *Zu 2* und *Ab* – Parameter AFS – q_A = 1 m/h (Mayer 2018) 66
Abbildung 6.29: Ganglinien des Niederschlagsereignisses am 21.11.2017 – Sonde *Zu 2* und *Ab* – Parameter AFS – q_A = 1 m/h (Mayer 2018) 67
Abbildung 6.30: Ganglinien des Niederschlagsereignisses am 12.07.2017 – Sonde *Zu 1* und *Ab* – Parameter CSB – q_A = 2 m/h 68
Abbildung 6.31: Ganglinien des Niederschlagsereignisses am 20.07.2017 – Sonde *Zu 1* und *Ab* – Parameter CSB – q_A = 2 m/h 68
Abbildung 6.32: Ganglinien des Niederschlagsereignisses am 21.07.2017 – Sonde *Zu 1* und *Ab* – Parameter CSB – q_A = 2 m/h 69
Abbildung 6.33: Ganglinien des Niederschlagsereignisses am 24.07.2017 – Sonde *Zu 1* und *Ab* – Parameter CSB – q_A = 2 m/h 69
Abbildung 6.34: Ganglinien des Niederschlagsereignisses vom 25.07. bis 26.07.2017 – Sonde *Zu 1* und *Ab* – Parameter CSB – q_A = 2 m/h 70
Abbildung 6.35: Ganglinien des Niederschlagsereignisses am 30.07.2017 – Sonde *Zu 1* und *Ab* – Parameter CSB – q_A = 2 m/h 70
Abbildung 6.36: Ganglinien des Niederschlagsereignisses am 31.07.2017 – Sonde *Zu 1* und *Ab* – Parameter CSB – q_A = 2 m/h 71
Abbildung 6.37: Ganglinien des Niederschlagsereignisses am 01.08.2017 – Sonde *Zu 1* und *Ab* – Parameter CSB – q_A = 1 m/h 71
Abbildung 6.38: Ganglinien des Niederschlagsereignisses am 19.08.2017 – Sonde *Zu 2* und *Ab* – Parameter CSB – q_A = 1 m/h 72
Abbildung 6.39: Ganglinien des Niederschlagsereignisses am 02.09.2017 – Sonde *Zu 1* und *Ab* – Parameter CSB – q_A = 1 m/h 72
Abbildung 6.40: Ganglinien des Niederschlagsereignisses am 15.09.2017 – Sonde *Zu 1* und *Ab* – Parameter CSB – q_A = 3 m/h 73
Abbildung 6.41: Ganglinien des Niederschlagsereignisses am 05.10.2017 – Sonde *Zu 2* und *Ab* – Parameter CSB – q_A = 3 m/h 73
Abbildung 6.42: Ganglinien des Niederschlagsereignisses am 06.10.2017 – Sonde *Zu 2* und *Ab* – Parameter CSB – q_A = 3 m/h 74
Abbildung 6.43: Ganglinien des Niederschlagsereignisses am 08.10.2017 – Sonde *Zu 2* und *Ab* – Parameter CSB – q_A = 3 m/h 74

Abbildung 6.44: Ganglinien des Niederschlagsereignisses vom 21.10. bis 22.10.2017 – Sonde *Zu 2* und *Ab* – Parameter CSB – q_A = 4 m/h..... 75
Abbildung 6.45: Ganglinien des Niederschlagsereignisses am 22.10.2017 – Sonde *Zu 2* und *Ab* – Parameter CSB – q_A = 4 m/h..... 75
Abbildung 6.46: Ganglinien des Niederschlagsereignisses am 23.10.2017 – Sonde *Zu 2* und *Ab* – Parameter CSB – q_A = 4 m/h..... 76
Abbildung 6.47: Ganglinien des Niederschlagsereignisses am 08.11.2017 – Sonde *Zu 2* und *Ab* – Parameter CSB – q_A = 1 m/h..... 76
Abbildung 6.48: Ganglinien des Niederschlagsereignisses vom 11.11. bis 12.11.2017 – Sonde *Zu 2* und *Ab* – Parameter CSB – q_A = 1 m/h..... 77
Abbildung 6.49: Ganglinien des Niederschlagsereignisses am 19.11.2017 – Sonde *Zu 2* und *Ab* – Parameter CSB – q_A = 1 m/h..... 77
Abbildung 6.50: Ganglinien des Niederschlagsereignisses am 21.11.2017 – Sonde *Zu 2* und *Ab* – Parameter CSB – q_A = 1 m/h..... 78

Tabellenverzeichnis

Tabelle 2.1: Geometrie der Sedimentationskammer 6
Tabelle 2.2: Bemessung der Sedimentationskammer mit Lamellenabscheidern 7
Tabelle 2.3: Oberflächenbeschickungen und Durchflüsse bei der Versuchsdurchführung mit Lamellen 8
Tabelle 2.4: Bemessung der Sedimentationskammer mit Röhrenabscheidern 8
Tabelle 2.5: Oberflächenbeschickungen und Durchflüsse bei der Versuchsdurchführung mit Röhren 8
Tabelle 3.1: Vergleich der Frachten aus den Feststoffsammlern und nach Auswertung der Sondendaten mit OLS- und PLS-Regression 39

1 Einleitung und Veranlassung

Das Institut für Wasser und Gewässerentwicklung, Fachbereich Siedlungswasserwirtschaft und Wassergütewirtschaft, hat bereits mehrere Monitoring-Vorhaben durchgeführt, in denen die Wirksamkeit zum Frachtrückhalt in Sedimentationsanlagen untersucht wurde. Die Monitoring-Vorhaben konzentrierten sich auf Durchlaufbecken im Nebenschluss im Misch- und Trennsystem (Fuchs et al. (2013), Kemper et al. (2015a)). Anhand der Ergebnisse wurde ersichtlich, dass sich die Sedimentationsleistung der einzelnen Anlagen sehr stark unterscheidet. Die Ursachen hierfür sind vielseitig und unterliegen einem multifaktoriellen Wirkungsgefüge. Hinsichtlich des Frachtrückhaltes erreichten die Sedimentationsanlagen eine mittlere Sedimentationsleistung von etwa 30 %. Dieses Ergebnis ist für Behandlungsanlagen, die dem Stand der Technik entsprechen, unbefriedigend. Es sind verschiedene Arten der Optimierung denkbar. Eine Ertüchtigung kann durch konstruktive Maßnahmen erfolgen, die dazu beitragen das Strömungsverhalten in Reaktoren und damit die Sedimentationsbedingungen zu verbessern. Andere Möglichkeiten setzen bei der Reduktion der Bemessungsoberflächenbeschickung an, da eine geringe Oberflächenbeschickung mit einem hohen Frachtrückhalt korreliert. Eine Reduktion der Bemessungsoberflächenbeschickung kann durch eine Verringerung des Zuflusses auf die bestehende Absetzfläche oder durch eine Vergrößerung der Absetzfläche erreicht werden. Als wirksam und wirtschaftlich hat sich die Schrägklärertechnologie erwiesen (Dohmann et al. 2003 sowie Fuchs et al. 2010 und 2014). Die bisherigen Untersuchungen wurden überwiegend im Mischsystem durchgeführt. Die Datenlage zur Wirksamkeit des Feststoffrückhaltes von Schrägklärern zur Behandlung von Regenwasser aus dem Trennsystem ist gering. Im Rahmen dieses Projektes wird die Datengrundlage zur Wirksamkeit von Schrägklärern in der Regenwasserbehandlung verdichtet, Bemessungsempfehlungen auf die Anwendung im Trennsystem überprüft und fundierte konstruktive Empfehlungen für den Einsatz von Schrägklärern in Neubauten und als Optimierung bestehender Regenbecken abgeleitet.

2 Grundlagen

2.1 Systemabgrenzung

Es gibt viele Studien, die sich mit dem Rückhalt von Feststoffen in Regenwasserbehandlungsanlagen auseinandersetzten, darunter z. B. die Arbeiten von Hübner (1997), Kutzner (2005) und Klepiszewski (2006). Diese unterscheiden sich u. a. in den Systemabgrenzungen, die in den Rechenansätzen berücksichtigt werden. Ein Vergleich von Ergebnissen aus unterschiedlichen Studien erfordert die Berücksichtigung der Systemabgrenzungen und methodischen Ansätze. Die in der vorliegenden Studie durchgeführten Untersuchungen zur Wirksamkeit der Schrägklärer-Anlage konzentrieren sich ausschließlich auf die Sedimentationsanlage, siehe Abbildung 2.1.

Nach den Berechnungsansätzen des Gelbdruck DWA-A 102 (2016) sollten möglichst der Beckenüberlauf, die Konzentration des Speichers bei Entleerung und der Drosselabfluss einbezogen werden. Dadurch, dass es sich in dieser Studie um eine mittels Pumpe beschickte Anlage handelt, die nicht in dem Entwässerungsnetz eingebunden ist, sind die Abflüsse, die im Gelbdrucke des DWA-A 102 genannt werden, nicht vorhanden und werden entsprechend in den Rechenansätzen nicht berücksichtigt.

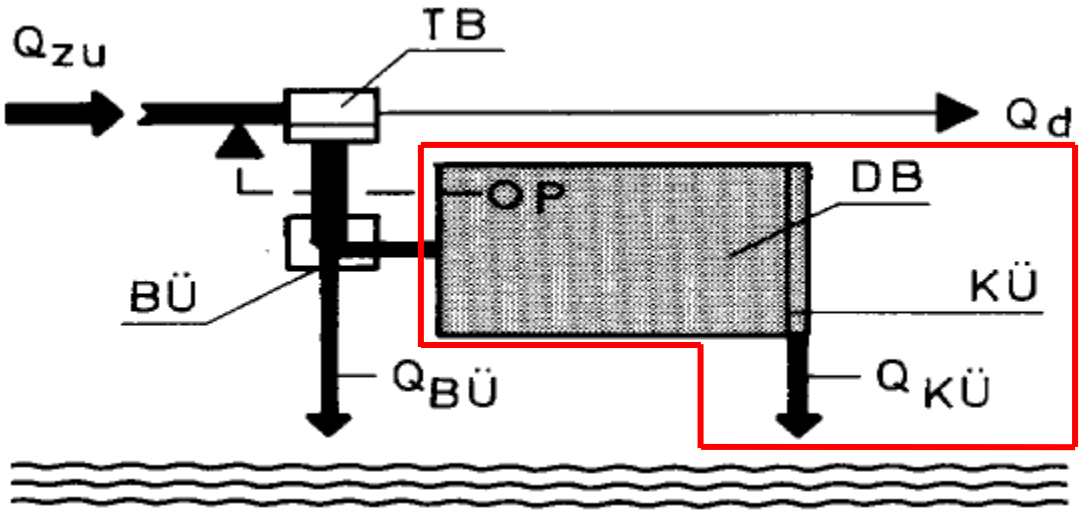


Abbildung 2.1: Durchlaufbecken im Nebenschluss (ATV-A 128 (1992))

2.2 Rechenansatz

Der erste Schritt zur Ermittlung der Wirksamkeit ist die Berechnung der Feststoff-Frachten aus dem Produkt der ermittelten Feststoffkonzentration, z. B. des Zu- oder Ablaufes mit dem jeweiligen Wasservolumen.

Die Gesamtwirksamkeit η (%) der Anlage berücksichtigt das Speichervolumen sowie das gemessene Zu- und Abflussvolumen bei einem Niederschlagsereignis. Die Gesamtwirksamkeit impliziert daher die Speicherwirkung und die Sedimentationswirkung der Sedimentationsanlage in der Frachtbilanz

$$B_{ZU_K\ddot{U}} = C_{ZU_K\ddot{U}} \cdot V_R / 1000 + C_{ZU_K\ddot{U}} \cdot V_e / 1000$$

in kg als Zulauffracht in der Entlastungsphase, bzw.

$$B_{Ab_K\ddot{U}} = C_{Ab_K\ddot{U}} \cdot Ve / 1000$$

in kg für die Entlastungsfracht.

Die Gesamtwirksamkeit des Regenbeckens wird rechnerisch wie folgt ermittelt:

$$\eta_{ges} = \frac{B_{Zu} - B_{AB_K\ddot{U}}}{B_{Zu}}$$

Bleibt das Volumen der Anlage unberücksichtigt, ergibt sich aus dem folgenden Rechenansatz die Sedimentationswirksamkeit η_{Sed} (%) der Anlage zum Rückhalt der Feststofffracht

$$B_{ZU_K\ddot{U}} = C_{ZU_K\ddot{U}} \cdot V_R / 1000$$

in kg als Zulauffracht in der Entlastungsphase, bzw.

$$B_{Ab_K\ddot{U}} = C_{Ab_K\ddot{U}} \cdot Ve / 1000$$

in kg für die Entlastungsfracht.

Die Sedimentationswirksamkeit des Regenbeckens wird rechnerisch wie folgt ermittelt:

$$\eta_{sed} = \frac{B_{Zu} - B_{AB_K\ddot{U}}}{B_{Zu}}$$

$C_{Zu_K\ddot{U}}$	= Zulaufkonzentration während der Entlastungsphase (mg/l)
$C_{Ab_K\ddot{U}}$	= Ablaufkonzentration (mg/l)
V_e	= ereignisspezifisches Volumen (m³)
V_R	= Volumen der Sedimentationskammer (m³)

2.3 Schrägklärer in der Regenwasserbehandlung

Schrägklärer werden zur Fest-Flüssig-Trennung schon lange in der industriellen Anwendung genutzt. Es sind hierbei Gegenstrom-, Gleichstrom- und Kreuzstromabscheider zu unterscheiden. Die Abbildung 2.2 stellt die genannten Abscheider dar. Sie unterscheiden sich hinsichtlich der Fließrichtung zwischen den Abscheiderelementen.

Bei Gegenstromabscheidern werden die Zwischenräume der Plattenelemente aufwärts gerichtet durchströmt, wohingegen Partikel und die auf den Oberflächen ausgebildeten Schlämme in die entgegengesetzte Richtung fließen. Dieses ist das am häufigsten eingesetzte Verfahren. Krauth und Bondareva (1999) sowie Dohmann et al. (2003) haben Untersuchungen hierzu durchgeführt, um diese Technologie für den Bereich der

Abwasseraufbereitung zu nutzen. Seitdem ist das Interesse an Schrägklärern stetig gewachsen.

Bei Gleichstromabscheidern sind die Fließrichtung des geklärten Wassers und der Partikel bzw. des Sediments dieselbe. Für die Regenwasserbehandlung sind Gleichstromabscheider nicht geeignet. Die Suspension wird in der Regel von oben eingeleitet, so dass die Entnahme des Klarwassers nur nach einer weiteren Umleitung des Volumenstroms möglich wäre.

Bei Kreuzstromabscheidern durchströmt das Wasser horizontal die Platten; eine Technik, die für den Einsatzbereich in der Regenwasserbehandlung noch nicht hinreichend untersucht wurde.

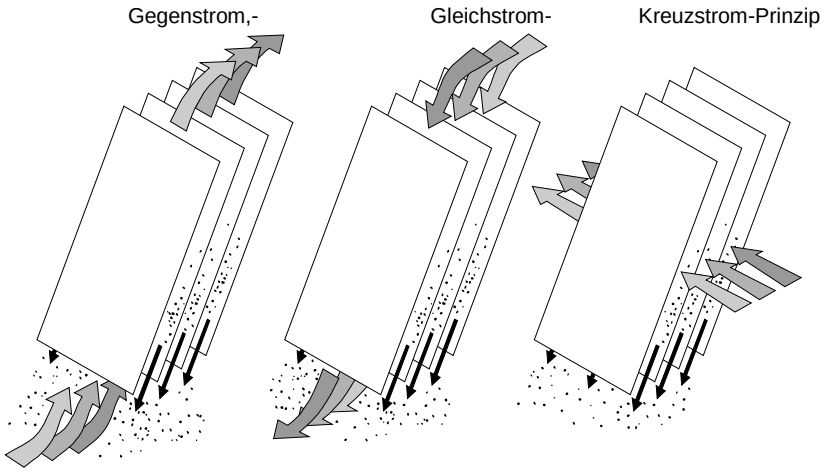


Abbildung 2.2: Schrägklärer im Gegenstrom-, Gleichstrom- und Kreuzstromprinzip (Weiß 2015)

Die Strömungsbedingungen zwischen zwei Plattenelementen wurden unter anderem von Leung (1983) untersucht. Abbildung 2.3 visualisiert die Strömungsbedingungen zwischen zwei Platten und stellt die Fließrichtungen und Geschwindigkeiten in einem Querprofil dar. Die Schlammschicht bewegt sich nach Erreichen einer bestimmten kritischen Masse entgegen der Fließrichtung des geklärten Wassers („sludge layer“). Um dieses Abrutschen des Schlammes auf den Oberflächen zu fördern, werden Schrägklärer mit einer Neigung verbaut. Eine Neigung zwischen 50-60° hat sich in der Praxis etabliert.

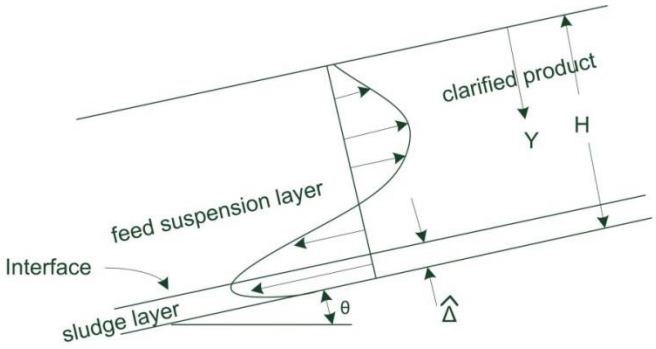


Abbildung 2.3: Strömungsverhalten im „Supercritical Mode“ nach Leung (1983)

Im Gegensatz zu Kreuzstromabscheidern, die nur mit Platten oder Lamellenelementen betrieben werden, können bei Gegenstrom- und Gleichstromabscheidern die Abscheider diverse Formen aufweisen, siehe Abbildung 2.4. Untersuchungen hierzu wurden von Beach (1972) durchgeführt. Die Formen unterscheiden sich zum einen in der Absetzfläche und zum anderen in den Strömungsbedingungen, beides ist für die Abscheidung der Partikel von Bedeutung. Insbesondere aus betrieblichen Gründen ist das Abrutschen des Schlammes von hohem Interesse, da ein „Selbstreinigungseffekt“ erwünscht ist. Bei den Chevron-Profilen erhofft man sich ein Abrutschen der Sedimente von den Seiten zur Mitte hin, wo sich der Schlamm sammeln und abrutschen soll. Bei den namhaften Anbietern von Schrägklärern haben sich drei Abscheiderformen durchgesetzt: Platten, hexagonale Röhren und Chevron-Profile, wobei letztere die am häufigsten verbauten Profile sind (Abbildung 2.5). Die vom Marktführer angebotenen Chevron-Profile unterscheiden sich leicht von denen, die Beach getestet hat. Die effektive Absetzfläche der Sedimentationskörper wird von den Herstellern häufig pro Kubikmeter angegeben. Sie wird über die horizontal projizierte Fläche einer Platte bzw. Röhre und die Anzahl der Platten bzw. Röhren errechnet, die in einen Kubikmeter passen.

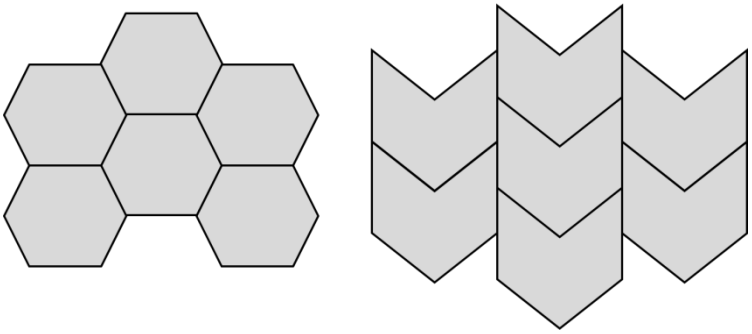


Abbildung 2.4: Röhren mit hexagonalem Querschnitt (links) und Chevron-Profil (rechts)

2.4 Versuchsanlage

Im Zuge des vom Land NRW geförderten Vorhabens „NRW-RÜB“ wurde eine mobile Versuchsanlage konzipiert. Hierzu wurde ein handelsüblicher Abrollcontainer verwendet, der in eine Sedimentationsanlage mit Schrägklärern im Originalmaßstab umgebaut wurde, siehe Abbildung 2.5. Die Anlage ist mit neuester Steuerungs- und Regelungstechnik ausgestattet. Über eine sogenannte Speicherprogrammierbare Steuerung (SPS) werden die Einstellungen für die Betriebsweise vorgenommen. Eine frequenzgerichtete Pumpe wird auf die erforderliche Fördermenge und auf die Oberflächenbeschickung eingestellt. Die Eckdaten zur Geometrie und Bemessung der Anlage sind Tabelle 2.1 zu entnehmen.

Für die Versuchsdurchführung wurde die Pumpe im Mischsystem in den Zulaufkanal einer Kläranlage und im Trennsystem im Zulaufkanal eines Regenklärbeckens eingebaut. Bei einsetzenden Niederschlagsereignissen ist die Sedimentationsanlage automatisiert in den stationären Betrieb gegangen. Der Zu- und Ablauf der Anlage wurde mit Feststoffsammlern beprobt. Dabei handelt es sich um eine durchflussproportionale Probenahme mittels großvolumiger Behälter.

Die Anlage weist gegenüber Großanlagen mehrere Vorteile auf:

- Die Anlage kann unter definierten Randbedingungen betrieben und Versuche können mehrfach wiederholt werden (Oberflächenbeschickung, Volumen).
- Es können beliebig viele unterschiedliche Entlastungsereignisse abgebildet werden.
- Die Anlage ist mobil, sodass unter bestimmten Voraussetzungen Untersuchungen an unterschiedlichen Standorten durchgeführt werden können.
- Vergleichbar umfangreiche Untersuchungen an realen Regenbecken sind nur mit deutlich größerem Aufwand möglich.

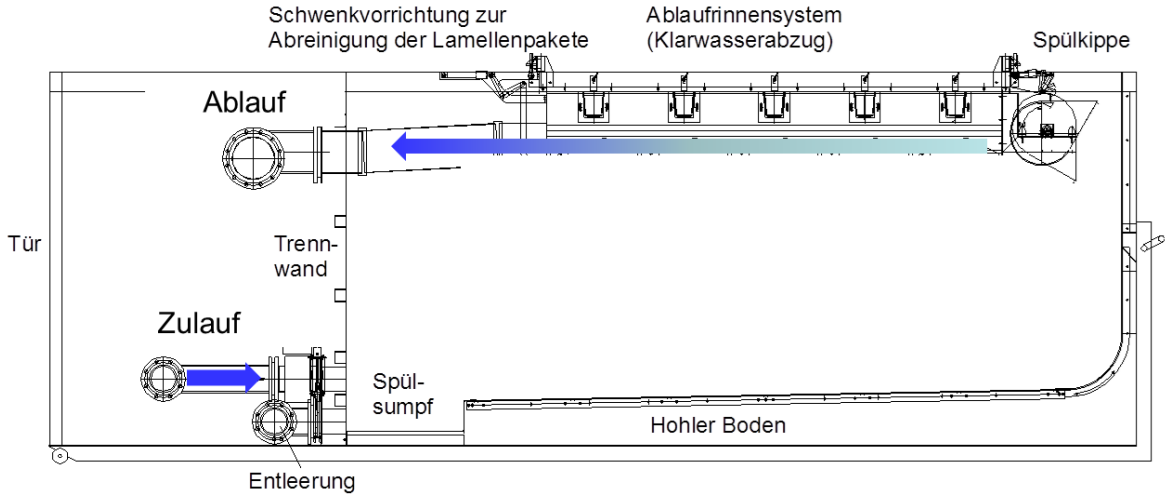


Abbildung 2.5: Längsschnitt der Pilotanlage (UFT 2012)

Tabelle 2.1: Geometrie der Sedimentationskammer

Länge x Breite x Höhe:	5 m x 2,43 m x 1,95 m
Volumen der Kammer:	21,2 m³
Absetzfläche:	12,15 m²
Ausbauzufluss:	144 m³/h (0,04 m³/s)
Zufluss (mit DN 150 Rohrzulauf):	2,26 m/s V = 0,04 m³/s / 0,018 m²
Oberflächenbeschickung ($q_{A,krit}$):	11,52 m/h $q_{A,krit} = Q / A_{eff}$
Entleerung:	Entleerungsschieber
Reinigung der Containersohle:	Spülkippe

2.4.1 **Ausrüstung mit Lamellenabscheidern**

Für den Aufbau des Gegenstromabscheiders wurden zunächst Lamellenelemente verwendet. Abbildung 2.6 stellt die Sedimentationskammer nach dem Ausbau dar. Über das Zulaufrohr strömt das Wasser in die Sedimentationskammer ein. Die Lamellen

werden vertikal durchströmt und die Klarwasserzone oberhalb der Lamellen abgezogen. Der Klarwasserabzug erfolgt über ein Rinnensystem.

In Tabelle 2.2 sind Angaben zu den Einbauten und der Bemessung enthalten. Es wurden 50 Lamellen mit einem Abstand von 80 mm und einer Neigung von 60° verbaut. Die Oberflächen der Lamellen erbringen in dieser Anlage eine effektive Absetzfläche von 21,45 m². Über die Zulaufpumpe kann die Anlage mit einer maximalen Oberflächenbeschickung von q_A = 6,7 m/h betrieben werden. Die bei den Serienversuchen zum Frachtrückhalt eingestellten Durchflüsse und Oberflächenbeschickungen sind in Tabelle 2.3 aufgeführt.

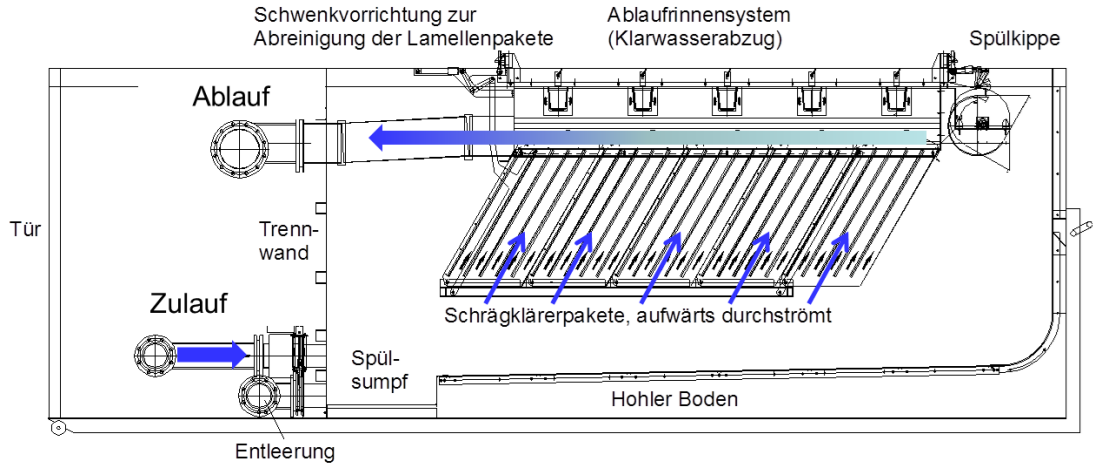


Abbildung 2.6: Längsschnitt der Pilotanlage (UFT 2012)

Tabelle 2.2: Bemessung der Sedimentationskammer mit Lamellenabscheidern

Lamellen:	50 ebene Platten, angeordnet in 2 Straßen mit je 25 Platten, à 874 x 982 mm Fläche (Material: Polycarbonat)
Plattenabstand:	80 mm
Aufstellwinkel:	60°
Effektive Absetzfläche (A_{eff}):	21,45 m² A_{eff} = L * B * cos θ * Anzahl Platten
Oberflächenbe-schickung ($q_{A,krit}$):	6,7 m/h $q_{A,krit}$ = Q / A_{eff}
Abreinigung der Platten:	Schwenkbewegung unter Wasser (Hydraulikantrieb)

Aus den in Tabelle 2.3 genannten Formeln und Werten lassen sich folgende Durchflüsse für verschiedene Oberflächenbeschickungen errechnen, die bei den Serienversuchen mit dem Lamellenabscheider zum Einsatz gekommen sind.

Tabelle 2.3: Oberflächenbeschickungen und Durchflüsse bei der Versuchsdurchführung mit Lamellen

Oberflächenbeschickung	Fläche	Durchfluss		
1 m/h	21,45 m²	21,45 m³/h	=	5,96 l/s
2 m/h	21,45 m²	42,90 m³/h	=	11,92 l/s
3 m/h	21,45 m²	64,35 m³/h	=	17,88 l/s
4 m/h	21,45 m²	85,80 m³/h	=	23,83 l/s
6 m/h	21,45 m²	128,70 m³/h	=	35,75 l/s

2.4.2 **Ausrüstung mit Röhrenabscheidern**

Das Monitoring beinhaltet vergleichende Untersuchungen zum Feststoffrückhalt der Anlage mit Lamellen und Röhrenabscheidern. Bei der Auswahl der Röhren und der Form wurde das aktuell am häufigsten in Schrägklärern verbaute Produkt verwendet.

Maße und Angaben zur Bemessung des Röhrenabscheiders sind in Tabelle 2.4 enthalten. Die effektive Absetzfläche des Röhrenabscheiders ist über die Anzahl der Röhren berechnet worden. Die totale Absetzlänge einer Röhre des Typs GEA FS 42.84 beträgt 135 mm. Insgesamt wurden 300 Röhren in der Sedimentationskammer verbaut.

Tabelle 2.4: Bemessung der Sedimentationskammer mit Röhrenabscheidern

Röhrentyp:	GEA FS 41.84
Profilabstand:	83 mm
Aufstellwinkel:	60°
Effektive Absetzfläche (A_{eff}):	20,25 m² A_{eff} = L * d * cos θ * Anzahl Röhren
Oberflächenbeschickung ($q_{A, krit}$)	7,1 m/h $q_{A,krit}$ = Q / A_{eff}
Abreinigung der Röhren:	Schwenkbewegung unter Wasser (Hydraulikantrieb)

Aus der effektiven Absetzfläche von 20,25 m² ergeben sich die in Tabelle 2.5 aufgeführten Durchflüsse und Oberflächenbeschickungen, mit denen die Serienversuche durchgeführt wurden:

Tabelle 2.5: Oberflächenbeschickungen und Durchflüsse bei der Versuchsdurchführung mit Röhren

Oberflächenbeschickung	Fläche	Durchfluss		
1 m/h	20,25 m²	20,25 m³/h	=	5,63 l/s
2 m/h	20,25 m²	40,50 m³/h	=	11,25 l/s
3 m/h	20,25 m²	60,75 m³/h	=	16,88 l/s
4 m/h	20,25 m²	81,00 m³/h	=	22,50 l/s
5 m/h	20,25 m²	101,25 m³/h	=	28,12 l/s
6 m/h	20,25 m²	121,5 m³/h	=	33,74 l/s

2.5 Versuchsdurchführung

Der Schrägklärer wurde in einem Monitoring auf den Frachtrückhalt untersucht. In einem ersten Schritt wurde die Anlage mit Lamellen ausgerüstet und im Mischsystem betrieben. Die Versuchsdurchführung sowie die Ergebnisse sind bereits in dem Abschlussbericht von Kemper et al. (2015b) verarbeitet worden. An demselben Standort wurde die Anlage auf Röhrenabscheider umgerüstet. Es folgten orientierende Untersuchungen zum Frachtrückhalt von Röhrenabscheidern im Mischsystem. Diese Versuche sollten einen Vergleich ermöglichen, ob von Lamellen- und Röhrenabscheidern derselbe Frachtrückhalt zu erwarten ist. Nach Abschluss der Versuche wurde der Schrägklärer mit den Röhrenabscheidern ins Trennsystem überführt. Dort wurden weitere Serienversuche zum Frachtrückhalt durchgeführt.

2.5.1 **Mischsystem**

Der Standort der Versuchsanlage im Mischsystem ist die Kläranlage Rastatt in Baden-Württemberg. Vorteil an diesem Standort war der kontinuierliche Abfluss. Die Anlage wurde im Zulaufgerinne der Kläranlage hinter dem Rechen und vor dem Sand- und Fettfang positioniert, siehe Abbildung 2.7. Die Versuchsdurchführung wurde manuell mit Schmutz- und Mischwasser durchgeführt. Versuche wurden in Abhängigkeit des Durchflusses im Zulaufgerinne durchgeführt. Eine Wasserstandssonde diente der Berechnung des Abflusses im Kanal. Die Beschickung des Schrägklärers erfolgte mit einer im Zulaufgerinne der Kläranlage installierten Pumpe. Der Zufluss und die gewünschte Oberflächenbeschickung wurden über einen MID exakt eingestellt. Serienversuche zur Quantifizierung der Wirksamkeit mit Lamellen- und Röhrenabscheidern sind bei Oberflächenbeschickungen von q_A = 1, 2, 4 und 6 m/h durchgeführt worden.

Der Zu- und Ablauf der Anlage wurde durchflussproportional mittels Peristaltik-Pumpen beprobt. Für diesen Zweck ist eine separate Steuerung namens AQUA der Firma hp-Technik in der Anlage verbaut worden. Die Steuerung ist für die angewandte Probenahme Strategie mittels Feststoffsammlern gebaut und programmiert worden. Nach der Durchführung eines Versuches erfolgt die Restentleerung der Sedimentationsanlage in das Zulaufgerinne der Kläranlage.

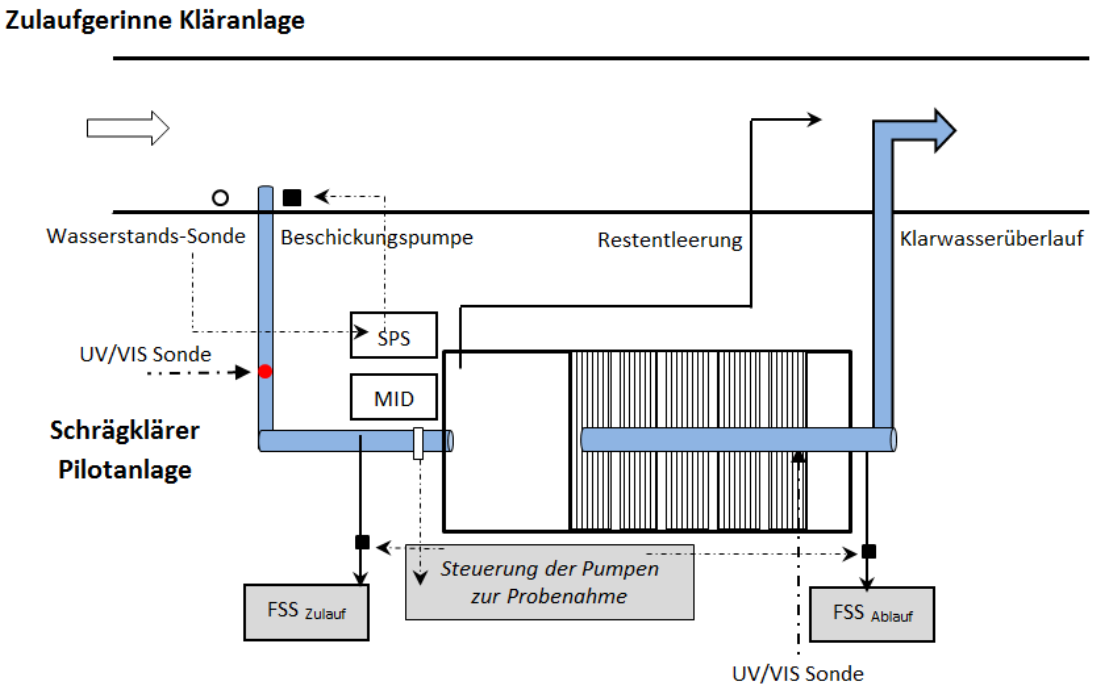


Abbildung 2.7: Versuchsanordnung im Mischsystem

2.5.2 **Trennsystem**

Als Standort der Versuchsanlage im Trennsystem wurde ein Regenbecken in Karlsruhe ausgewählt. Bei dem Regenbecken handelt es sich um ein Regenklärbecken (RKB) in Rechteckbauweise, das im Dauerstau betrieben wird. Aus dem Wasserrechtsbescheid konnte entnommen werden, dass das Einzugsgebiet $A_{E,k}$ des Regenklärbeckens ca. 49 ha beträgt. Das RKB verfügt über ein Speichervolumen von ca. 650 m³. Über die Nutzung des Einzugsgebietes mit Anteilen an Gewerbe, Straßen, Parkflächen und Wohnfläche wurde auf ein Mindestmaß an Feststoffen sowie Feststoffkonzentrationen im Oberflächenabfluss geschlossen.

Die Versuchsanordnung an diesem Standort wurde automatisiert durchgeführt, wozu eine Durchflussmesseinrichtung im Zulaufkanal des Regenklärbeckens installiert wurde. Es ist eine Nivu Flow 750 Messeinrichtung der Firma NIVUS im Kanal installiert worden, die auf die lokalen Durchflüsse kalibriert wurde. Die Messwerte der Durchflussmesseinrichtung werden an die SPS des Schrägklärers übermittelt. Bei einsetzendem Niederschlag und entsprechenden Abflüssen im Zulaufkanal[1] des Regenklärbeckens wird die Pumpe zur Beschickung des Schrägklärers über die SPS aktiviert und gesteuert. Die Beschickungspumpe wurde im Einlauf- und Verteilerbauwerk des RKB installiert, siehe hierzu Abbildung 2.8.

[1] Ein ausreichender Zulauf ist gegeben, wenn die für den Versuch erforderliche Wassermenge den Zulaufkanal zum RKB durchströmt.

Für die Bilanzierung der Zu- und Ablauffracht sowie die Quantifizierung des Feststoffrückhalts wurden durchflussproportional Proben in einen großvolumigen Behälter gefördert. Die Probenahmestrategie mittels Feststoffsammlern ist identisch mit der im Mischsystem. Der mit Röhrenabscheidern ausgestattete Schrägklärer wurde mit Oberflächenbeschickungen von q_A = 1, 2, 3, 4 und 6 m/h betrieben. Die Wirksamkeiten aus dem Trenn- und Mischsystem können daher direkt miteinander verglichen werden.

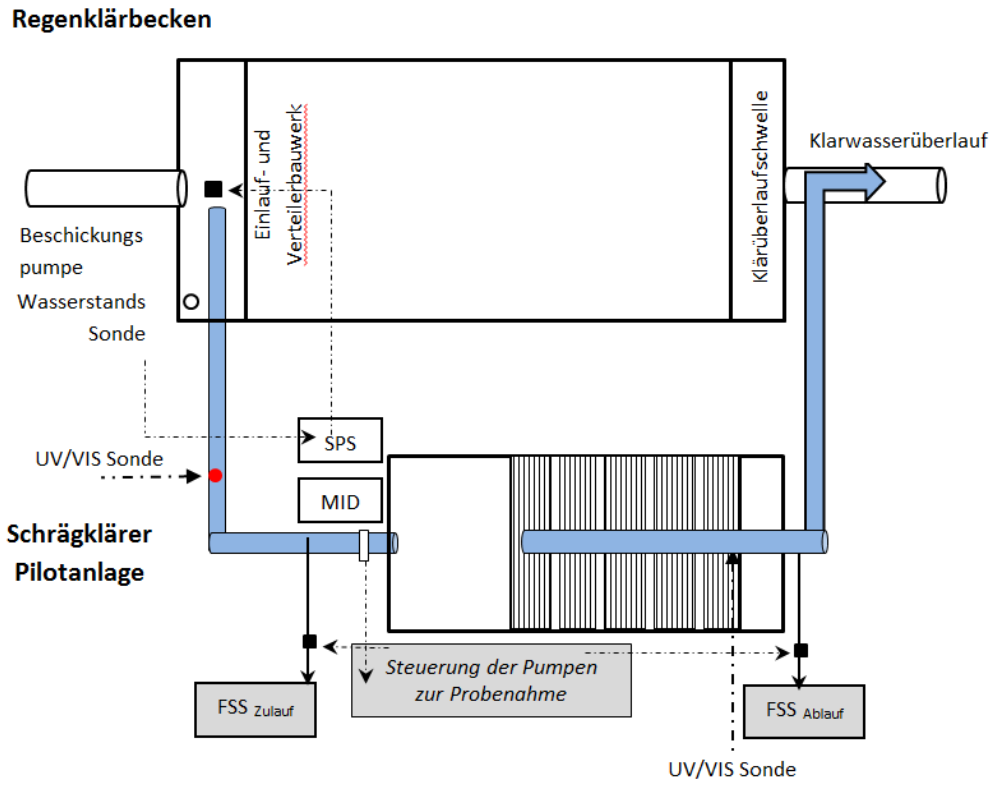


Abbildung 2.8: Versuchsanordnung im Trennsystem

2.6 Ermittlung des Frachtrückhalts

2.6.1 **Feststoffsammler**

Die angewandte Strategie zur Ermittlung der Frachtwirksamkeit der Sedimentationsanlage erfolgt über Feststoffsammler. Die Probenahmestrategie wurde bereits in vorherigen Studien des KIT Fachbereichs Siedlungswasserwirtschaft und Wassergütewirtschaft erfolgreich angewandt. Unter anderem sind das die von NRW geförderten Vorhaben „ReFeNi Phase 1“ (Fuchs et al. (2013)) „ReFeNi Phase 2“ und das RÜB-Vorhaben (Kemper et al. (2015a) und Kemper et al. (2015b)).

Die durchflussproportional gezogenen Proben aus dem Zu- und Ablauf der Sedimentationsanlage werden in großvolumige Behälter (ca. 1000 l) gefördert. Nach Ende des Entlastungsereignisses erfolgt eine Sedimentationszeit von 2-3 Tagen. Über diese Standzeit sedimentieren die Feststoffe in dem Behälter. Anschließend erfolgt die Entnahme von Wasser- und Feststoffproben aus dem Behälter, siehe Abbildung 2.9.

Aus den Behältern wird eine Wasserprobe mit 1 Liter geschöpft, das restliche Überstandswasser wird dekantiert und verworfen. Der auf dem Boden des Sammlers befindliche Schlamm wird geborgen und im Labor analysiert. Letztere Probe wird in Abbildung 2.9 als „Feststoffprobe“ bezeichnet. Es erfolgt eine Nasssiebung der Feststoffprobe mit den Maschenweiten 0,063 mm und 2,0 mm. Daraus wird der Trockensubstanzgehalt (TS) und der Glühverlust für die drei Kornfaktionen (<0,063 mm, 0,063-2,0 mm und > 2,0 mm) ermittelt. Über den Trockensubstanzgehalt (TS in mg) und das Volumen (l) der Probe aus dem großvolumigen Behälter wird die Konzentration der Feststoffe ermittelt, welche in die Frachtbilanzierung eingeht.

In diesem Vorhaben wird der Frachtrückhalt für Feststoffe < 2,0 mm und für die Fraktion < 0,063 µm (AFS_{Fein}) berechnet. Letztere ist von besonderem Interesse. Eine Bewertung der Abscheideleistung einer Sedimentationsanlage kann nur anhand der Partikel der Ton- und Schluff-Fraktion erfolgen, denn mineralische Partikel der Kornfraktion Sand oder Kies können problemlos abgeschieden werden. Partikel, die in der Wasserprobe des Überstandswassers enthalten sind, wurden bei der Frachtbilanz ausgeklammert, da sie einen Unsicherheitsfaktor darstellen. Die Partikel im Überstandswasser sind zu einem sehr hohen Anteil organisch, darunter könnten z. B. auch Algen sein, die innerhalb der Standzeit in dem Behälter gewachsen sind.

Im Gelbdruck des DWA-A 102 (2016) wird als neue Zielgröße der Regenwasserbehandlung der Parameter AFS63 definiert. Darüber hinaus wird dieser Parameter als Bemessungsgrundlage für Sedimentationsanlagen im Trennsystem genannt. Die exakte laboranalytische Vorgehensweise zur Ermittlung des Parameters AFS_{63} ist noch nicht festgelegt worden. Einblicke in den Stand der aktuellen Diskussionspunkte geben Baum et al. (2018).

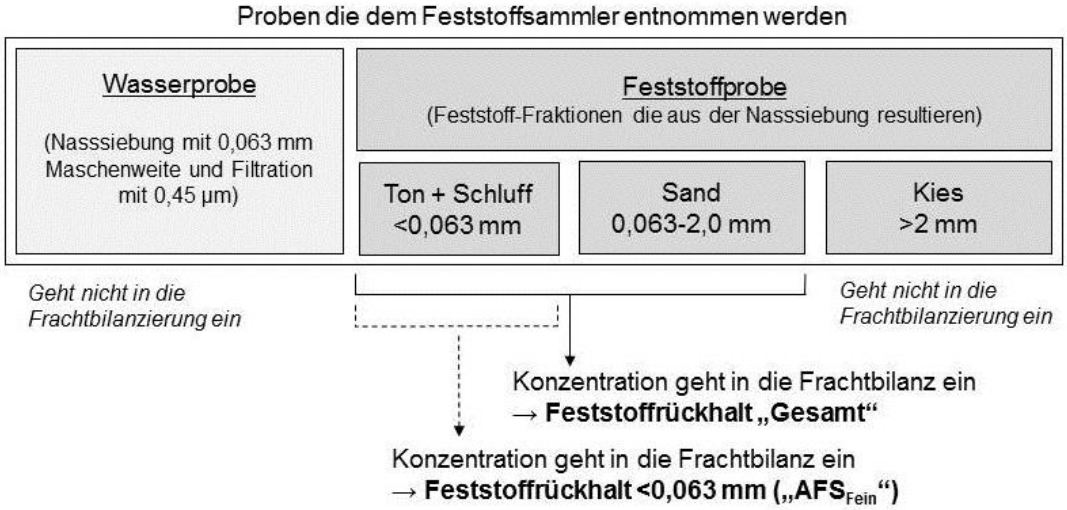


Abbildung 2.9: Proben aus dem Feststoffsammler und deren Verwendung

Die in diesem Vorhaben als Fraktion 0,063 mm oder als AFS_{Fein} bezeichnete Größe ist nicht mit AFS63 gleichzusetzen, jedoch unterscheiden sich diese nur geringfügig. Während AFS_{Fein} nach der Nasssiebung alle Partikel betrachtet, die kleiner der Maschenweite 0,063 mm sind, wird bei dem Parameter AFS_{63} nach der Nasssiebung die Suspension über einen Filter mit der Porenweite 0,45 µm filtriert. Im Hinblick auf die Frachtbilanz ist also die sedimentierbare Masse der Partikel zwischen 0 -0,45 µm bei

AFS_{Fein} mitberücksichtigt und bei AFS63 wird dieser Anteil durch den Filter zurückgehalten und ist daher nicht Teil der Bilanz. Eine abschließende detaillierte Vorgabe, z. B. in Form einer DIN zur analytischen Bestimmung des Parameters AFS63, wird diskutiert, jedoch ist diese noch nicht erfolgt. Diejenigen Forschungsinstitute, die sich mit dem Thema in der Praxis auseinandersetzten, sehen unterschiedliche Probleme. Das KIT sieht Schwierigkeiten bei der analytischen Bestimmung der abfiltrierbaren Stoffe. Da die Poren des Filters sich je nach Eigenschaften der Suspension häufig verschließen und dieser in Folge nicht mehr durchlässig ist, ist die Filtration eines repräsentativen Probenvolumens in der durch die DIN vorgegebenen Filtrationszeit nicht zuverlässig möglich.

2.7 UV/VIS-Spektroskopie

2.7.1 **Einsatz und Funktionsweise**

UV/VIS-Spektrometersonden finden eine vielseitige Anwendung in der qualitativen Überwachung von Trinkwasser- und Abwassertechnik. In diesen Vorhaben wurde die Sonde namens spectro::lyser der Firma s::can eingesetzt (Abbildung 2.10). Die Untersuchungen wurden durch Mayer (2018) im Zuge einer Masterarbeit unterstützt.

Spektrometersonden zeichnen die Lichtabsorption im Wellenlängenbereich zwischen 200 nm und 735 nm auf. Der ultraviolette (UV) Spektralbereich liegt zwischen 200-400 nm und der sichtbare (VIS) zwischen 400-800 nm. Bei der Messtechnik handelt es sich um Absorptionsmessungen, die auf das Lambert-Beer'sche Gesetz zurückgehen. Das Gesetz wird wie folgt beschrieben:

$$E = -\,lg\,\frac{I_0}{I} = \varepsilon \cdot d \cdot c$$

mit:
E = Extinktion
I_0 = Eintrittsintensität
I = Austrittsintensität
ε = molare Extinktionskoeffizient in l/(mol·cm),
d = Schichtdicke der Probe in cm
c = Konzentration der gelösten absorbierenden Substanz in mol/l

Der Extinktionskoeffizient ist abhängig von der Wellenlänge λ und der Temperatur ϑ (Wedler und Freund 2012).

Die Messtechnik beinhaltet eine Sende-, Empfangs- und eine Messeinheit. Als Sendeeinheit dient eine Xenon-Blitzlampe. Der von der Lampe ausgehende Lichtstrahl wird geteilt. Ein Lichtstrahl durchdringt die Probe, welche durch das Messfenster der Sonde strömt, Abbildung 2.10 links. Der andere Lichtstrahl („Kompensations-Lichtstrahl") wird intern weitergeleitet und benötigt, um Schwankungen der Lichtquellenenergie und instrumentelle Schwankungen auszugleichen. In der Empfangseinheit befindet sich der Detektor, welcher den Lichtstrahl als auch den Kompensationslichtstrahl empfängt. Für

die Steuerung, Datenaufzeichnung, Auswertung der Messungen etc. dient das im Lieferumfang enthaltene moni::tool.

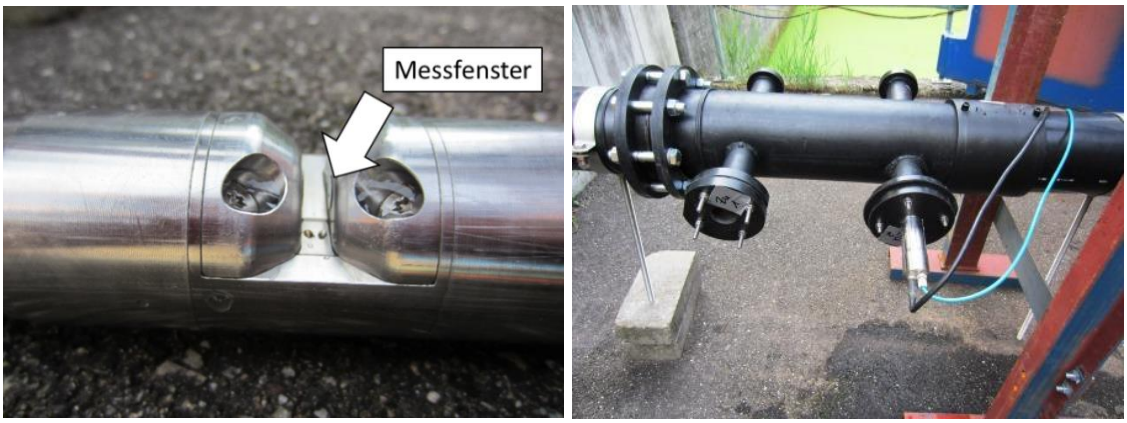


Abbildung 2.10: UV/VIS-Spektrometersonde; Messfenster (linkes Bild), Sonde im Zulaufrohr verbaut (rechtes Bild) (Mayer 2018)

Nach Weingartner et al. (2010) können folgende Parameter ermittelt werden: AFS, Trübung, Nitrat-Stickstoff, chemischer Sauerstoffbedarf (CSB), biologischer Sauerstoffbedarf (BSB), gesamter organischer Kohlenstoff (TOC), gelöster Kohlenstoff (DOC), assimilierbarer organischer Kohlenstoff (AOC), SAK 254, BTX, Ozon (O_3), Schwefelwasserstoff (H_2S) und Temperatur. Abbildung 2.11 ist zu entnehmen durch welchen Wellenlängenbereich die genannten Parameter repräsentiert werden. Es können maximal acht Parameter zeitgleich erfasst werden.

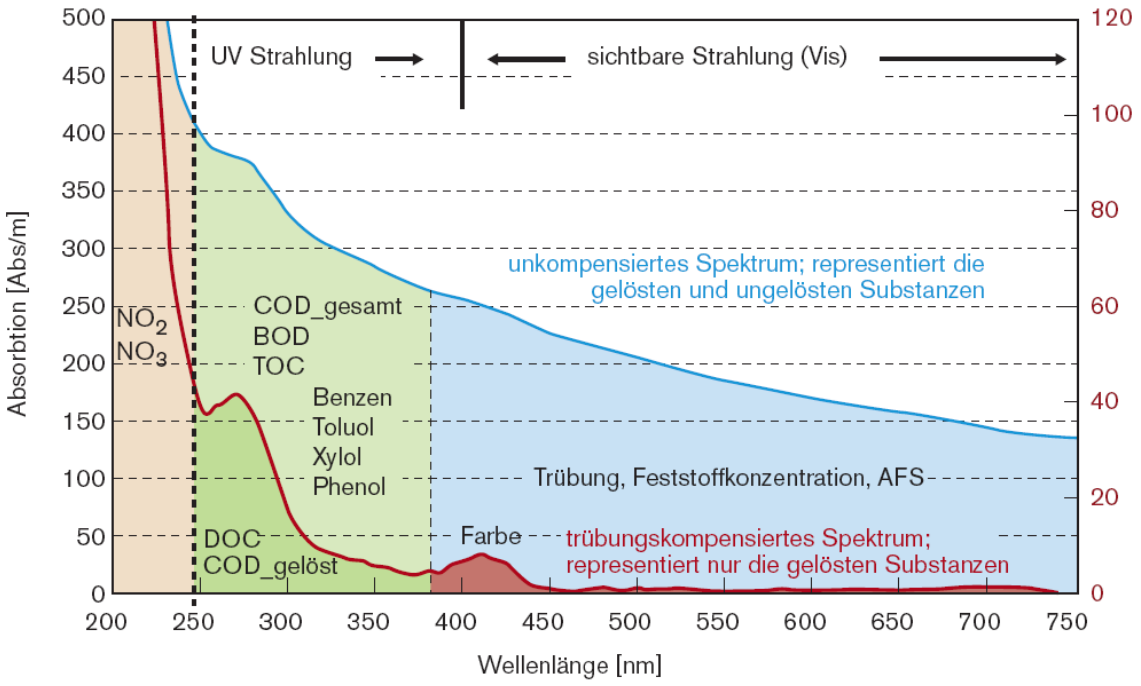


Abbildung 2.11: UV/VIS-Absorptionsspektrum aus Weingartner et al. (2010)

2.7.2 **Kalibrierung der Sonden**

Die Sonden verfügen über eine voreingestellte „globale“ Kalibrierung. Diese auf einem sehr breiten Messbereich basierende Kalibrierung soll einen vielseitigen Einsatzbereich ermöglichen. Über eine durch den Anwender zu erfolgende lokale Kalibrierung kann die Sonde auf die Standortbedingungen eingestellt werden. Angaben zur Messgenauigkeit werden vom Hersteller nicht gemacht. Forschungsvorhaben kommen zu sehr unterschiedlichen Resultaten. Weingartner et al. (2010) berichten über eine sehr hohe Zuverlässigkeit in diversen Projekten. Gamerith et al. (2011) kamen in ihren Untersuchungen im Mischsystem zu dem Ergebnis, dass die Messergebnisse einen Fehler von 50 % gegenüber den Laborwerten aufweisen. Durch die lokale Kalibrierung konnten Gamerith et al. die Fehler auf 25 bis 30 % reduzieren.

Die in diesem Vorhaben eingesetzten Sonden wurden lokal kalibriert, um die Messgenauigkeit zu verbessern. Die lokale Kalibrierung der Sonden im Zu- und Ablauf des Schrägklärers erfolgte manuell während Regenereignissen am Standort der Anlage. Es wurden hierzu bei vier Niederschlagsereignissen Proben gezogen, die für die lokale Kalibrierung der Parameter AFS und CSB dienten. In Bezug auf Feststoffe können die Sonden nur die Gesamtkonzentration der abfiltrierbaren Stoffe erfassen.

Bei der Kalibrierung der Sonden wurden zwei Vorgehensweisen getestet. Bei der ersten Methode („Messreihe 1“) war die Kalibrierung wie in Abbildung 2.10 rechts dargestellt eingebaut. Die Sonde hat bei kontinuierlichem Durchfluss eine Kalibriermessung durchgeführt, zeitgleich wurde aus dem Zulaufrohr eine Wasserprobe für die Laboranalyse genommen. Bei dieser Vorgehensweise wird das von der Sonde und im Labor analysierte Wasser zeitgleich gezogen, es handelt sich jedoch nicht um das identische Wasservolumen. Diese Vorgehensweise hat bei der Kalibrierung zu Ungenauigkeiten geführt. Aus diesem Grund wurde eine alternative Vorgehensweise für die Kalibrierung der Sonden getestet („Messreihe 2“). Hierbei wurden 10 Liter Wasserproben aus dem Zu- bzw. Ablauf der Schrägklärer-Anlage für die Kalibrierung in je einen Eimer gefördert, in dem sich die Sonden befanden. Unter ständiger Durchmischung des Wasservolumens erfolgte die Kalibriermessung der Sonden in den Eimern.

Nach Abschluss der Messung mit der Sonde wurden die Eimer mit den Proben, die für die Kalibrierung der Sonde verwendet wurden, in das Labor des KIT Fachbereichs Siedlungswasserwirtschaft und Wassergütewirtschaft gebracht. Im Labor wurden die Proben auf die Parameter AFS, AFS63 und CSB analysiert.

Abbildung 2.12 zeigt auf dem linken Bild die Apparatur, die für die Vakuumfiltration benötigt wird, um den Parameter AFS zu bestimmen, und auf dem rechten Bild die über 2 Stunden bei 110 Grad getrockneten Glasfaserfilter mit Porenweite 0,45 µm. Für die Messung des CSB wurde der LCK 314 Küvetten-Schnelltest der Firma Hach verwendet.

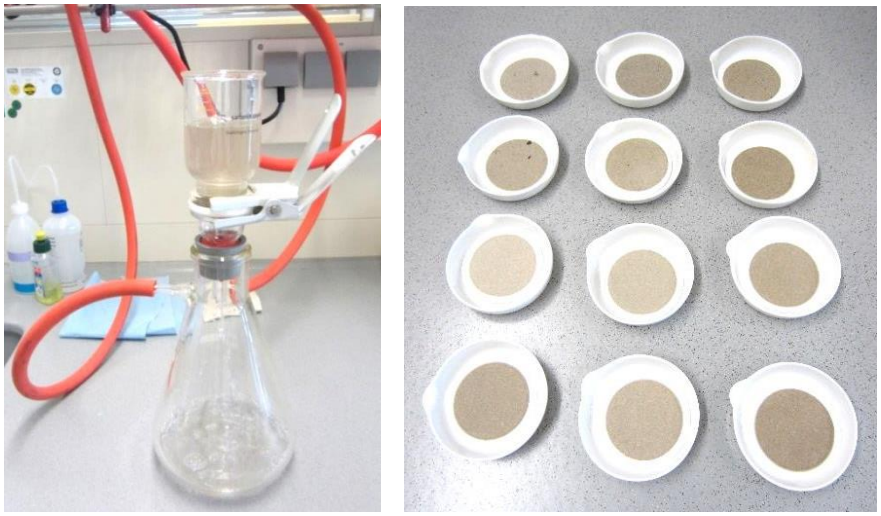


Abbildung 2.12: Vakuumfiltration zur Ermittlung der abfiltrierbaren Stoffe (links); mit Partikeln beladene Glasfaserfilter nach der Filtration und Trocknung (rechts) (Mayer 2018)

Abbildung 2.13 stellt beispielhaft den zeitlichen Verlauf eines Regenereignisses dar, währenddessen im Zu- und Ablauf des Schrägklärers Kalibrierproben gezogen wurden.

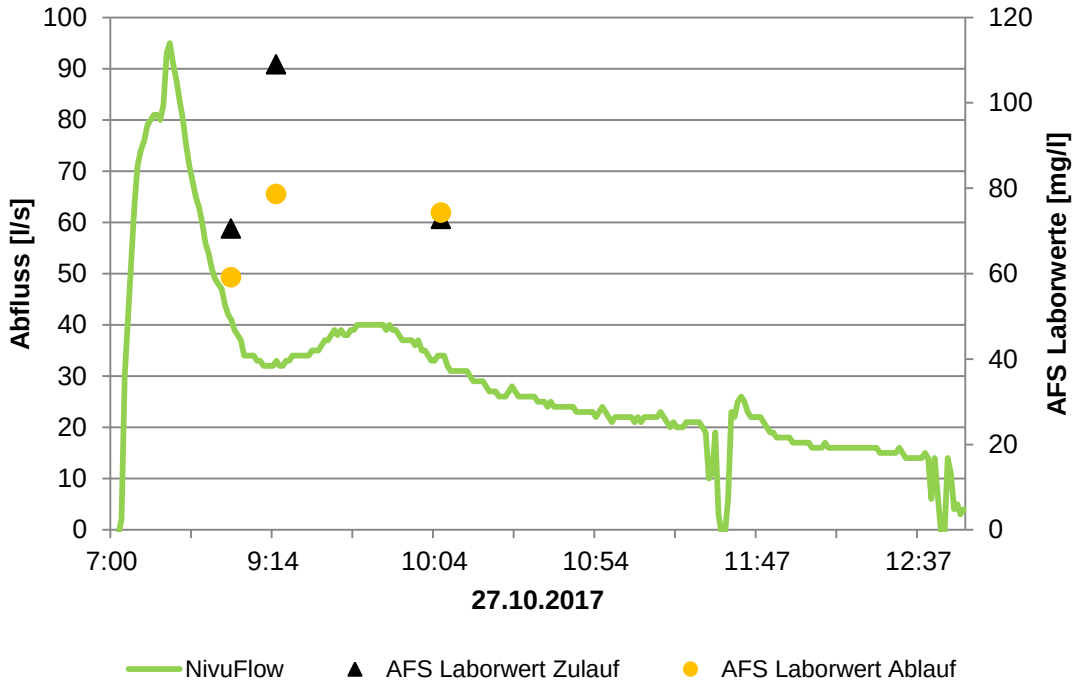


Abbildung 2.13: Aufzeichnung des Niederschlagsereignisses am 27.10.2017 (Mayer 2018)

Die Kalibrierung der Sonden-Messwerte mit den Laborwerten erfordert eine Regressionsanalyse. Es werden zwei Regressionsanalysen angewendet: die Ordinary Least Square Regression (OLS, Methode der kleinsten Quadrate) und die Partial Least Square Regression (PLS – teilweise kleinste Quadrate) Methode. Bei der OLS handelt es sich um eine lineare Regression, während es sich bei der PLS um ein multivariates

Regressionsverfahren handelt, das die Eigenschaften der Hauptkomponentenanalyse und der Mehrfachregression kombiniert. Erläuterungen zu den statistischen Verfahren sind der Literatur zum Beispiel Reinecke (2014), Komlos und Süssmuth (2010) oder Viscarra Rossel et al. (2006) zu entnehmen. Um die Qualität der OLS-Regression mit der PLS-Regression vergleichen zu können, werden das Bestimmtheitsmaß (R^2) und der Root Mean Square Error (RMSE, Wurzel des mittleren quadratischen Fehlers) betrachtet.

3 Ergebnisse

3.1 Konstruktive Gestaltung des Einlauf- und Verteilerbauwerks

An der Schrägkläreranlage wurden verschiedene Bauweisen der konstruktiven Gestaltung eines Einlauf- und Verteilerbauwerks analysiert. Ausgehend von den theoretischen Grundlagen einer Sedimentationsanlage, dass ein ideal durchströmter Reaktor die höchste Sedimentationswirksamkeit erzielt, wurde der Fokus in den Untersuchungen darauf gelegt, das integrale Strömungsverhalten des Reaktors zu optimieren. Detaillierte Hinweise zu den durchgeführten Analysen können der Publikation von Kemper (2016) entnommen werden. Der Fokus der Untersuchungen lag auf dem Einlauf- und Verteilerbauwerk. Das über den Schrägklärer-Elementen angeordnete Rinnensystem zur Ableitung des Klarwasserüberlaufes wurde für diese Bauweise als günstig angenommen. Insgesamt wurden 13 konstruktive Bauweisen zur Gestaltung untersucht, siehe Übersicht in Kapitel 6.2.

Aus diesem Optimierungsprozess sind das T-Stück, das den Zulauf aufteilt sowie eine hoch liegende Schwelle als hydraulisch günstigste Bauweisen hervorgegangen.

Die orientierenden Untersuchungen zum Feststoffrückhalt (z.B. Kemper et al 2015a) bestätigen die theoretischen Grundlagen, dass die hydraulisch günstige Gestaltung einen deutlich höheren Frachtrückhalt erzielt gegenüber der nicht hydraulisch optimierten Anlage. Die Differenz des Frachtrückhalts steht in Abhängigkeit zu der Oberflächenbeschickung. Insbesondere mit zunehmender Oberflächenbeschickung divergiert die Leistung der Sedimentationsanlage und die optimierte Anlage erzielt einen deutlich höheren Rückhalt gegenüber einer hydraulisch nicht optimierten Anlage. Das Monitoring und die nachfolgend vorgestellten Ergebnisse wurden immer mit der Zulaufvariante T-Stück durchgeführt.

3.2 Frachtrückhalt im Mischsystem

Abbildung 3.1 gibt einen Überblick der Zulaufkonzentrationen, die über die Dauer des Messzeitraumes in Rastatt gemessen wurden. Die Zulaufkonzentration der Kornfraktion <0,063 mm betrug im Median etwa 131 mg/l. Demgegenüber sind die Konzentrationen der Kornfraktion 0,063-2,0 mm mit 69 mg/l und der Fraktion >2,0 mm mit 10 mg/l deutlich geringer. Die Gesamtkonzentration aller Feststoffe beträgt 260 mg/l im Median.

Abbildung 3.2 zeigt die Gewichtsanteile der Kornfraktionen im Zulauf und Ablauf. Im Median sind 67 % der Feststoffe im Zulauf der Fraktion <0,063 mm zuzuordnen und 26 % der Fraktion 0,063-2,0 mm. Im Ablauf nimmt der Feststoffanteil der Fraktion <0,063 mm auf 90 % zu. Die Feststoffe sind zu einem sehr hohen Anteil organisch.

Der Glühverlust beträgt 60 % in der Fraktion <0,063 mm im Zulauf und steigt mit zunehmender Korngröße im Zu- und Ablauf, siehe hierzu Abbildung 3.3.

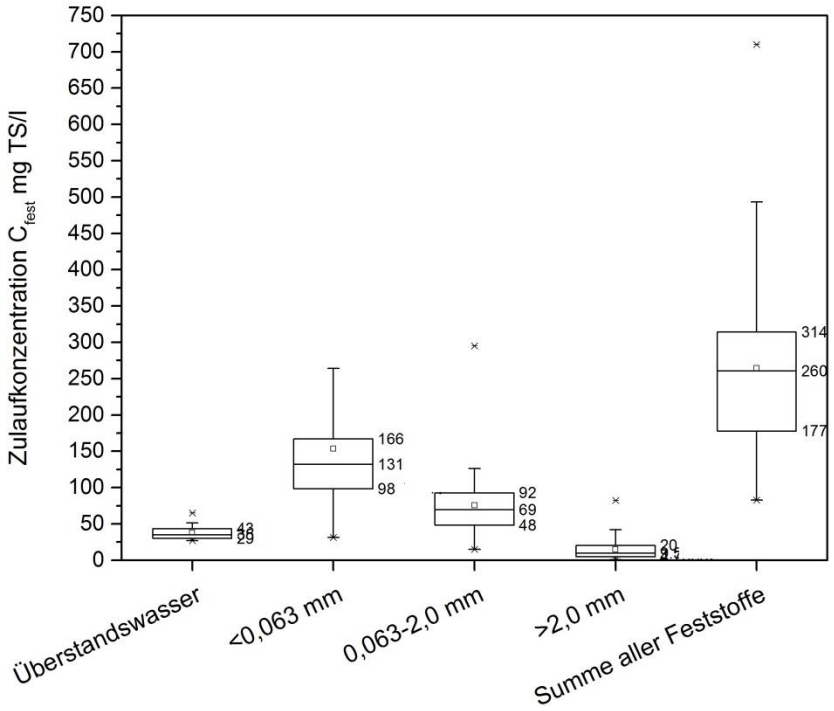


Abbildung 3.1: Feststoffkonzentrationen im Zulauf im Mischsystem

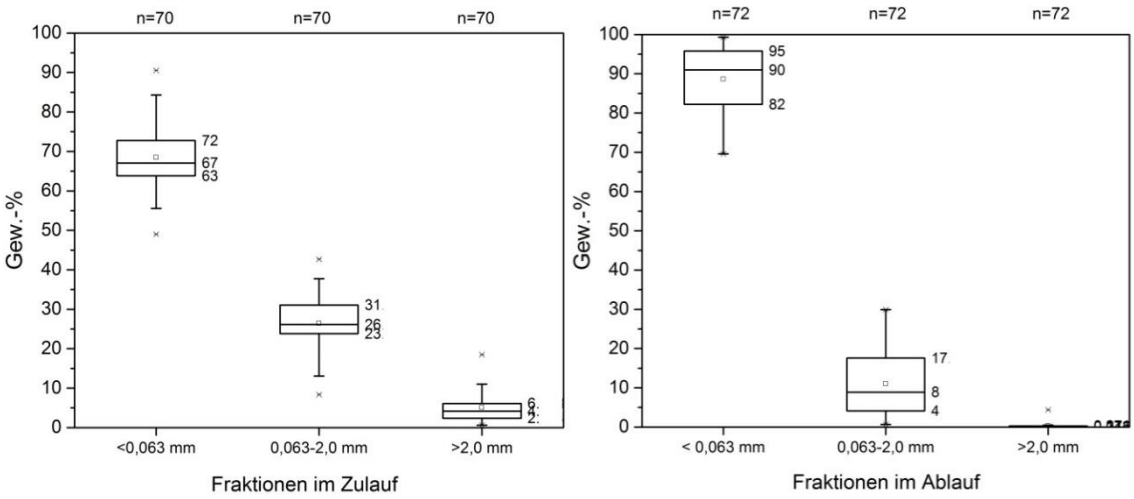


Abbildung 3.2: Gewichtsanteile der Feststoff-Fraktionen im Zu- und Ablauf im Mischsystem

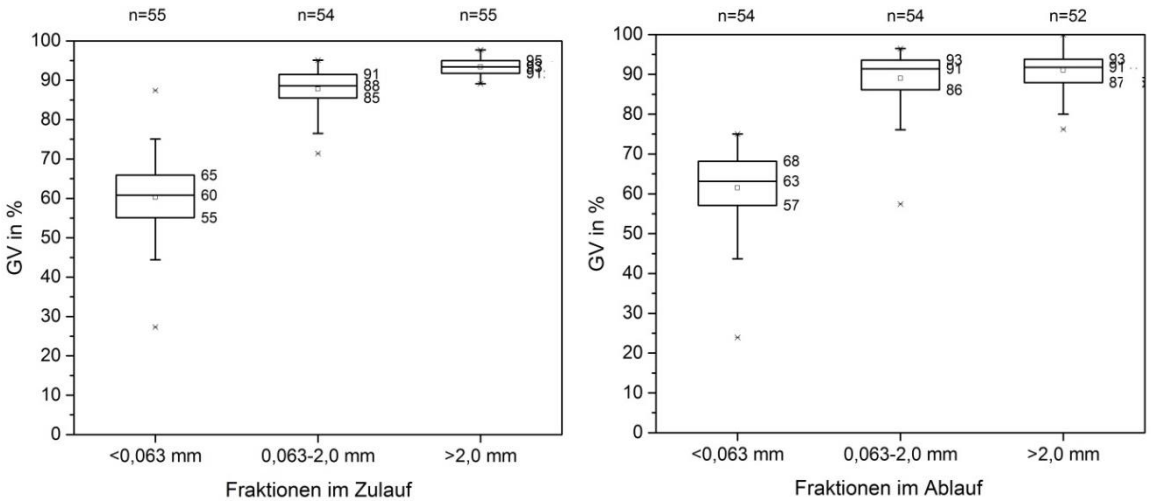


Abbildung 3.3: Glühverlust der Feststoff-Fraktionen im Zu- und Ablauf im Mischsystem

3.2.1 **Plattenabscheider im Mischsystem**

Im Mischsystem wurden Serienversuche zur Quantifizierung der Wirksamkeit mit Plattenabscheidern durchgeführt. Bei der Wirksamkeit von Anlagen kann zwischen der Speicher- und Sedimentationswirksamkeit differenziert werden. Die Rechenansätze zur Ermittlung der Wirksamkeiten wurden in Abschnitt 2.2 vorgestellt.

Für die Betrachtung der Wirksamkeit einer Anlage zum Rückhalt der Feststoffe sind die Speicher- und Sedimentationswirksamkeit in der Summe zu betrachten. Abbildung 3.4 visualisiert die Ergebnisse der Untersuchungen für den Partikelrückhalt < 2,0 mm in zwei Exponentialfunktionen. Alle Messergebnisse für eine Oberflächenbeschickung wurden hierzu zu einem Medianwert zusammengefasst und als Grundlage für die Erstellung der Exponentialfunktion genutzt.

Unter Berücksichtigung der Speicher- und der Sedimentationswirkung erreicht die Anlage unter stationären Bedingungen bei q_A = 0,5 m/h etwa 88 % Rückhalt. Der größte Anteil wird unter dieser geringen hydraulischen Belastung über die Sedimentation zurückgehalten (78 %), wohingegen die Speicherwirkung mit ca. 10 % einen eher geringen Anteil an der Wirksamkeit einnimmt.

Mit zunehmender Oberflächenbeschickung nimmt die Sedimentationswirksamkeit der Anlage ab und erreicht bei q_A = 10 m/h einen Rückhalt von lediglich 9 %. Zusammen mit der Speicherwirkung kann in der Summe noch ein Anteil von insgesamt 25 % der gesamten Feststoffe mit einer Korngröße <2,0 mm zurückgehalten werden.

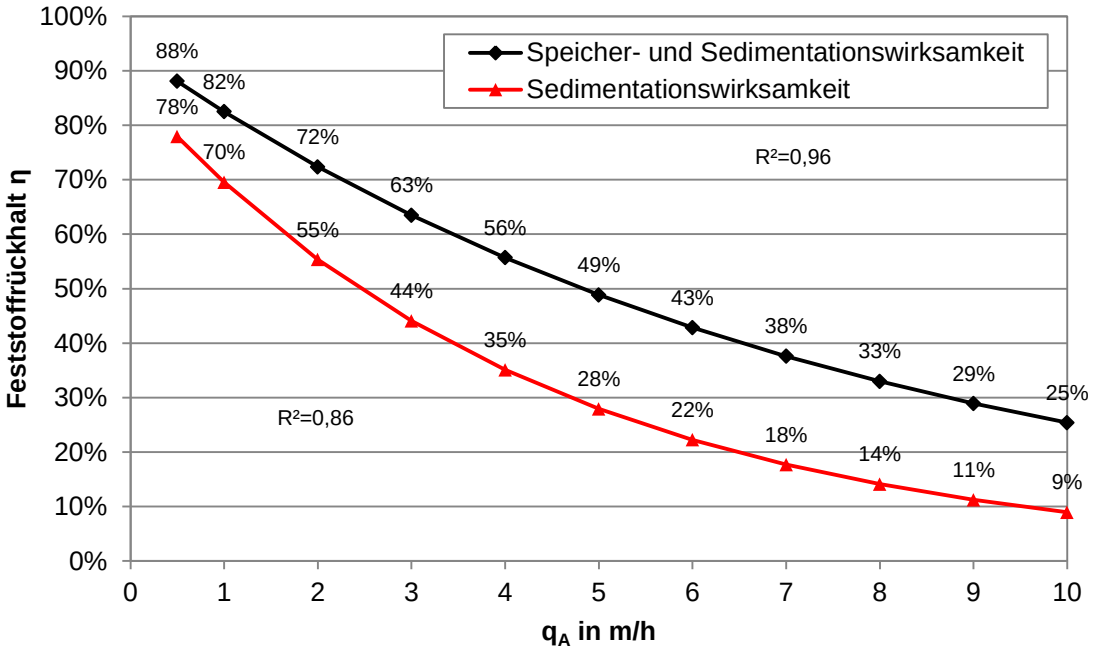


Abbildung 3.4: Feststoffrückhalt des Schrägklärers im Mischsystem für die Fraktion < 2,0 mm im Mischsystem (Plattenabscheider)

Die Ergebnisse zum Rückhalt der Partikel < 0,063 mm, die das Speichervolumen und die Sedimentation berücksichtigen, wurden bereits in Kemper et al. (2015b) für das Mischsystem vorgestellt. Der Feststoffrückhalt für die Kornfraktion < 0,063 mm ist der Abbildung 3.5 zu entnehmen. Auch in dieser Grafik werden die Speicher- und Sedimentationswirksamkeit insgesamt sowie eine Funktion zum Rückhalt durch die Sedimentation dargestellt.

Die Wirksamkeit bei q_A = 0,5 m/h sinkt für die feine Fraktion der Feststoffe auf 77 %. Allein über die Sedimentation werden in der Anlage nur 58 % der AFS_{Fein} zurückgehalten. Mit zunehmender Oberflächenbeschickung nimmt der Rückhalt ab. Das Merkblatt DWA-M 176 (2013) empfiehlt für stationär betriebene Anlagen[2] eine Bemessungsoberflächenbeschickung von $q_A \leq 2$ m/h. In der Pilotanlage wird unter diesen hydraulischen Bedingungen ein Gesamtrückhalt von 62 %erreicht.

[2] Die Reduzierung der Oberflächenbeschickung von $q_A \leq 4$ m/h auf $q_A \leq 2$ m/h wird im DWA-M 176 vorgenommen, da im stationären Betrieb der positive Effekt der vielen kleinen Niederschlagsereignisse nicht auftritt.

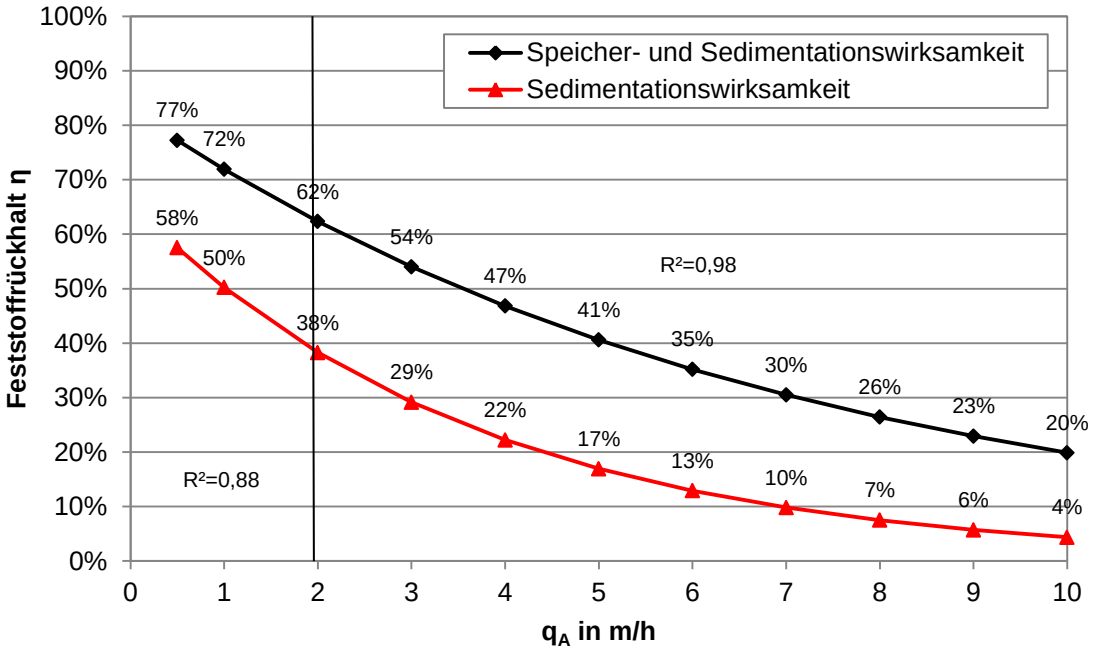


Abbildung 3.5: Feststoffrückhalt des Schrägklärers im Mischsystem für die Fraktion < 0,063 mm im Mischsystem (Plattenabscheider)

3.2.2 **Vergleich Platten- und Röhrenabscheider im Mischsystem**

Weitere orientierende Versuche wurden an der Anlage mit Röhrenabscheidern durchgeführt. Diese Untersuchung ist von Interesse, da sich auf dem Markt Röhrenabscheider gegenüber Plattenabscheidern durchgesetzt haben. Es wurden die in den Bestandsanlagen am häufigsten verbauten Elemente (Tube DEK Elemente) eingesetzt. Wie in Abschnitt 2.3 bereits erläutert, beträgt die effektive Absetzfläche in der Anlage mit Plattenabscheidern 21,45 m² und mit Röhrenabscheidern 20,25 m². Für den Durchfluss mit Plattenabscheidern ergeben sich 23,8 l/s (85,8 m³/h), für den Durchfluss mit Röhrenabscheidern 22,5 l/s (81 m³/h). Dies entspricht einer Oberflächenbeschickung von q_A = 4 m/h. Diese Versuche ermöglichen einen direkten Vergleich des Frachtrückhalts der Anlage mit zwei unterschiedlichen Ausbauten. Die Stichprobenanzahl der Versuche ist unterschiedlich. Den 16 Serienversuchen mit Plattenabscheidern wurden fünf orientierende Versuche mit Röhrenabscheidern gegenübergestellt.

Die Ergebnisse der ermittelten Sedimentationswirksamkeiten sind in Abbildung 3.6 dargestellt. Die Grafik zeigt die erreichten Wirksamkeiten für die Versuche in einer Punktwolke sowie in einer Boxplot-Darstellung.

Zunächst unterliegen die Ergebnisse beider Versuchsreihen einer breiten Streuung, wobei die Datensätze, die mit dem Plattenabscheider ermittelt wurden, deutlich stärker variieren. Im Median erreicht der Plattenabscheider 27 % und der Röhrenabscheider 34 % Rückhalt.

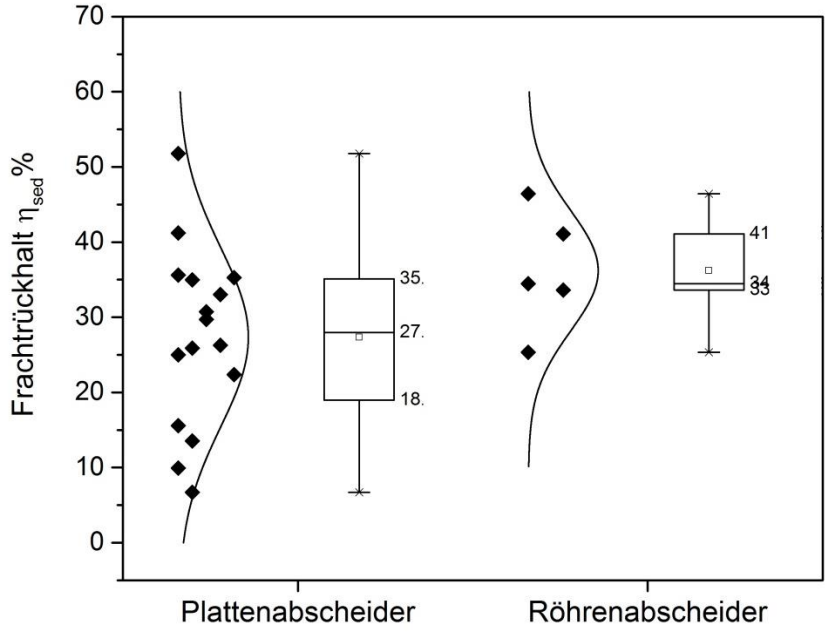


Abbildung 3.6: Sedimentationswirksamkeit für Partikel <0,063 mm, mit Platten- bzw. mit Röhrenabscheidern im Mischsystem bei q_A = 4 m/h

Die höhere Wirksamkeit der Röhrenabscheider kann durch eine größere Absetzfläche begründet werden. So setzen sich auf den seitlichen Wänden der Röhren ebenfalls Partikel ab, deren Fläche jedoch nicht bei der Berechnung der effektiven Absetzfläche berücksichtigt wird. Ein weiterer Vorteil von Röhren gegenüber Platten kann in den veränderten Strömungsbedingungen liegen.

Es sind jedoch noch eine Vielzahl anderer möglicher Einflussfaktoren vorhanden, die eine abschließende Beurteilung der Frage erschweren, ob Röhrenabscheider tatsächlich höhere Sedimentationswirksamkeiten gegenüber Plattenabscheidern erzielen. Das Ergebnis könnte auch durch eine zu geringe Stichprobenanzahl, durch unterschiedliche Partikelcharakteristiken, Flockungseigenschaften oder Zulaufkonzentrationen bei der Versuchsdurchführung beeinflusst worden sein.

Da es Hinweise gibt, dass die Zulaufkonzentration die Wirksamkeit beeinflusst, wurden diese Daten genauer betrachtet. Abbildung 3.7 stellt den Zusammenhang zwischen der Zulaufkonzentration und dem Frachtrückhalt dar. Es zeigt sich, dass die Versuche mit Röhrenabscheidern bei etwas höheren mittleren Zulaufkonzentrationen durchgeführt wurden. Auch wenn kein monokausaler, statistisch signifikanter Zusammenhang beider Parameter ersichtlich ist, geben die Punktwolken doch einen Hinweis auf einen Zusammenhang. Es erscheint grundsätzlich möglich, dass die höheren Zulaufkonzentrationen eine Einflussgröße waren, die dazu führte, dass die Anlage mit Röhrenabscheidern höhere Wirksamkeiten erbracht hat.

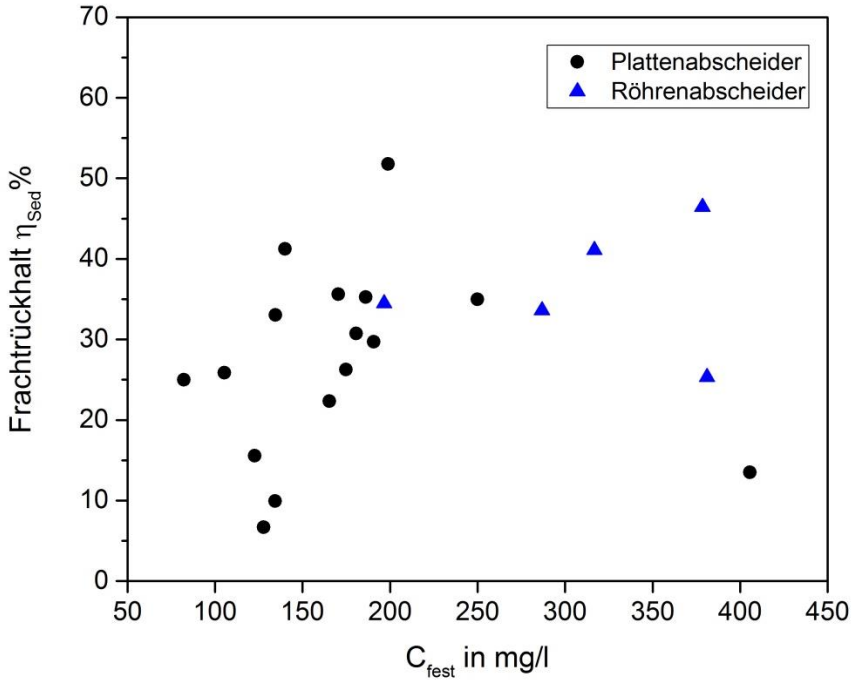


Abbildung 3.7: Sedimentationswirksamkeit und Feststoffkonzentrationen der Versuche

3.3 Frachtrückhalt im Trennsystem

Die Behandlungsanlage wurde in dem Zustand wie sie im Mischsystem im Einsatz war, also mit Röhrenelementen an den Standort im Trennsystem überführt.

Die Feststoffkonzentrationen an diesem Standort wurden in Abbildung 3.8 für alle ermittelten Feststoff-Fraktionen ausgewertet. Dem Box-Plot ist zu entnehmen, dass unter Betrachtung des 25-%- und 75-%-Quartils die Feststoffkonzentrationen zwischen 26 und 78 mg/l für die Ton- und Schluff-Fraktion (<0,063 mm Korngröße) liegen. Die Median-Konzentration liegt bei 49 mg/l und im arithmetischen Mittel bei 56 mg/l.

Die Median-Konzentration liegt somit etwas höher als der in dem breit angelegten Monitoring des ReFeNi-Phase-1-Vorhabens an 10 RKB (Median = 38 mg/l) ermittelt Wert (siehe Fuchs et al. 2013). Dennoch spiegeln die Ergebnisse aus diesem Vorhaben näherungsweise mittlere Bedingungen an Regenklärbecken wider, weshalb den Ergebnissen eine hohe Übertragbarkeit zugesprochen werden kann.

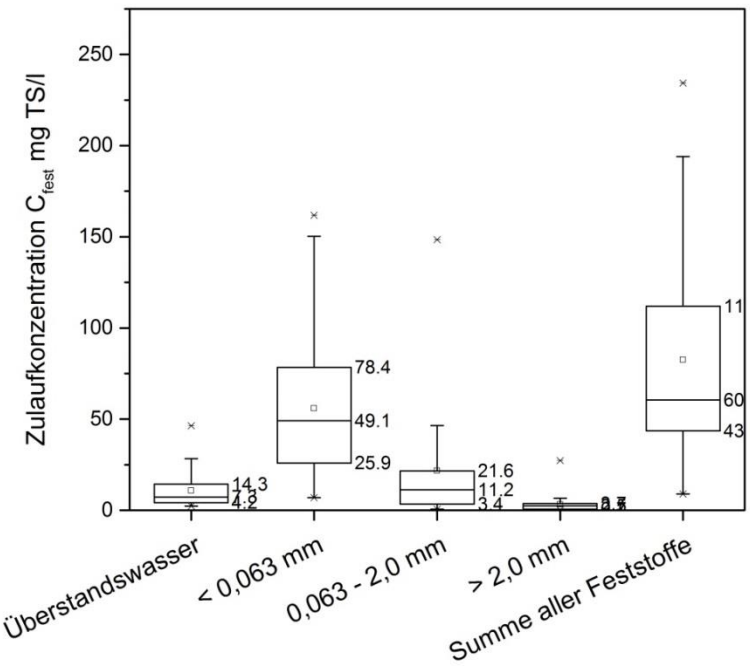


Abbildung 3.8: Feststoffkonzentrationen im Zulauf im Trennsystem

Die Wirksamkeit von Sedimentationsanlagen wird durch die Eigenschaften der Partikel, die Fließgeschwindigkeiten, die Flockungseigenschaften etc. mitbestimmt.

Um die Zusammensetzung der Feststoffe hinsichtlich der Partikelgrößen zu beschreiben, sind die prozentualen Gewichtsanteile der Kornfraktionen der Trockensubstanz ein geeigneter Indikator. Abbildung 3.9 beinhaltet ein Box-Plot-Diagramm, dem die Gewichtsanteile im Zu- und Ablauf der Behandlungsanlage aus 27 beprobten Regenereignissen zugrunde liegen.

Im Zulauf beträgt der Feststoffanteil der Fraktion <0,063 mm, im Median 64 % und für die Fraktion 0,063 -2,0 mm 11 %. Im Ablauf der Sedimentationsanlage nimmt der Gewichtsanteil der Feinfraktion zu und erreicht in der Fraktion <0,063 mm 81 % im Median.

Vergleicht man diese Daten mit den Messwerten des ReFeNi-Phase-1-Vorhabens, bei dem der Gewichtsanteil der <0,063 mm Fraktion im Zulauf 85 % betrug, weißt der Standort in der Ottostraße einen um 21 % höheren Anteil der gröberen Feststoff-Fraktionen auf. Es wird somit deutlich, dass Standorteinflüsse wie Einzugsgebiete, Nutzung, das Kanalnetz etc. die Zusammensetzung der Kornfraktionen maßgeblich beeinflussen. Nicht zuletzt sind auch die Pumpe und die Förderhöhe zur Entnahme der Proben relevante Einflussgrößen. In diesem Fall ermöglicht die geringe Förderhöhe von ca. 1,5 m eine repräsentative Beprobung der Feststoffe aus der Sand- und Kiesfraktion. Dies relativiert den Einfluss der Pumpe auf die Zusammensetzung der Feststoffe.

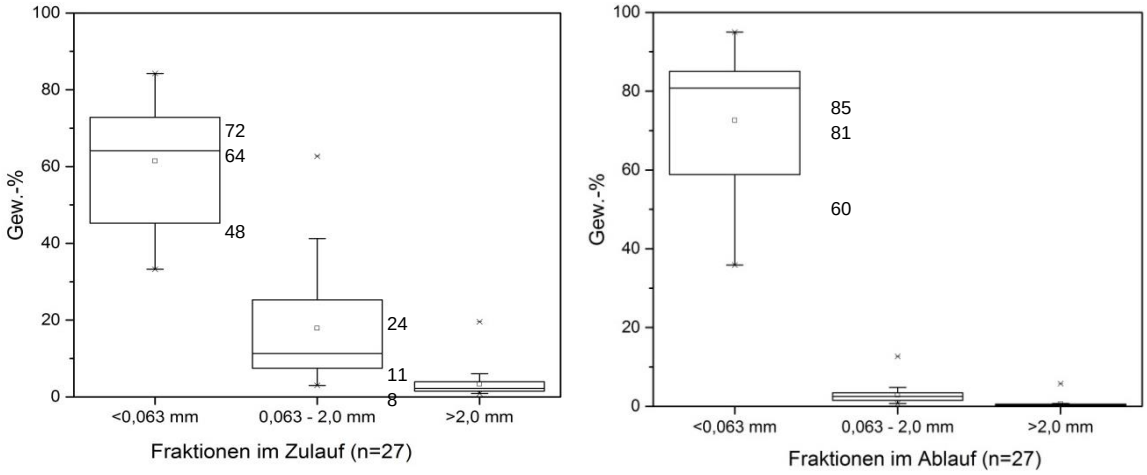


Abbildung 3.9: Box-Plot zu Gewichtsanteilen der Feststoffe im Zu- und Ablauf der Schrägklärer-Anlage im Trennsystem

Der Parameter Glühverlust wird zur Einschätzung des Anteils organischer Substanz in der Feststoffmasse herangezogen. Über den Glühverlust kann somit die Zusammensetzung der Feststoffe weitergehend beschrieben werden. Da organische Substanz von geringerer Dichte gegenüber mineralischer Substanz ist, kann sich dies auf die Sinkgeschwindigkeit der Partikel auswirken. Auch eine Einflussnahme der organischen Inhaltsstoffe auf die Flockenbildung kann nicht ausgeschlossen werden.

Der Glühverlust in der Feinfraktion <0,063 mm beträgt im Zu- und Ablauf etwa 30 % (Median). Von Fuchs et al. (2013) wurden im ReFeNi-Phase-1-Vorhaben recht ähnliche Werte im Trennsystem ermittelt. Das gilt auch für den Gehalt von etwa 40 % in der Fraktion 0,063-2,0 mm im Zulauf der Behandlungsanlage. Im Ablauf der Anlage beträgt der Median in dieser Fraktion 70 %, sodass hier eine deutliche Zunahme des Glühverlust-Gehaltes zu erkennen ist. Diese Zunahme wird als Indiz gewertet, dass mineralische Partikel sich aufgrund höherer Dichte in der Sedimentationsanlage abreichern und organische Partikel im Abfluss anreichern.

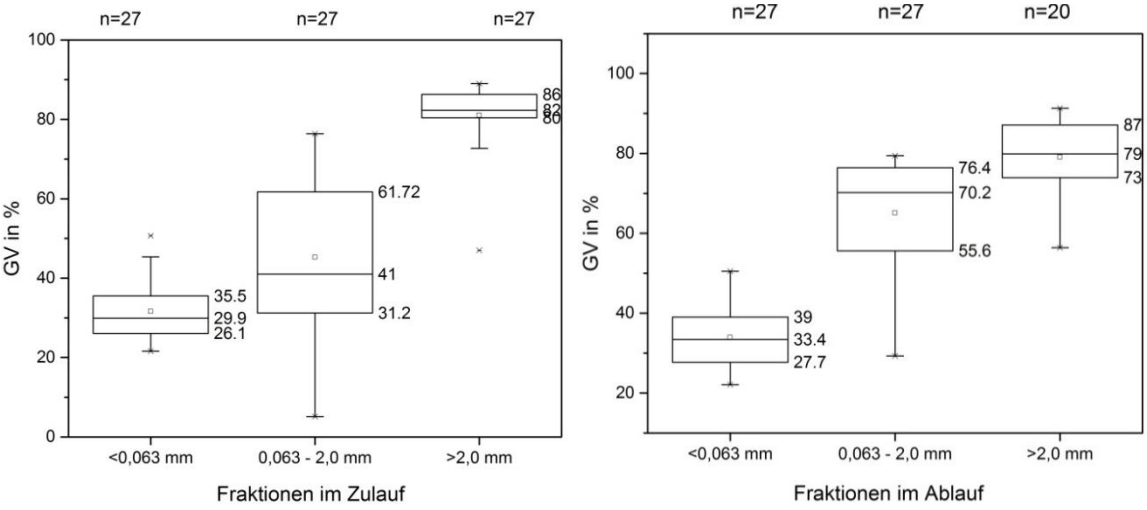


Abbildung 3.10: Glühverlust (GV) in % der Feststoffe aus dem Zu- und Ablauf der Schrägklärer-Anlage im Trennsystem

Abbildung 3.11 beinhaltet eine grafische Auswertung der mittleren Glühverluste für den Probenahme-Zeitraum im Jahresverlauf. Der Glühverlust in der Kornfraktion >2,0 mm ist über das Kalenderjahr konstant. Der Glühverlust der Kornfraktion 0,063-2,0 mm nimmt in den Monaten Oktober und November im Mittel um bis zu 20 % zu. Der Glühverlust für die Fraktion <0,063 mm verhält sich stabil über das Jahr mit einer leichten Zunahme zum Jahresende.

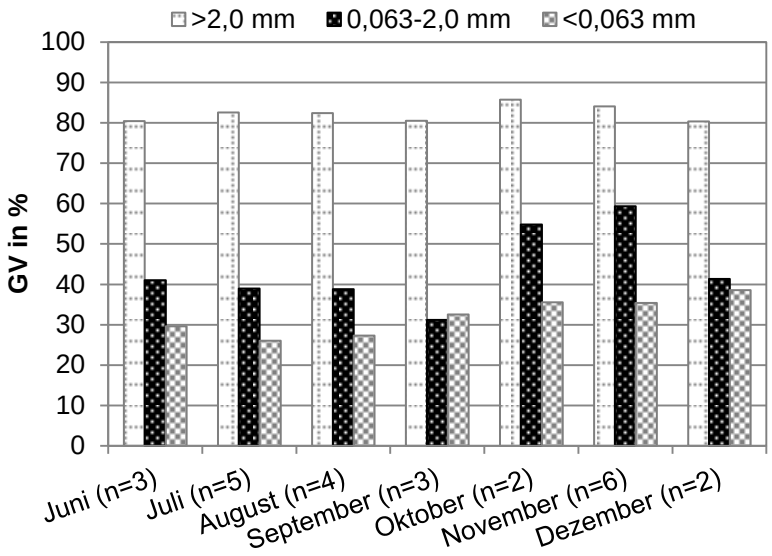


Abbildung 3.11: Mittlere Anteile des Glühverlustes im Versuchszeitraum

Im Trennsystem wurden 28 Regenereignisse beprobt, von denen 24 Datensätze im Zuge der Frachtbilanzierung ausgewertet wurden. Der Schrägklärer wurde mit Oberflächenbeschickungen von q_A = 1, 2, 3, 4 und 6 m/h betrieben. Ausgehend von den ereignisbezogenen Wirkungsgraden wurden Mediane für die jeweils eingestellte Oberflächenbeschickung gebildet und zur Ableitung der Wirksamkeitsfunktionen genutzt.

Abbildung 3.12 zeigt zwei Funktionen, zum einen die Funktion zur Sedimentationswirksamkeit der Anlage und eine weitere Funktion, welche die Speicher- und Sedimentationswirksamkeit der Anlage in der Summe betrachtet.

Der höchste Rückhalt wird erreicht, wenn Speicher- und Sedimentationswirkung in der Summe betrachtet werden. Für Feststoffe < 2,0 mm werden unter stationären Verhältnissen von q_A = 0,5 m/h Wirksamkeiten von 78 % erreicht. 69 % gehen auf die Sedimentationsleistung der Anlage zurück. Mit zunehmender Oberflächenbeschickung nimmt die Wirksamkeit ab. Durch das Speichervolumen reduziert sich die Wirksamkeit der Anlage auf einen Frachtrückhalt von 15 % bei q_A = 10 m/h. Unter diesen hydraulischen Bedingungen findet keine nennenswerte Sedimentationsleistung mehr statt. Nur noch grobe Partikel der Sandfraktion sedimentieren.

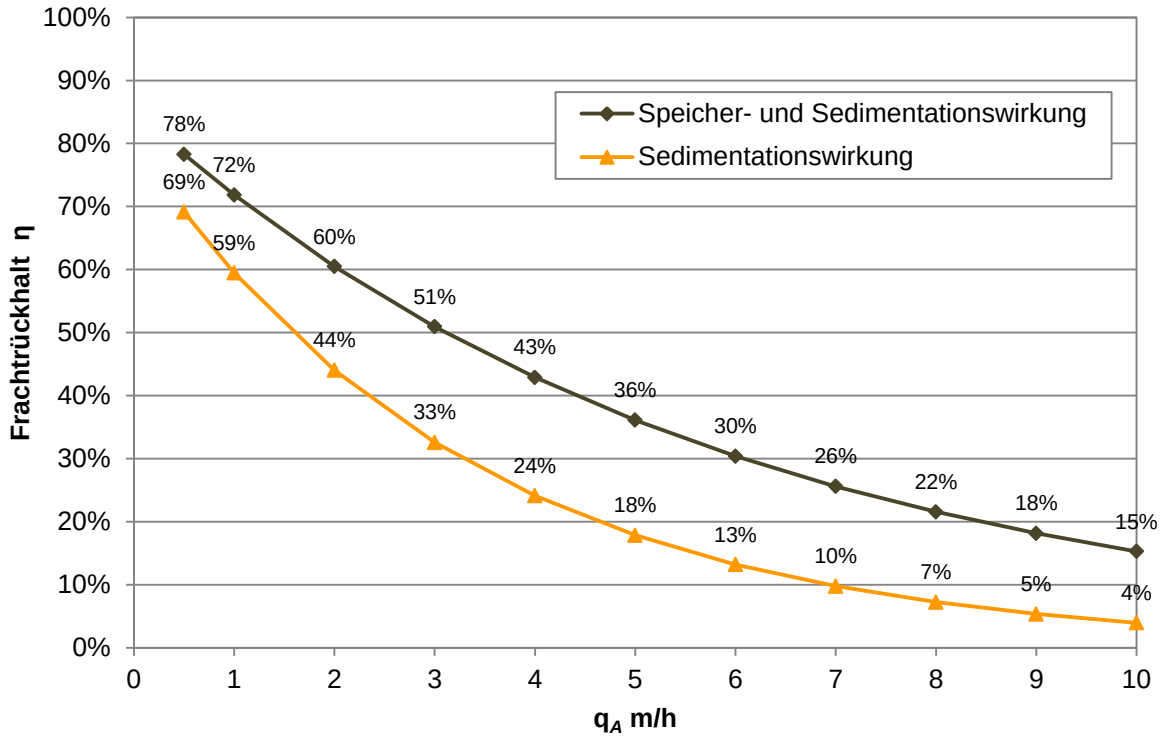


Abbildung 3.12: Feststoffrückhalt des Schrägklärers im Trennsystem für die Fraktion <2,0 mm im Trennsystem (Röhrenabscheider)

Abbildung 3.13 stellt in analoger Darstellungsweise den Frachtrückhalt für Partikel der Kornfraktion <0,063 mm dar.

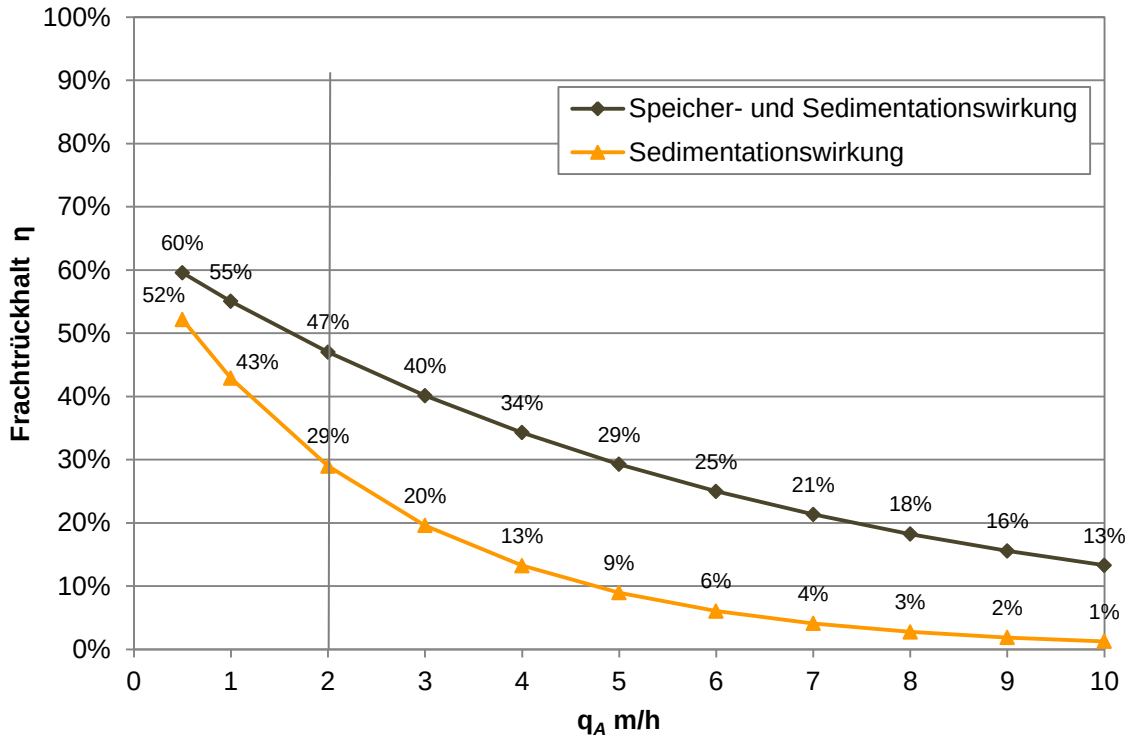


Abbildung 3.13: Feststoffrückhalt des Schrägklärers für die Fraktion <0,063 mm im Trennsystem

Die Funktion zur Speicher- und Sedimentationswirkung ergibt mit 60 % Frachtrückhalt bei q_A = 0,5 m/h eine um 18 % geringere Wirksamkeit gegenüber der Fracht mit Partikeln < 2,0 mm. Die Sedimentationsleistung beträgt bei gleichem q_A immerhin 52 %. In der Funktion zeigt sich eine starke Abnahme der Sedimentationsleistung auf 29 % bei q_A = 2 m/h, welche als Bemessungsoberflächenbeschickung für stationär betriebene Anlagen gilt.

Die Leistungsfähigkeit der Anlage nimmt bei weiter zunehmender Oberflächenbeschickung stark ab und beträgt bei q_A = 4 m/h noch 13 % in Bezug auf die Sedimentationsleistung und 34 % bei Betrachtung der Speicher- und Sedimentationswirkung insgesamt.

Es wurde überprüft, ob ein statistischer Zusammenhang zwischen der Wirksamkeit und der mittleren Zulaufkonzentration (<0,063 oder <2,0 mm) besteht. Abbildung 3.14 stellt die Daten der Zulaufkonzentration der Feinfraktion deren Wirksamkeit gegenüber. Für diesen Datenbestand als auch für die Zulaufkonzentration der Gesamtfraktion kann jedoch auch unter Ausklammern der Ausreißer kein statistischer Zusammenhang ermittelt werden. Aus der Grafik ist jedoch die Tendenz erkennbar, dass mit zunehmender Zulaufkonzentration die Wirksamkeit steigt.

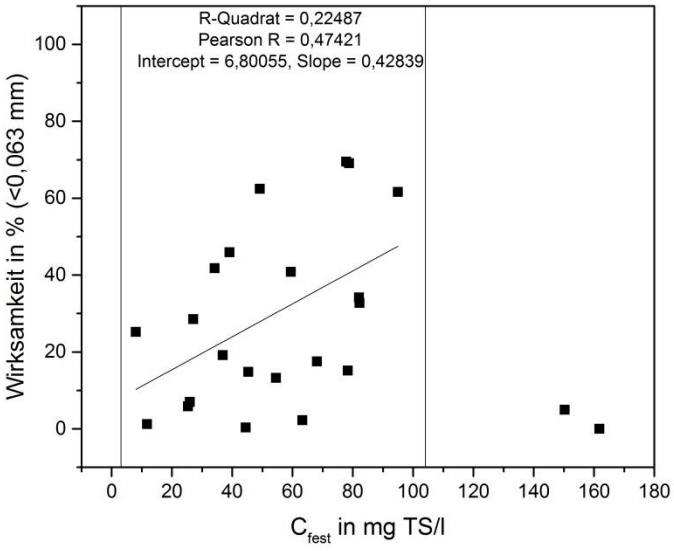


Abbildung 3.14: Zusammenhang zwischen der mittleren Zulaufkonzentration und der Wirksamkeit der Kornfraktion <0,063 mm

3.4 Zusammenführung der Ergebnisse zur Wirksamkeit im Misch- und Trennsystem

In Abbildung 3.15 werden die Funktionen der Sedimentationswirksamkeit des Schrägklärers für die Fraktion < 0,063 mm aus dem Misch- und Trennsystem gegenübergestellt. Die Funktionen zeigen, dass der auf Sedimentation beruhende Frachtrückhalt im Mischsystem um etwa 6 % höher ist als im Trennsystem.

Da aus den vergleichenden Untersuchungen der Platten- und Röhrenabscheider hervorgeht, dass der Röhrenabscheider etwas höhere Abscheideleistungen erzielt, ist der höhere Feinpartikelrückhalt im Mischsystem sehr wahrscheinlich auf die Zusammensetzung des Abwassers zurückzuführen. Die Partikeleigenschaften, Zulaufkonzentration oder die Flockungseigenschaften können mögliche Einflussfaktoren darstellen.

Eine mittlere Abweichung von 6 % wird vor dem Hintergrund der hohen Streuung der Wirksamkeiten der zugrundeliegenden Ergebnisse als relativ gering betrachtet. Es kann daher für das Misch- und Trennsystem der gleiche funktionale Zusammenhang zwischen Oberflächenbeschickung und Sedimentationswirksamkeit angenommen werden. Diese Annahme begründet sich auch aus der Tatsache, dass sich die genannten Eigenschaften sowohl im Misch- als auch im Trennsystem standortspezifisch und jahreszeitlich höchst variabel darstellen.

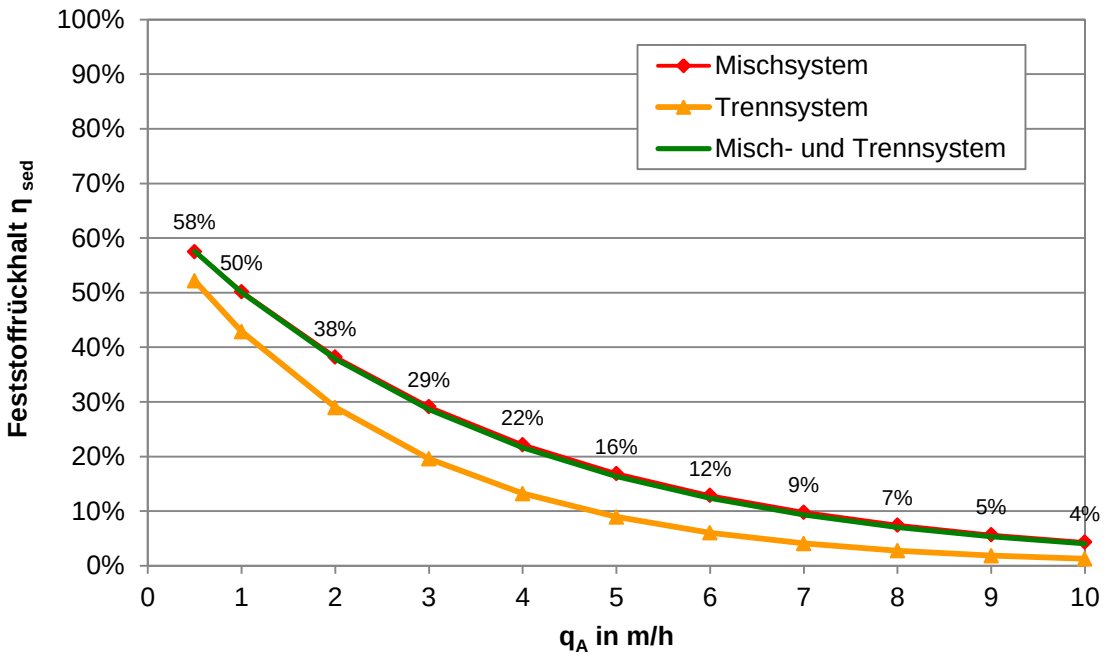


Abbildung 3.15: Sedimentationswirksamkeit für Partikel < 0,063 mm im Misch- und Trennsystem unter stationären Bedingungen

Zur Ermittlung einer einheitlichen Wirksamkeitskurve für Trennsystem und Mischsystem wurden 61 Eingangsdaten beider Systeme (40 MS und 21 TS) mit gleichen

Oberflächenbeschickungen zusammengeführt. Aus diesem Datensatz wurde eine Funktion zur Sedimentationswirksamkeit im Misch- und Trennsystem erstellt, da nur der erreichbare Sedimentationswirkungsgrad einen unmittelbaren Zusammenhang mit der Oberflächenbeschickung zeigt.

Die Funktion hat ein Bestimmtheitsmaß von $R^2 = 0,91$. In Abbildung 3.15 ist die Exponentialfunktion grün dargestellt [y=0,662e^(-0,280*x)]. Die bezifferten Sedimentationswirksamkeiten sind nahezu identisch mit den bereits angegebenen Sedimentationswirksamkeiten aus Abbildung 3.5. Lediglich bei Oberflächenbeschickungen von $q_A > 4$ m/h weichen die Sedimentationswirksamkeiten für die zusammengeführten Daten um 1 % von den Sedimentationswirksamkeiten der Fraktion <0,063 mm aus dem Mischsystem ab.

3.5 UV/VIS-Spektroskopie

3.5.1 **Kalibrierergebnisse und Ganglinien**

Der Ermittlung von Zu- und Ablaufkonzentrationen in Regenwasserbehandlungsanlagen wird ein hohes Interesse gewidmet. In diesem Vorhaben bilden sie die Grundlage für Fragestellungen, die sich mit der Bilanzierung von Frachten von Sedimentationsanlagen und der Wirksamkeit dieser Anlagen auseinandersetzen. In den Monitoring-Vorhaben des KIT an Regenbecken kommen in der Regel Feststoffsammler zum Einsatz, die als robuste Methode angesehen werden, um mittlere Konzentrationen und Frachten zu quantifizieren. Spektrometersonden haben gegenüber der Strategie mit Feststoffsammlern den Vorteil, dass diese in zeitlichen Abständen von wenigen Minuten die Qualität des Abflusses messen und damit über die gesamte Messdauer diskrete Messwerte zur Beurteilung der Abwasserqualität zur Verfügung stehen. Voraussetzung dafür, dass dieser Vorteil besteht, ist, dass die Sonden plausible Messwerte liefern. Die Messgenauigkeit der Sonden mit Fokus auf die Parameter AFS und CSB ist eine Fragestellung, der in diesem Vorhaben nachgegangen wird. Eine sich anschließende Frage ist, ob die hoch aufgelösten Daten eine Frachtbilanzierung ermöglichen, die präziser gegenüber der Strategie mittels Feststoffsammlern ist. Unterstützt wurden diese Arbeiten von Patricia Mayer im Rahmen ihrer Masterarbeit am Institut (Mayer, 2018).

Aus dem abgeschlossenen Vorhaben mit dem Titel „Analyse der Leistungsfähigkeit von Regenüberlaufbecken und Überwachung durch online Messtechnik“ standen UV/VIS-Spektrometersonden zur Verfügung. Für das Messprogramm in diesem Vorhaben wurde jeweils eine Sonde im Zu- und Ablauf der Anlage benötigt. Im Zulauf wurden zwei Sonden vergleichend getestet, die als „Sonde (1)“ und „Sonde (2)“ bezeichnet werden. Alle drei Sonden sind baulich und technisch identisch, aus demselben Baujahr und wurden zeitgleich beim Hersteller eingekauft. Bedingt durch die hohen Anforderungen hinsichtlich der Kalibrierung der Sonden wurden zwei Regressionsanalysen (OLS und PLS) sowie zwei Messreihen für die Kalibrierung durchgeführt (OLS_1, OLS_2, PLS_1, PLS_2) (siehe Kapitel 2.7.2).

Der Einsatzbereich im Misch- und Trennsystem erfordert jeweils eine lokale Kalibrierung der Sonden. Der Probenumfang für die Kalibrierung umfasste 16 Proben, die während der Regenereignisse vor Ort genommen wurden. Dies entspricht einem von Caradot et

al. (2015) empfohlenen Stichprobenumfang von 15 bis 20 Proben. Es wurden gute Kalibrierergebnisse erzielt, was durch die Validierungsmessungen nachgewiesen werden konnte. Die Verwendung der PLS- als auch der OLS-Methode als Regressionsanalyse ist geeignet, um valide Ergebnisse zu erzielen. Es konnte keine abschließende Empfehlung zur zu bevorzugenden Regressionsanalyse abgeleitet werden, da die Vorhersagequalität sich bei den Sonden und den beiden Messreihen zur Kalibrierung unterscheiden.

„Mit der OLS-Methode konnte für die Messreihe 2 des Parameters AFS ein mittlerer relativer Fehler von 25 bis 70 % je nach Sonde ermittelt werden, die PLS-Regression für die Messreihe 2 erreichte einen relativen Fehler zwischen 30 und 49 %. Die Kalibrierung des Parameters CSB ergab für die PLS-Regression der Messreihe 2 eine Fehlerspanne zwischen 6 und 9 %.

Die mittlere quadratische Abweichung (engl. root mean square error, RMSE) der AFS, liegt bei der Messreihe 2, kalibriert mit der OLS-Methode zwischen 12 und 30 mg/l. Mit der PLS-Regression ergibt sich für die Messreihe 2 ein Wertebereich von 16 bis 25 mg/l. Für den Parameter CSB liegt der RMSE zwischen 6 und 8 mg/l.

Das Bestimmtheitsmaß R^2 der Messreihe 2, liegt für den Parameter AFS, kalibriert mit der OLS-Methode, zwischen 0,34 und 0,50. Die PLS Regression der Messreihe 2 ergibt für AFS je nach Spektrometersonde ein R^2 zwischen 0,55 und 0,81. Für den Parameter CSB kann ein Bestimmtheitsmaß 0,93 bis 0,95 erreicht werden.

Zusammenfassend lässt sich sagen, dass die PLS-Regression für den Parameter CSB das geeignetste lokale Regressionsverfahren darstellt und dass sich diese nach einer vor Ort Kalibrierung vergleichsweise gut abbilden lässt. Für den Parameter AFS ergeben sich aus den durchgeführten Untersuchungen keine Hinweise welcher Regressionsansatz zu systematisch besseren Ergebnissen führt. Wenngleich festzuhalten ist, dass die lokalen Kalibrierungen (OLS- und PLS-Verfahren) immer zu deutlich besseren Ergebnissen führen als die ab Werk eingestellte globale Kalibrierung der Spektrometersonde“ (Mayer 2018), sind sowohl die Werte für die mittlere quadratische Abweichung als auch für das Bestimmtheitsmaß für den Parameter AFS unbefriedigend. Die Vorhersagekraft der Sonden insbesondere für Feststoffe erscheint daher begrenzt. Einige Bespiele aus gemessenen Niederschlagsereignissen können dies illustrieren.

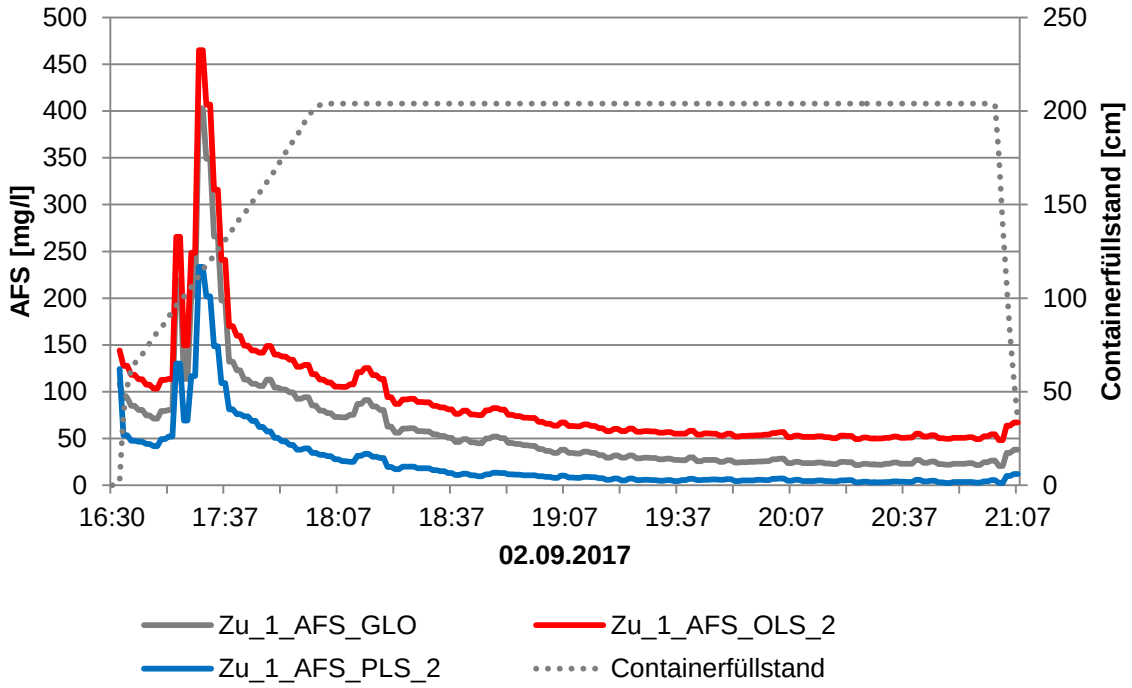


Abbildung 3.16: Niederschlagsereignis am 02.09.2017 – Zulauf Sonde (1) (Mayer 2018)

In Abbildung 3.16 ist die Ganglinie eines Regenereignisses vom 02.09.2017 abgebildet. Das Diagramm zeigt den Vergleich einer Messreihe mit globaler Kalibrierung (AFS_GLO) sowie der lokalen Kalibrierung bei der die OLS- und PLS-Regressionsanalysen angewandt wurden. Die AFS-Konzentration nimmt unmittelbar nach Beginn des Regenereignisses sprunghaft zu und die aus der globalen Kalibrierung resultierende Maximalkonzentration erreicht einen Wert von ca. 400 mg/l. Eine Umrechnung der Messreihe basierend auf der OLS-Regressionsfunktion führt zu leicht höheren AFS-Konzentrationen, deren Maximalwert ca. 465 mg/l beträgt. Die Kurve, die über die PLS-Funktion berechnet wurde, die in der Kalibrierung und Validierung die beste Vorhersagequalität gezeigt hat, würde eine rechnerische Maximalkonzentration von nur ca. 240 mg/l ergeben. Es wird deutlich, dass der Verlauf des Ereignisses unabhängig von der Kalibrierung vergleichsweise gut wiedergegeben wird, die Berechnung der Peak Konzentration aber mit sehr großen Unsicherheiten behaftet ist.

Abbildung 3.17 zeigt die Ganglinien der AFS Konzentrationen während eines Ereignisses am 15.09.2017. Auch bei diesem Ereignis wird der Verlauf der Konzentration unabhängig von der verwendeten Kalibrierung gut wiedergegeben. Bei diesem Ereignis wird der höchste Wert mit 228 mg/l nach der OLS Kalibrierung erreicht. Die globale Kalibrierung ergibt einen Maximalwert von nur 180 mg/l und die Sonde zeigt einen nicht plausiblen Konzentrationsabfall auf 0 mg/l. Die geringste AFS Konzentration wird mit nur 98 mg/l wiederrum durch die PLS kalibrierte Sonde berechnet.

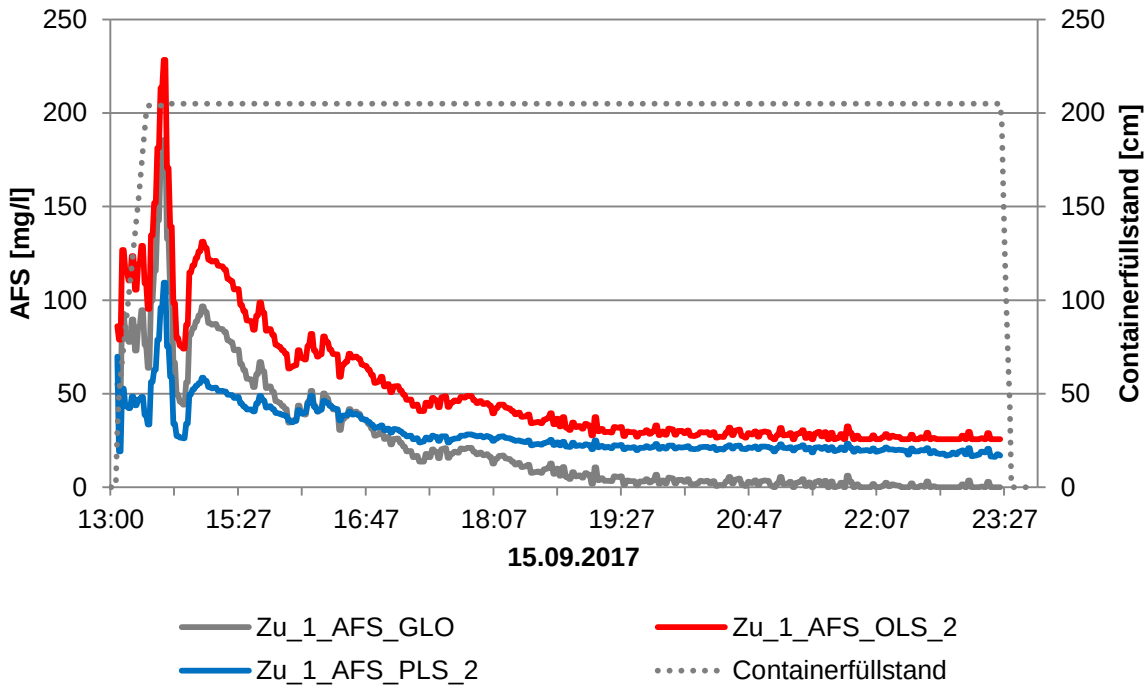


Abbildung 3.17: Niederschlagsereignis am 15.09.2017 – Zulauf Sonde (1) – Parameter AFS (Mayer 2018)

In Abbildung 3.18 führt das Regenereignis vom 12.07.2017 gegen 14:45 Uhr zu einer Beschickung des Schrägklärers. Gegen 17:00 Uhr wird an der Anlage ein Spülstoß detektiert, der durch außergewöhnlich hohe Feststoffkonzentrationen im Zulauf überrascht. Die maximalen Feststoffkonzentrationen bewegen sich in Abhängigkeit zu der verwendeten Regressionsanalyse zwischen 1.650 und 3.230 mg/l. Wie bei den zuvor dargestellten Ereignissen ist die mit der OLS-Regression ermittelte maximale Feststoffkonzentration etwa um den Faktor 2 höher als die über das PLS- Verfahren ermittelte Konzentration. Im weiteren Verlauf des Regenereignisses reduzieren sich die Feststoffkonzentrationen auf einen Bereich zwischen 50-70 mg/l, jedoch wird die Ganglinie zum Ende des Ereignisses auf diesem Niveau des Öfteren durch kurze Konzentrationspeaks unterbrochen. Für die Parameter AFS und CSB sind weitere Ergebnisse zu Ganglinien und Wasserproben im Anhang 6.5 dargestellt. Es zeigt sich in der Summe nur eine mäßig gute Übereinstimmung, tendenziell am besten mit der PLS-Regression.

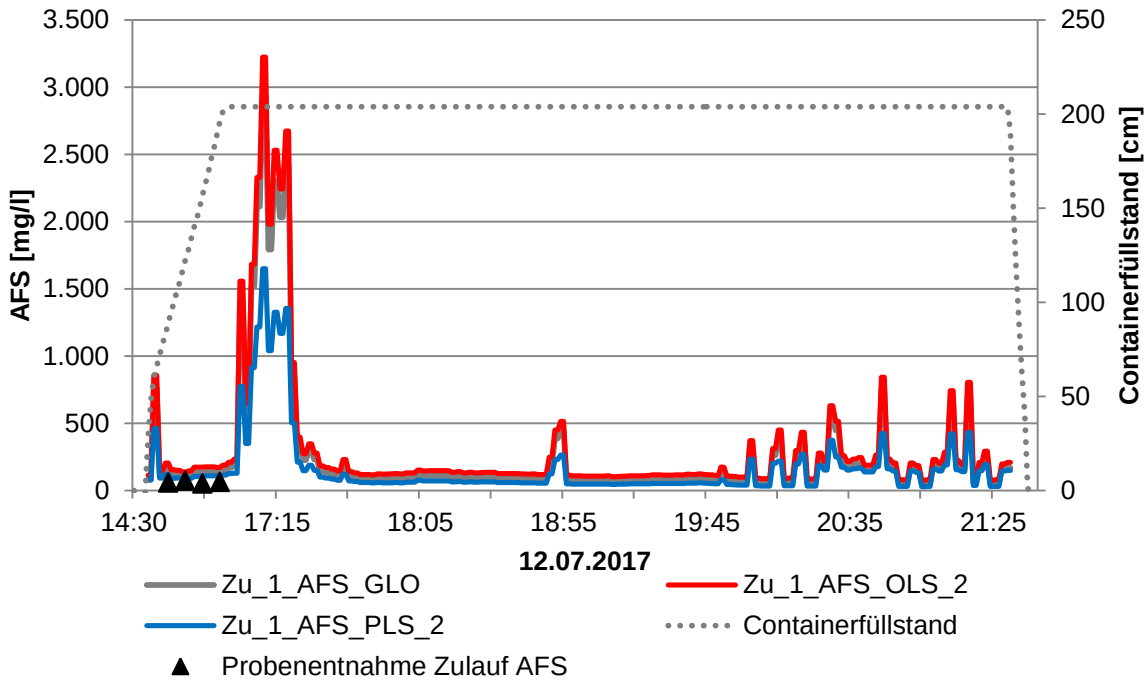


Abbildung 3.18: Niederschlagsereignis am 12.07.2017 – Zulauf Sonde (1) (Mayer 2018)

Abbildung 3.19 beinhaltet die Ganglinie der CSB-Konzentration eines Regenereignisses am 20.07.2017. Die Ganglinie der globalen Kalibrierung (AFS_GLO) gibt zu Beginn der Messreihe Messwerte von ca. 1000 mg/l wieder, die auf etwa 250 mg/l abnehmen und bis zum Ende des Regenereignisses relativ konstant verlaufen. Die lokale Kalibrierung mittels PLS zeigt eine Ganglinie mit einer nachweislich deutlich höheren Qualität. Die Ganglinie PLS_1 und PLS_2 bezieht sich auf die auf unterschiedliche Weise genommenen Kalibrierproben (siehe 2.7.2). In diesem Fall schneidet die PLS_1 Ganglinie die laboranalytischen Messungen. Es wird somit deutlich, dass die lokale Kalibrierung eine hohe Vorhersagequalität für die CSB-Konzentrationen aufweist. Weitere ausgewertete Messungen sind dem Anhang (Kapitel 6.5) zu entnehmen.

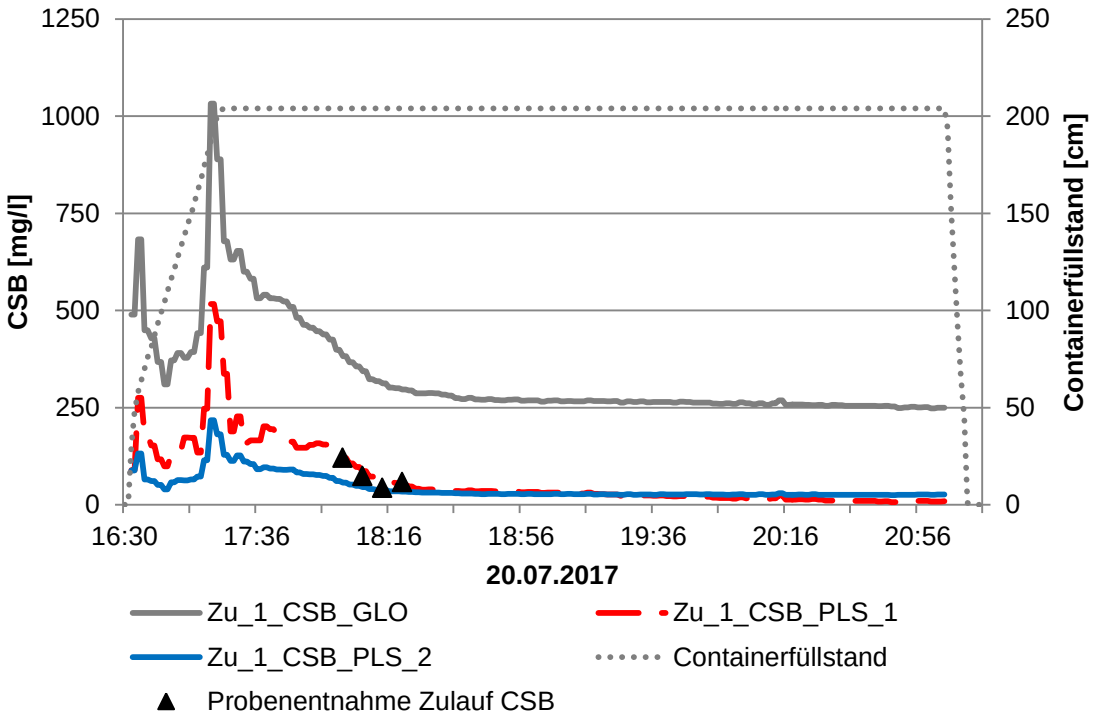


Abbildung 3.19: Niederschlagsereignis am 20.07.2017 – Zulauf Sonde (1) Parameter CSB (Mayer 2018)

Abschließend ist festzuhalten, dass die verwendeten Sonden unabhängig von den analysierten Parametern und der verwendeten Regression den relativen Konzentrationsverlauf realitätsnah abbilden. Die Ableitung von stoffbezogenen Konzentrationen ist jedoch mit großen Unsicherheiten verbunden. Eine lokale Kalibrierung führt in allen Fällen zu besseren und reproduzierbaren Ergebnissen. Sie reduziert allerdings nicht die bestehenden Unsicherheiten bei der Konzentrationsbestimmung. Die Nutzung der Daten im Rahmen einer Frachtberechnung ist daher nach den vorliegenden Ergebnissen nicht möglich, wie der nachfolgende Abschnitt zeigt.

3.5.2 **Frachtbilanzierung**

Es gibt unterschiedliche Veranlassungen sich mit den Spektrometersonden zu beschäftigen. Eine Intention war es in diesem Vorhaben zu prüfen, ob mit ihnen valide Langzeitmessungen durchgeführt werden können. Eine weitere zentrale Fragestellung liegt darin zu beurteilen, ob mit Hilfe der Sonden eine Bilanzierung der Feststofffracht möglich ist und wie diese Messtechnik im Vergleich zu den Untersuchungen mit der Feststoffsammler-Strategie zu beurteilen ist. Im Folgenden werden hierzu mehrere ausgewertete Regenereignisse vorgestellt und diskutiert.

Abbildung 3.20 stellt ein Ereignis vom 21.07.2017 dar. Der Schrägklärer wird zwischen 19:50 Uhr und 02:30 Uhr über eine Pumpe mit einem stationären Durchfluss beschickt. Die in Rot dargestellte Kurve gibt die Zulauffracht in Gramm über die Dauer des Regenereignisses wieder. Wie bereits im Abschnitt 3.5.1 beschrieben handelt es sich um einen typischen Verlauf mit einem Maximum zu Beginn und einer kontinuierlich abnehmenden Konzentration zum Ende des Ereignisses. Die kumulierte Fracht wird in der orangenen Kurve dargestellt. Nach Vollfüllung der Sedimentationsanlage erfolgt eine Entlastung. In diesem Diagramm wird der Ablauf als dunkelblaue Kurve dargestellt. Die kumulierte Masse ist in Hellblau abgebildet worden.

Der Schrägklärer wird volumenproportional wie in Abschnitt 2.6.1 beschrieben mit der Feststoffsammler-Strategie beprobt. Nach einem Durchflussvolumen von 4 m³ wird jeweils eine Teilprobe über 40 Sekunden in den Behälter gefördert. Die Anzahl der Teilproben ist durch das Volumen des Behälters limitiert und gegen 00:25 Uhr ist der Behälter vollgefüllt (schwarze vertikale Linie) und der Füllstandssensor stoppt die Probenahme.

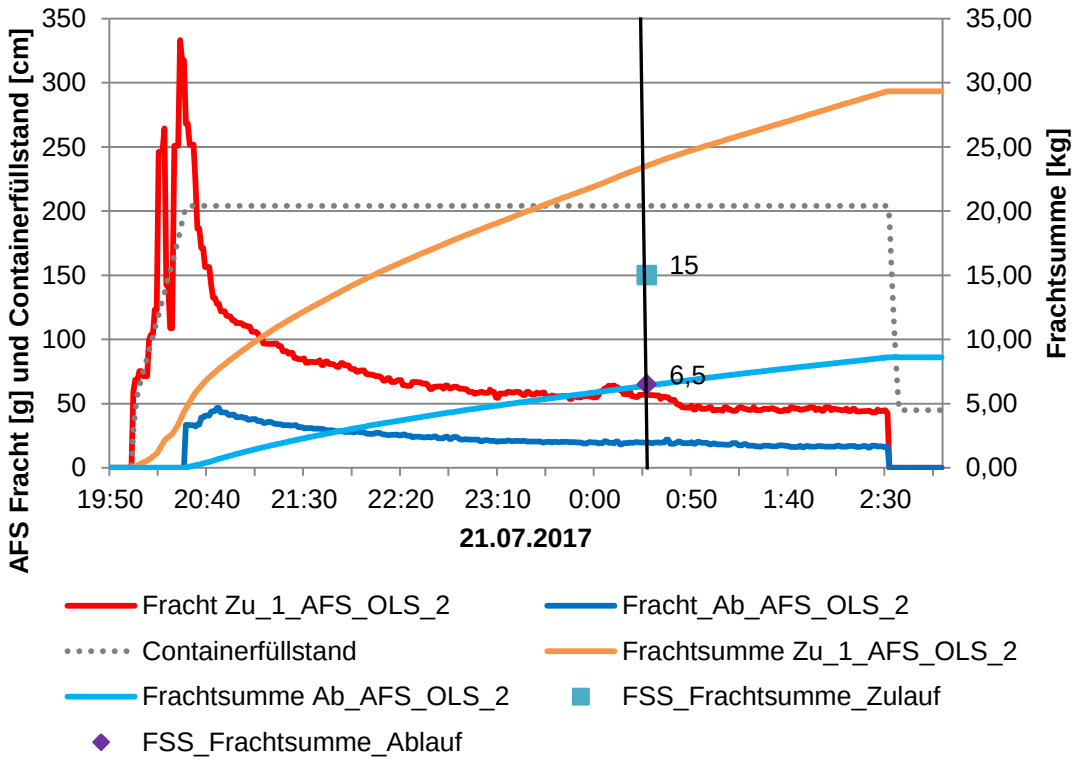


Abbildung 3.20: Frachtbilanz des Niederschlagsereignisses am 21.07.2017 – Sonde *Zu 1* und *Ab* – AFS, OLS-Methode – q_A = 2 m/h (Mayer 2018)

In der Beprobung wurde mittels Feststoffsammler kumulativ eine Zulauffracht von 15 kg und eine Ablauffracht von 6,5 kg erfasst. Unter Bezug auf den Zeitraum, der mittels Feststoffsammlern beprobt wurde, und unter Anwendung der OLS-Regressionsanalyse wurde mittels Spektrometersonde im Zulauf eine Fracht von 23,5 kg und im Ablauf eine Fracht von 6,5 kg ermittelt. Die Ablauffracht wird von beiden Methoden übereinstimmend quantifiziert, jedoch weichen die Zulauffrachten der Sonde und des Feststoffsammlers um 8,5 kg voneinander ab.

In Abbildung 3.21 sind die Daten des gleichen Ereignisses mit dem PLS-Ansatz ausgewertet. Die Feststoffsammlerfracht bleibt selbstverständlich gleich bei 15 kg im Zulauf bzw. 6,5 kg im Ablauf. Die nach der PLS-Regression ermittelten Frachten sind im Zulauf deutlich (10 kg) und Ablauf geringfügig (5,6 kg) kleiner als die der Feststoffsammler.

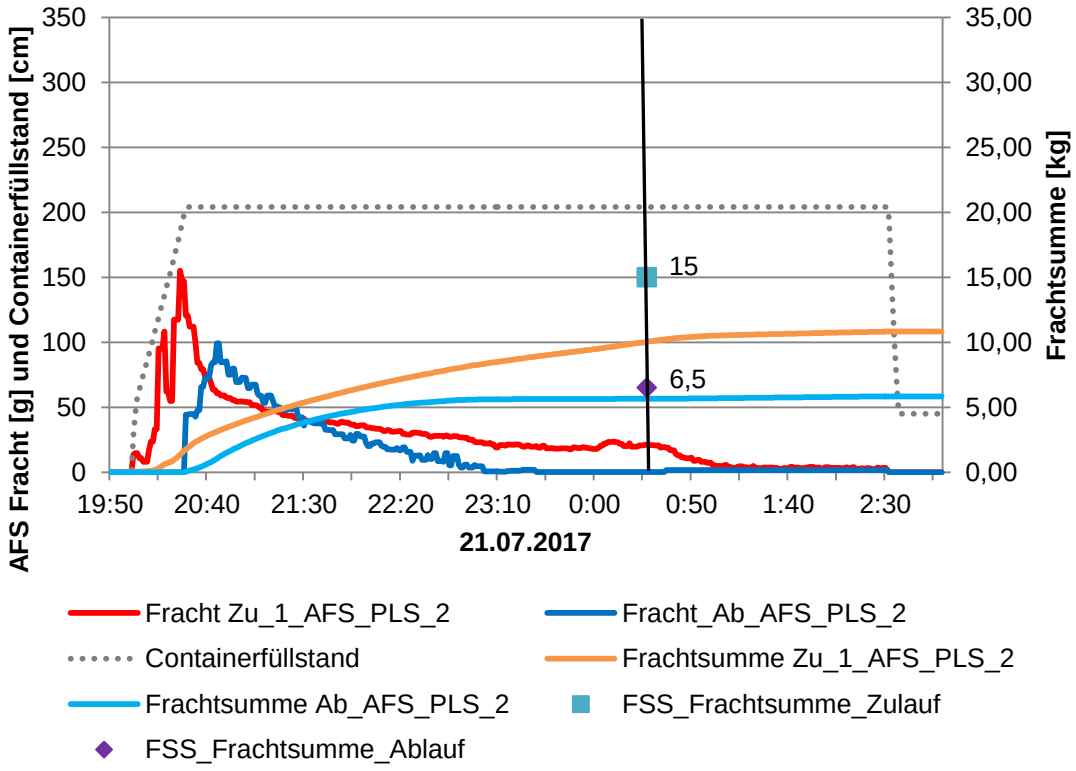


Abbildung 3.21: Frachtbilanz des Niederschlagsereignisses am 21.07.2017 – Sonde *Zu 1* und *Ab* – AFS, PLS Methode – q_A = 2 m/h (Mayer 2018)

Der Effekt der verschiedenen Regressionsansätze ist in vergleichbarer Weise bei weiteren Ereignissen erkennbar. Im Zulauf resultieren aus der OLS-Regression im Vergleich zum Feststoffsammler deutlich höhere und aus der PLS Regression geringere Frachten. In den Ablaufproben bei einem insgesamt niedrigeren Konzentrationsniveau sind die Unterschiede dagegen vergleichsweise gering. Allerdings lässt sich aus diesen Befunden kein genereller, konzentrationsabhängiger Trend ableiten. In Tabelle 3.1 sind die aus der Feststoffsammlerbeprobung ermittelten Zu- und Ablauffrachten den rechnerischen Frachten der Spektrometersondenmessungen nach Anwendung der Regressionsmodelle gegenüber gestellt. Die beiden letzten Spalten von Tabelle 3.1 zeigen jeweils das Verhältnis zwischen Feststoffsammlerfracht und rechnerischer Fracht

nach Anwendung des OLS- bzw. des PLS-Regressionsmodells. Die Daten sind nach aufsteigender Zu- bzw. Ablauffracht im Feststoffsammler sortiert.

Tabelle 3.1: Vergleich der Frachten aus den Feststoffsammlern und nach Auswertung der Sondendaten mit OLS- und PLS-Regression

	Datum	FFS B_{zu} [kg]	OLS B_{zu} [kg]	PLS B_{zu} [kg]	OLS/FFS	PLS/FFS
Zulauf	11.11.2017	0,6	14	18,7	23,33	31,17
	21.10.2017	3,9	17,2	6,2	4,41	1,59
	02.09.2017	4,4	7,2	2	1,64	0,45
	05.10.2017	4,5	8,6	7	1,91	1,56
	21.07.2017	15	23,5	10	1,57	0,67
	24.07.2017	19,6	29,6	15,1	1,51	0,77
		FFS B_{ab} [kg]	OLS B_{ab} [kg]	PLS B_{ab} [kg]	OLS/FFS	PLS/FFS
Ablauf	11.11.2017	0,5	8,1	13,8	16,20	27,60
	02.09.2017	1,7	2,1	1	1,24	0,59
	05.10.2017	2,4	5,2	10,8	2,17	4,50
	21.10.2017	3,7	10,4	7,6	2,81	2,05
	24.07.2017	4,5	29,2	118	6,49	26,22
	21.07.2017	6,5	6,4	5,7	0,98	0,88

Die Daten in Tabelle 3.1 zeigen, dass die ermittelten Frachten teilweise erheblich voneinander abweichen. Dies ist nicht per se ein Problem. Im gegebenen Fall ist aber weder in Bezug auf das verwendete Regressionsmodell noch in Bezug auf die detektierten Konzentrationen ein systematischer Zusammenhang erkennbar. Dies wäre aber die Voraussetzung für eine realitätsnahe Anpassung der Kalibrierparameter und die Auswahl eines geeigneten Regressionsansatzes. Auf Basis der in diesem Vorhaben gewonnenen Daten war beides für den Parameter Feststoff nicht möglich.

3.6 Vergleich der Methoden Feststoffsammler und UV/VIS-Sonden

3.6.1 **Feststoffsammler (FSS)**

- Die mit Feststoffsammlern ermittelten Konzentrationen sind deutlich realitätsnäher und zuverlässiger als die von den Spektrometersonden abgeleiteten Werte.
- Bei der Ermittlung von Frachten ist zu berücksichtigen, dass das Volumen der FS begrenzt ist und damit nicht alle Ereignisse über ihre gesamte Dauer/ihr gesamtes Volumen beprobt werden können. Über die Variation von Pumpintervall und -dauer können aber charakteristische Ereignistypen gezielt erfasst werden.
- Bedingt durch die Probenahme in Intervallen können vor allem kurzzeitige Konzentrationspeaks nicht ideal erfasst werden, was zur Unsicherheiten bei der Frachtermittlung führen kann. Parallel verlaufende Messungen mittels Sonden helfen die potentiellen Fehler zu kompensieren.
- FSS ermöglichen aufgrund der vergleichsweise hohen Menge an Probenmaterial eine sichere und differenzierte Analyse von Feststoffen (Korngrößenverteilung, Glühverlust, Schadstoffbeladung usw.)
- Der Gehalt an mikrobiologisch leicht abbaubaren Substanzen (z.B. CSB, NH_4) kann sich durch Abbauprozesse innerhalb weniger Stunden verändern. Da FSS immer nach einer möglichst vollständigen Sedimentation der Feststoffe beprobt werden, ist mit Minderbefunden für diese Stoffe zu rechnen. Eine unmittelbar nach Ereignissende genommene homogenisierte Probe aus dem eingestauten Behälter löst/reduziert dieses Problem.

3.6.2 **Spektrometersonde**

- Spektrometersonden weisen auch nach lokaler Kalibrierung einen höheren Fehler gegenüber einer laboranalytischen Bestimmung auf.
- Die aufgezeichneten Ganglinien für den Parameter AFS und CSB ermöglichen zeitlich hochaufgelöste und damit detaillierte Einblicke in den Belastungsverlauf des Abwassers.
- Nach lokaler Kalibrierung und bei entsprechender Wartung tragen die Sonden zu einem besseren Verständnis der Prozesse bei. Die erzeugten Daten haben nach den vorliegenden Erfahrungen aber immer qualitativen Charakter.
- Eine Quantifizierung von Frachten und Wirksamkeit auf der Basis von aus Sondenmessungen abgeleiteten Konzentrationen erscheint insbesondere für Feststoffe nicht möglich.
- Für alle Parameter, die einem schnellen Abbau unterliegen und/oder durch Wechselwirkung mit Probenahme- und Laborgeräten eine systematische Veränderung erfahren, weisen Sondenmessungen unübersehbare Vorteile auf. Voraussetzung ist, dass sie so kalibriert werden können, dass sie reproduzierbar realitätsnahe Ergebnisse liefern. Trotz großer Bemühungen ist dies in diesen Vorhaben nicht gelungen.
- Die Sonden können in qualitativer Form nur Daten zu den gesamten Feststoffen(AFS) liefern. Eine Differenzierung zwischen einer groben und feinen Fraktion ist nicht möglich.

- Eine zunehmende Heterogenität, ein hoher Grobstoffanteil und hohe Organikanteile erhöhen die Unsicherheiten der Sondenmessungen zusätzlich. Die Anwendung im Mischsystem ist daher mit vertretbarem Aufwand in vielen Fällen nicht möglich.

Beide Methoden Feststoffsammler und Spektrometersonden haben einen Einsatzbereich, der bei den Feststoffsammlern eindeutig auf Bereitstellung robuster Datengrundlagen für Bilanzierungszwecke liegt. Das Probenahmekonzept beruht auf einer großvolumigen Mischprobe, die möglichst das gesamte Ereignis erfasst. Konzentrationsschwankungen oder auch gewässerrelevante Konzentrationsspitzen können per Definition nicht erkannt werden. Für alle Stoffe, bei denen die Frachtreduzierung das vordergründige Ziel des Gewässerschutzes ist, sind Feststoffsammler ein universell einsetzbarer und zuverlässiger Ansatz.

Messsonden ergänzen die Befunde aus einer Mischprobennahmestrategie in Form von zeitlich hochaufgelösten und nicht begrenzten Informationen. Trotz großer Bemühungen ist es in diesem Vorhaben, wie auch in vorangegangen Untersuchungen nicht gelungen, quantitative Daten zu erzeugen, die mit den Frachtberechnungen auf Basis von Feststoffsammlerproben vergleichbar sind. Da keine systematischen Zusammenhänge zu einzelne Einflussgrößen, wie z.B. zum Konzentrationsniveau ermittelt werden konnten, sind die Sondenmessungen weder für Frachtbetrachtungen noch für Wirksamkeitsanalysen nutzbar.

4 Bemessungs- und Konstruktionsempfehlungen für Schrägklärer im Misch- und Trennsystem

4.1 Vorbemerkungen

Die nachfolgend aufgeführten Bemessungs- und Konstruktionsempfehlungen ergeben sich aus der Zusammenführung der verschiedenen von den Ländern Nordrhein-Westfalen und Baden-Württemberg geförderten Untersuchungen von Schrägklärern. Sie umfassen den in unterschiedlichen Maßstäben und Untersuchungsansätzen gewonnenen Kenntnisstand und werden in Baden-Württemberg gleichlautend in einer Handlungsempfehlung veröffentlicht.

4.2 Bemessungsempfehlungen

Die Bemessung von Schrägklärern basiert, wie die von Anlagen ohne Einbauten, auf der Begrenzung der maximalen Oberflächenbeschickung. Für einen im Standardfall anzusetzenden Abfluss aus einer zu behandelnden kritischen Regenspende r_{krit} = 15 l/(s·ha) wird nach folgender Gleichung die erforderliche Absetzfläche ermittelt.

$$q_{A,max} = \frac{Q_{zu}}{A_{eff}}$$

mit:

$q_{a,max}$ = Bemessungsoberflächenbeschickung in m/h

Q_{zu} = Bemessungszufluss zur Sedimentation in m^3/h

A_{eff} = effektive Absetzflächen in m^2

Für Platten- und Röhrenabscheider wird die effektive Absetzfäche aus der Grundfläche des Beckens nach folgenden Gleichungen berechnet.

a) Plattenabscheider

$$A_{eff} = L \cdot B \cdot \cos\alpha \cdot n_{Platten}$$

b) Röhrenabscheider

$$A_{eff} = L \cdot d \cdot \cos\alpha \cdot n_{Röhren}$$

mit:

L = Länge der Platten /Röhre in m

B = Breite der Platten in m

$cos\ \alpha$ = Cosinus des Neigungswinkels α = 60°

d = Durchmesser der Röhren in m

Bei Anlagen mit niederschlagsbedingter Belastung dient die Begrenzung der maximalen Oberflächenbeschickung dazu Remobilisierungseffekte und damit verbundene negative Wirkungsgrade zu vermeiden. Der Sedimentationswirkungsgrad wird hier vor allem durch die Vielzahl von Kleinereignissen positiv beeinflusst und ist folgerichtig bei der gleichen Oberflächenbeschickung höher als bei stationärem Betrieb. Der aus Großanlagenuntersuchungen abgeleitete Wert liegt bei einer Bemessungsoberflächenbeschickung von $q_A \leq 4$ m/h. Der im Großanlagenbetrieb unter

in-stationären Bedingungen erreichbare Sedimentationswirkungsgrad liegt dann bei 45 % bis 50 %.

Bei Anlagen mit konstanter Belastung, die in der Regel über Pumpen erfolgt, wird der Sedimentationswirkungsgrad der Anlage unmittelbar durch den Bemessungswert festgelegt. Ein Anwendungsbereich für diese Betriebsform besteht beispielsweise bei großvolumigen Speichern, deren Inhalt mit einem kleinen Volumenstrom über einen Schrägklärer entleert und behandelt wird. Die Anlage wird in diesem Fall mit einem konstanten (geringen) Volumenstrom beschickt und die Oberflächenbeschickung bestimmt damit unmittelbar den erreichbaren Sedimentationswirkungsgrad. Um einen mit niederschlagsabhängig beschickten Anlagen vergleichbaren Wirkungsgrad zu erreichen liegt der empfohlene Wert für diese Anlagen bei einer Bemessungsoberflächenbeschickung von $q_A \leq 1$ m/h (s. Abbildung 3.15).

Damit eine möglichst hohe klärtechnische Wirksamkeit der Schrägklärer erreicht wird, sind die nachfolgenden Konstruktionsempfehlungen zu berücksichtigen.

4.3 Konstruktionsempfehlungen für den Neubau

4.3.1 **Geometrie**

Um eine vollständige Durchströmung der Anlage zu unterstützen, wird empfohlen das Verhältnis von Länge zu Breite im Neubau von Schrägklärern nicht wie bei klassischen Regenbecken zur Sedimentation mit L/B > 3 zu planen. Dies führt zu schmalen langen Geometrien, die bei Schrägklärern zulauffern Stagnationsbereiche hervorrufen können.

Schrägklärer müssen über eine Wassertiefe von mindestens 1,90 m verfügen. Sie ergibt sich aus den folgenden Randbedingungen:

- Klarwasserzone über den Schrägklärerelementen von 0,20 m bis 0,40 m,
- Bauhöhe der Schrägklärerelemente von ca. 0,90 m (Länge Lamelle/Röhre = 1,00 m) und
- Abstand zwischen der Bauwerkssohle und der Unterkante der Schrägklärerelemente von ≥ 0,80 m.

Zusätzlicher Spielraum für die zuvor genannten Komponenten kann eingeplant werden. Basierend auf den durchgeführten Sensitivitätsuntersuchungen zu der Bauwerkshöhe ist jedoch festzuhalten, dass bei deutlicher Vergrößerung der Tiefe unter den Schrägklärerelementen aus hydraulischer Sicht keine Verbesserung gegenüber der Mindesttiefe zu erwarten ist. Zudem ist darauf hinzuweisen, dass die größere Tiefe zu deutlichen Kostensteigerungen beim Bau führen kann. Auch die Behandlung des zusätzlichen Speichervolumens auf der Kläranlage erzeugt zusätzliche Kosten.

4.3.2 **Drosselung des Anlagendurchsatzes**

Im Unterschied zu klassischen Regenbecken muss Q_0 bei Schrägklärern nicht in die Anlage geleitet werden. Die Drosselung des Zuflusses erfolgt vor der Anlage. Es muss gewährleistet werden, dass der Bemessungszufluss jederzeit in die Anlage gelangt. Eine Trennschärfe des Drosselorgans von mindestens 1,2 ist einzuhalten. Die Funktion des Drosselorgans ist in jährlichem Turnus zu überprüfen.

4.3.3 **Einlauf- und Verteilungsbauwerk**

Die Gestaltung des Einlauf- und Verteilungsbauwerks einer Sedimentationsanlage nimmt wesentlich Einfluss auf das Strömungsverhalten und damit auf die Sedimentationswirksamkeit der Anlage.

Jede Sedimentationsanlage benötigt daher zulaufseitig ein funktionales Einlauf- und Verteilungsbauwerk, das eine möglichst effektive Energiedissipation und optimale Strömungsverteilung gewährleistet. Hydraulische Untersuchungen im physikalischen Modell haben gezeigt, dass günstige Strömungsbedingungen durch:

- eine hohe Einlaufschwelle,
- eine Einlaufwand mit Prallwand und Palisaden sowie
- eine Einlaufwand mit horizontalem Einlaufschlitz erreicht werden können.

Die empfohlenen Einlauf- und Verteilungsbauwerke weisen aufgrund ihrer konstruktiven Gestaltung unterschiedliche Strömungscharakteristiken bzw. Strömungsphänomene auf. Sie führen jedoch alle zu einem hydraulisch günstigen Strömungsverhalten und erfüllen die Grundanforderungen an die Energiedissipation und Strömungsverteilung. Sie stellen für die Praxis nahezu gleichwertige und robuste Lösungsvarianten dar, wobei die erreichbare hydraulische Optimierung von der Einlaufschwelle zur geschlitzten Einlaufwand leicht zunimmt.

4.3.3.1 Hohe Einlaufschwelle [3]

Die Anordnung einer hohen Einlaufschwelle ist in Abbildung 4.1 schematisch dargestellt.

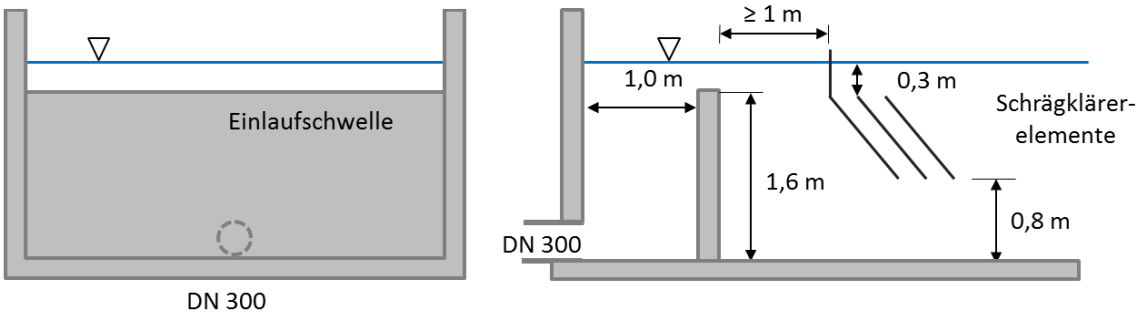


Abbildung 4.1: Schematische Darstellung eines Einlauf- und Verteilungsbauwerks mit hoher Einlaufschwelle

Als Abstand zwischen dem einmündenden Kanal und der Einlaufschwelle wird 1 m empfohlen. Die Einlaufschwelle ist mit einer Höhe von ≥ 1,60 m auszuführen und sollte einen horizontalen Abstand von ≥ 1 m zur Oberkante der Schrägklärerelementen haben.

[3] Überfall im Sinne DWA A 166 (2013)

4.3.3.2 Einlaufwand mit Prallwand mit Palisaden[4]

Eine weitere konstruktive Lösung bietet eine Einlaufwand mit Prallwand mit seitlichen Palisaden (Abbildung 4.2).

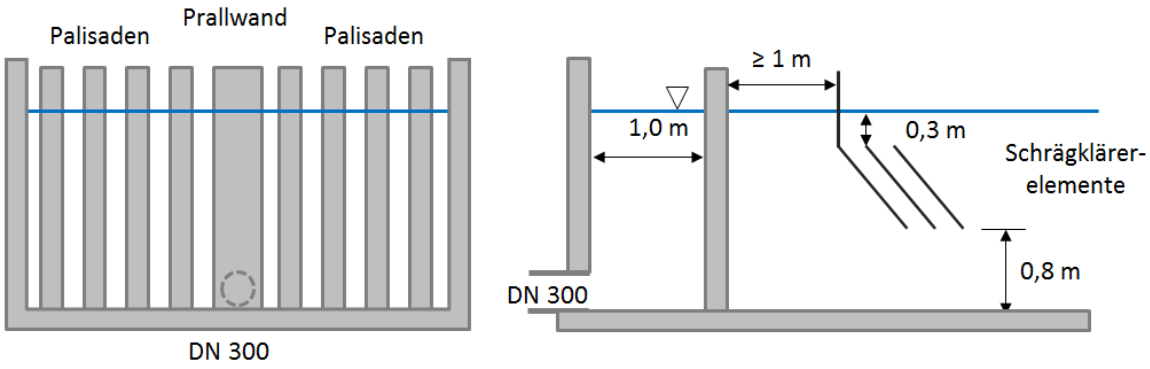


Abbildung 4.2: Schematische Darstellung eines Einlauf- und Verteilungsbauwerks als Einlaufwand mit Prallwand und seitlichen Palisaden

Die Prallwand ist wie die Schwelle mit einem Abstand von 1 m zum Zulaufkanal zu planen und in der Breite so zu bemessen, dass der Wasserstrahl unter Berücksichtigung eines Ausbreitungswinkels von 5° vollflächig auf die Prallwand auftritt. Im gegebenen Beispiel mit einer Zulaufleitung DN 300 würde dies bei einem Abstand von 1 m eine Prallwandbreite von ca. 0,50 m ergeben. Eine hohe Anzahl von schmalen Palisaden, die beidseitig der mittigen Prallwand angeordnet werden, führt zu günstigeren Strömungsbedingungen als eine geringe Anzahl breiter Palisaden. Es wird empfohlen die Palisaden und deren Abstände untereinander mit einer Breite von etwa 0,25 m bis 0,30 m auszuführen.

4.3.3.3 Einlaufwand mit horizontalem Einlaufschlitz

Eine Einlaufwand mit horizontalem Einlaufschlitz ist ein weiteres Einlauf- und Verteilungsbauwerk, das für Schrägklärern empfohlen wird (Abbildung 4.3).

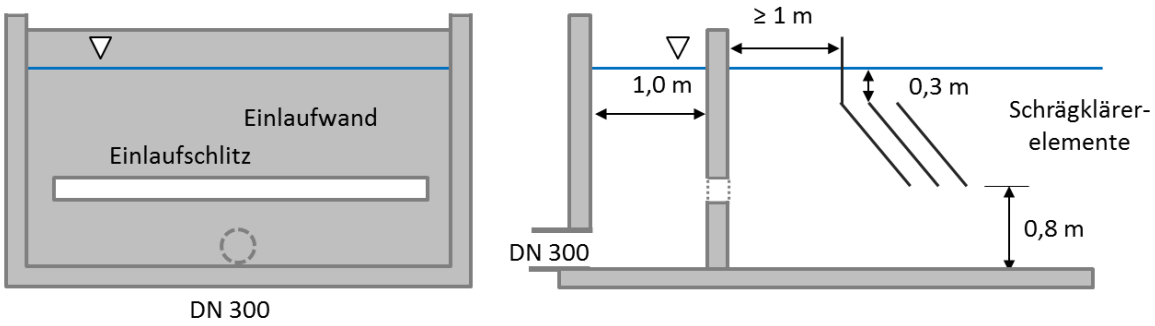


Abbildung 4.3: Schematische Darstellung eines Einlauf- und Verteilungsbauwerks mit Einlaufwand und horizontalem Einlaufschlitz

Der Einlaufschlitz ist auf Höhe der Unterkante der Schrägklärerelemente Sedimentationskörpers anzuordnen, um günstige Strömungsbedingungen zu erreichen. Eine höhere oder tiefere Anordnung führt zur Wirbelbildung oder zu einer zu hohen

[4] Vergleichbar mit Lamellenwand im Sinne DWA A 166 (2013)

hydraulischen Belastung der Beckensohle. Die Schlitzbreite sollte 90 % der Breite des Schrägklärers betragen und die Öffnung sollte mittig nicht unterbrochen werden.

Die Schlitzweite ist so zu wählen, dass der Bemessungszufluss ungehindert in das Bauwerk einströmen kann.

4.3.4 **Abstand Einlauf- und Verteilungsbauwerk zum Schrägklärer**

Der Abstand zwischen dem Einlauf- und Verteilungsbauwerk und den Schrägklärerelementen sollte beim vollständigen Ausbau der Sedimentationskammer mindestens 1 m zur Oberkante des ersten Schrägklärerelements betragen. Wird nur ein partieller Ausbau geplant, sind die Schrägklärerelemente grundsätzlich am Ende des Bauwerks anzuordnen. Um eine Durchströmung der Schrägklärerelemente zu bewirken, müssen sie durch eine Trennwand von der offenen Wasserfläche im Zulaufbereich abgetrennt werden (Abbildung 4.4)

4.3.5 **Ausrichtung der Schrägklärerelemente**

Die Strömungsverhältnisse in Schrägklärern sind ein Resultat aus der konstruktiven Gestaltung der Bauwerkselemente sowie komplexen hydraulischen Wechselwirkungen.

Es wird empfohlen die Schrägklärerelemente entgegen dem Zulauf auszurichten (Abbildung 4.4). In dieser Konfiguration kann die Ausbildung von Turbulenzen in Form von rotierenden Walzen hinter dem Verteilungsbauwerk verringert werden.

Ein weiterer Vorteil dieser Anordnung ist, dass der Zufluss im vorderen Teil des Bauwerks, in dem tendenziell höhere Fließgeschwindigkeiten auftreten, verstärkt an den Öffnungen des Schrägklärers vorbeizieht. Dies wirkt der Ausbildung von Stagnationszonen am Ende des Bauwerks entgegen.

4.3.6 **Klarwasserabzüge**

Die Klarwasserabzüge werden über den Schrägklärerelementen so angeordnet, dass eine gleichmäßige, flächige Abnahme des Wassers gewährleistet ist. Hierzu ist notwendig, dass die Fließwege des Wassers möglichst gleich lang sind. Die gleichmäßige Durchströmung wird weiterhin durch folgende Empfehlungen unterstützt:

- Der Abstand der Klarwasserabzüge zueinander sollte 3 m nicht überschreiten. In den Rinnen ist ein Freispiegelabfluss zu gewährleisten.
- Die Klarwasserabzüge sollten mit eingestauten Auslaufschlitzen nach DWA-Merkblatt 176 (2013) oder als Zahnschwelle konzipiert werden.
- Das Wasserpolster zwischen der Oberkante der Schrägklärerelemente und der Wasseroberfläche, der Klarwasserzone, sollte zwischen 0,20 m und 0,40 m liegen (Vosswinkel et al. (2015)[5]).
- Der Einfluss von Querströmungen in der Klarwasserzone sollte durch Trennwände im Abstand von ca. 3,0 m minimieren werden (Abbildung 4.4).

[5] Untersuchungs- und Entwicklungsvorhaben des Ministeriums für Klimaschutz, Umwelt, Landwirtschaft, Natur- und Verbraucherschutz des Landes Nordrhein-Westfalen „Überwachung und Optimierung der Leistungsfähigkeit von Mischwasserbehandlungsanlagen“ Laufzeit: 10/2012 – 06/2014, Teil 2 „Optimierung der Leistungsfähigkeit von Regenüberlaufbecken mittels Schrägklärertechnologie“

- Die Klarwasserabzüge können in einer zentralen Sammelrinne oder in zwei außen liegende Sammelrinnen münden (s. Abbildung 4.5).

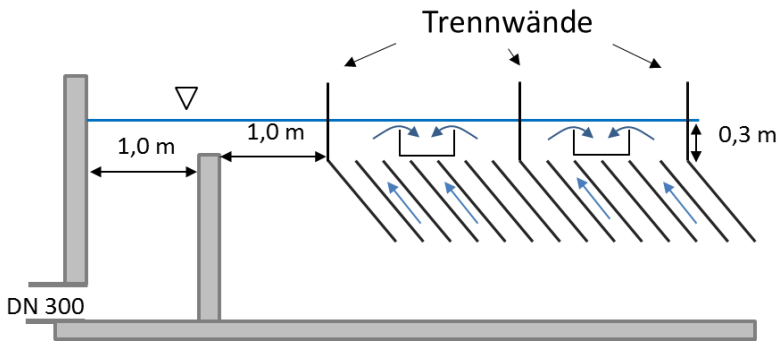


Abbildung 4.4: Anordnung der Trennwände und Klarwasserrinnen

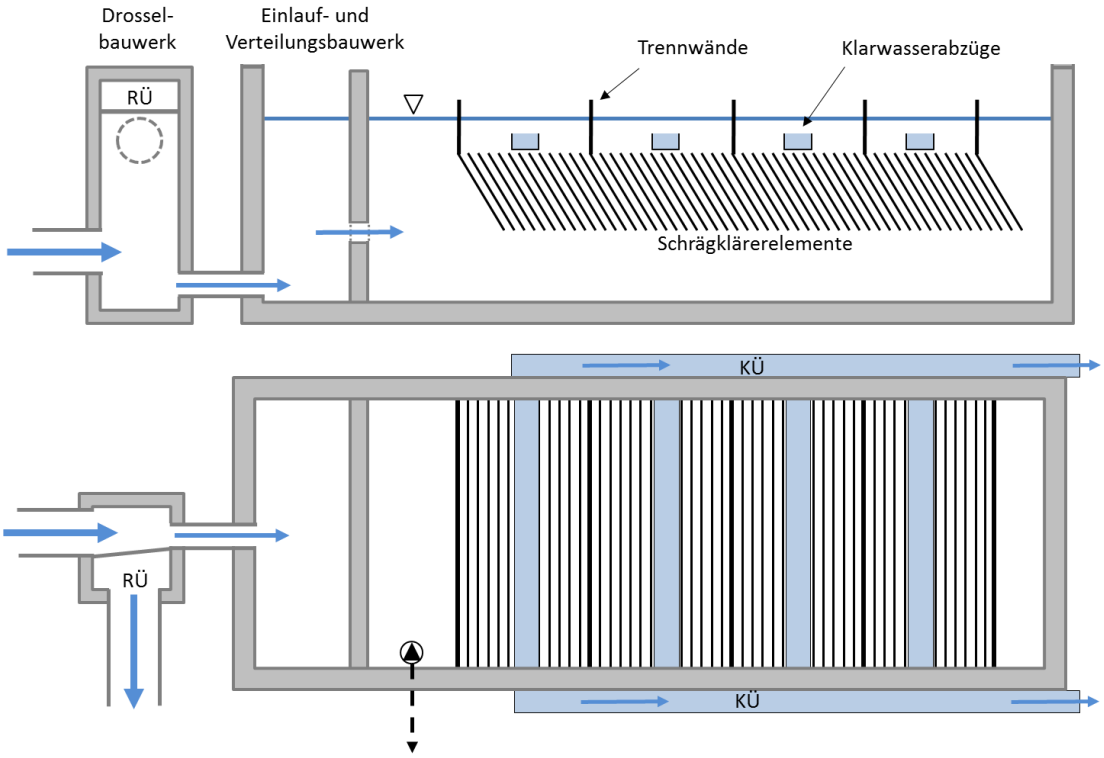


Abbildung 4.5: Schematische Darstellung eines Schrägklärers mit seitlich angeordneten Sammelrinnen im Trennsystem

4.4 Weitere Hinweise

Zusätzliche zu den konstruktiven Empfehlungen tragen die nachfolgenden Hinweise zur erfolgreichen Planung und zum sicheren Betrieb der Anlagen bei:

- Die Bauwerke sollten nach Möglichkeit in offener Bauweise errichtet werden. Vorteile ergeben sich durch die Möglichkeit der einfachen Sichtkontrolle der Schrägklärerelemente, der Klarwasserabzüge sowie durch bessere Wartungs- und Reinigungsbedingungen. Eine offene Bauweise fördert zudem den Selbstreinigungseffekt der Schrägklärerelemente, da die auf den Oberflächen der

Schrägklärerelemente verbleibenden Sedimente abtrocknen, beim Trocknen abblättert und durch einsetzenden Niederschlag abgespült werden.

- Eine Grobstoffabscheidung mittels Feinrechen ist beim Einsatz im Mischsystem grundsätzlich erforderlich, um die Funktion, Langlebigkeit und Effektivität der Schrägklärer sicherzustellen. Beim Trennsystem wird eine Grobstoffabscheidung dann empfohlen, wenn in erhöhtem Maße Vegetationsreste (Laub) auftreten.
- Zur Reinigung der Bauwerkssohle können die für Regenbecken üblichen Reinigungseinheiten Verwendung finden.
- Begehbare Stege können bei Anlagen mit großer Grundfläche eine sinnvolle Ergänzung darstellen.
- Schrägklärer sollen nicht im Dauerstau betrieben werden. Neben den bekannten Rücklösungsproblemen von dauereingestauten Sedimenten, ist im Fall von Schrägklärern negativ zu beurteilen, dass ein Dauereinstau die „Selbstreinigung“ der Platten- oder Röhrenelemente behindert.

4.5 Empfehlungen für die Aufrüstung bestehender Anlagen

Schrägklärerelemente können zur Kompensation fehlenden Volumens oder zur Verbesserung der Absetzleistung bestehender Regenbecken im Trenn- und Mischsystem genutzt werden. Auch die Aufrüstung von Stauraumkanälen insbesondere von Stauraumkanälen mit untenliegenden Entlastungen kann sinnvoll sein.

Es bestehen die gleichen Bemessungsvorgaben wie beim Neubau von Schrägklärern.

Aufgrund der Bedeutung des Einlauf- und Verteilungsbauwerks für die Sedimentationswirkung und der Möglichkeit zur Optimierung der Sedimentation durch Schrägklärelemente wird empfohlen, alle vorhandenen Sedimentationsanlagen in Bezug auf die gegebenen Optimierungsoptionen zu überprüfen.

Eine hydraulische Optimierung oder Nachrüstung der Regenwasserbehandlungsanlagen im Trennsystem ist in der Regel ohne großen Aufwand realisierbar. Die durch diese Maßnahmen erreichbare Sedimentationsleitung ist daher für alle bestehenden Einleitungen anzustreben.

Eine Priorisierung der Umsetzung kann anhand folgender Kriterien erfolgen:

a) Empfindlichkeit bzw. Zustand des Gewässers, in das eingeleitet wird,
b) Bauweise des Bestandsbeckens (offen/geschlossen),
c) Hydraulische und stoffliche Belastung des Beckens
d) Anzahl der Anlagen in der Zuständigkeit eines Betreibers,
e) Kosten-Nutzen-Aspekte.

Bei Regenwasserbehandlungsanlagen (Regenüberlaufbecken und Stauraumkanäle) im Mischsystem verursacht der in der Regel erforderliche Rechen mit Reinigungseinrichtung einen erhöhten Bau- und Betriebsaufwand. Dazu können die häufig geschlossene Ausführung oder Sonderbauformen einen nachträglichen Einbau von Schrägklärerelementen erschweren.

Die Nachrüstung von bestehenden Anlagen ist aber auch hier eine anzustrebende Lösung, wenn eines oder mehrere der folgenden Kriterien erfüllt sind:

a) Die Schmutzfrachtberechnung weist im Mischsystem die Notwendigkeit von zusätzlichem Volumen nach.
b) Eine Immissionsbetrachtung fordert erhöhte Reinigungsleistung der Mischwasserbehandlung.
c) Die behandelte Mischwassermenge soll erhöht werden bzw. die Klärbedingungen werden von der bestehenden Anlage nicht eingehalten.

5 Literaturverzeichnis

ATV-A 128 (1992): Richtlinien für die Bemessung und Gestaltung von Regenentlastungsanlagen in Mischwasserkanälen. ATV-DVWK Regelwerk Abwasser Abfall. Hennef (ATV-Arbeitsblatt, A 128).

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. In: Theo G. Schmitt (Hg.): Regenwasser in urbanen Räumen. Aqua urbanica trifft RegenwasserTage (Schriftenreihe Wasser Infrastruktur Ressourcen), S. 153–168.

Beach, W. A. (1972): Fundamentals of tube settler design. In: *Proceedings of the 27th Industrial Waste Conference* (141).

Caradot, N.; Sonnenberg, H.; Rouault, P.; Gruber, G.; Hofer, T.; Torres, A. et al. (2015): Influence of local calibration on the quality of online wet weather discharge monitoring: feedback from five international case studies. In: *Water Science and Technology* 71 (1), S. 45–51. DOI: 10.2166/wst.2014.465.

Dohmann, Max; Buer, Thomas; Hördemann, K.-W; Stepkes, Hermann (2003): Einsatz von Lamellenabscheidern in Mischwasserbehandlungsanlagen. Schlussbericht zum Forschungs- und Entwicklungsvorhaben. Aachen.

DWA-A 102 (2016): (Gelbdruck) Grundsätze zur Bewirtschaftung und Behandlung von Regenwetterabflüssen zur Einleitung in Oberflächengewässer. Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall. Hennef (DWA-Arbeitsblatt).

DWA-M 176 (2013): Hinweise zur konstruktiven Gestaltung und Ausrüstung von Bauwerken der zentralen Regenwasserbehandlung und -rückhaltung. Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall. November 2013. Hennef: DWA (DWA-Regelwerk).

Fuchs, Stephan; Eyckmanns-Wolters, Rebecca; Maus, Christian; Sommer, Marc, Voßwinkel, Nina; Mohn, Rainer; Uhl, Mathias et al. (2013): Reduktion des Feststoffeintrags durch Niederschlagswassereinleitungen. Phase 1: Ministerium für Klimaschutz, Umwelt, Landwirtschaft, Natur- und Verbraucherschutz des Landes Nordrhein-Westfalen.

Gamerith, V.; Steger, B.; Hochedlinger, M.; Gruber, G. (2011): Assessment of UV/VIS-spectrometry performance in combined sewer monitoring under wet weather conditions. 12nd International Conference on Urban Drainage. Porto Alegre/Brazil. Online verfügbar unter https://www.researchgate.net/profile/Guenter_Gruber2/publication/294261156_Assessment_of_UVVIS-spectrometry_performance_in_combined_sewer_monitoring_under_wet_weather_conditions/links/56bfa08808ae44da37fa6e4b/Assessment-of-UV-VIS-spectrometry-performance-in-combined-sewer-monitoring-under-wet-weather-conditions.pdf, zuletzt geprüft am 02.10.2018.

Gründler, Peter (2004): Chemische Sensoren. Eine Einführung für Naturwissenschaftler und Ingenieure. Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag. Online verfügbar unter http://dx.doi.org/10.1007/3-540-35052-7.

Hübner, Martin (1997): Beurteilung und Ermittlung der Wirkungsweise von Anlagen zur Regenwasserbehandlung. Essen: SIWAWI (Forum Siedlungswasserwirtschaft und Abfallwirtschaft Universität GH Essen, H. 10).

Kemper, Mike (2016): Strömungsverhalten und Sedimentationswirksamkeit in Regenbecken mit Schrägklärer-Einbauten. Dissertation. Karlsruhe. Online verfügbar unter https://publikationen.bibliothek.kit.edu/1000068909, zuletzt geprüft am 13.11.2017.

Kemper, Mike; Fuchs, Stephan; Nichler, Thomas; Gillar, Markus; Uhl, Mathias, Ebbert, Simon; Weiß, Gebhard et al. (2015a): Ermittlung der Leistungsfähigkeit von Regenüberlaufbecken und Überwachung durch Online-Messtechnik. Gefördert durch das MKULNV NRW.

Kemper, Mike; Weiß, Gebhard; Vosswinkel, Nina; Mohn, Rainer; Uhl, Mathias; Rechtien, Stefan; Fuchs, Stephan (2015b): Optimierung der Leistungsfähigkeit von Regenüberlaufbecken mittels Schrägklärertechnologie. Ministerium für Klimaschutz, Umwelt, Landwirtschaft, Natur- und Verbraucherschutz des Landes Nordrhein-Westfalen.

Klepiszewski, Kai (2006): Analyse und modelltechnische Nachbildung der Reinigungswirkung eines kombinierten Bauwerks zur Mischwasserbehandlung. Techn. Univ., Diss.-Kaiserslautern, 2005. 1. Aufl. Kaiserslautern: Universität Kaiserslautern (Schriftenreihe des Fachgebietes Siedlungswasserwirtschaft der Universität Kaiserslautern, 22).

Komlos, John; Süssmuth, Bernd (2010): Empirische Ökonomie. Eine Einführung in Methoden und Anwendungen (Springer-Lehrbuch).

Krauth, Karlheinz; Bondareva, Ol'ga N. (1999): Anwendung von Flockungsverfahren bei der Regenwasserbehandlung. Stuttgart.

Kutzner, Ralf (2005): Prozessorientierte Beschreibung von Niederschlagswasserbehandlungsanlagen - Möglichkeiten und Grenzen. Universität Duisburg-Essen, Dissertation, 2005. Aachen: Shaker (Forum Siedlungswasserwirtschaft und Abfallwirtschaft Universität Essen, 25).

Leung, Woon-Fong (1983): Lamella and tube settlers. 2. Flow Stability. In: *Industrial & Engineering Chemistry Process Design and Development* 22 (1), S. 68–73.

Mayer, Patricia (2018): Online-Monitoring mit UV/VIS-Spektrometersonden an einer Sedimentationsanlage. Masterarbeit. Karlsruher Institut für Technologie, Karlsruhe (KIT) Institut für Wasser und Gewässerentwicklung, Fachbereich Siedlungswasserwirtschaft und Wassergütewirtschaft, Karlsruhe.

Reinecke, J. (2014): Strukturgleichungsmodelle in den Sozialwissenschaften. Berlin: De Gruyter.

UFT (2012): Betriebsanleitung. Mobile Schrägkläreranlage. Hg. v. Umwelt- und Fluid-Technik Dr. H. Brombach GmbH. Bad Mergentheim.

Viscarra Rossel, R.; Walvoort, D.J.J.; McBratney, A.; Janik, L.; Skjemstadt, J. (2006): Visible, near infrared, mid infrared or combined diffuse reflectance spectroscopy for simultaneous assessment of various soil properties: Geoderma.

Wedler, Gerd; Freund, Hans-Joachim (2012): Lehrbuch der physikalischen Chemie. 6., vollst. überarb. und aktualisierte Aufl. Weinheim: Wiley-VCH.

Weingartner, A.; Hofstädter, F.; van den Broeke, J. (2010): Technologiewechsel zu s::can Spektrometersonden. Hg. v. wwt-special. Online verfügbar unter https://www.s-can.at/images/publications/p_2010_01.pdf, zuletzt aktualisiert am 04/2010, zuletzt geprüft am 01.10.2018.

Weiß, Gebhard (2015): Grundlagen zum Einsatz von Schrägklärern und halbtechnische Versuche. In: Optimierung der Leistungsfähigkeit von Regenüberlaufbecken mittels Schrägklärertechnologie. Ministerium für Klimaschutz, Umwelt, Landwirtschaft, Natur- und Verbraucherschutz des Landes Nordrhein-Westfalen, S. 9–53.

6 Anhang

6.1 Fotodokumentation

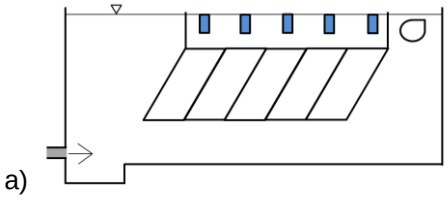
Abbildung 6.1: Sedimentationskammer ohne Schrägklärer

Abbildung 6.2: Schrägklärer mit Plattenelementen

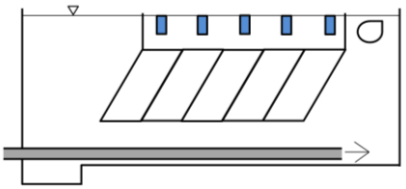
Abbildung 6.3: Schrägklärer mit Röhrenelementen

6.2 Einlauf- und Verteilerbauwerke

Die in diesem Absatz enthaltenen Einlauf- und Verteilerbauwerke wurden an der Sedimentationsanlage hydraulisch untersucht, siehe Kemper (2016). Die nachfolgenden Abbildungen sind derselben Quelle entnommen.

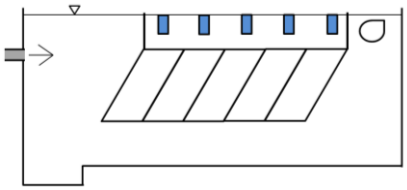


a)

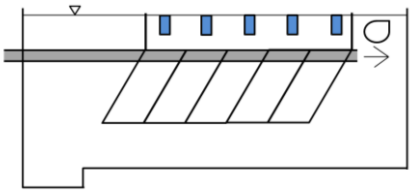


b)

Abbildung 6.4: Rohreinläufe unten liegend

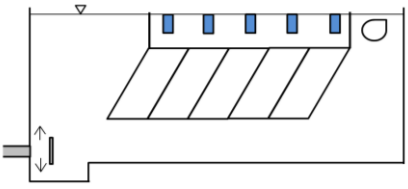


c)



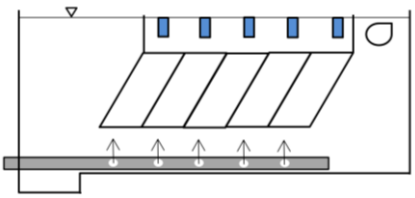
d)

Abbildung 6.5: Rohreinläufe oben liegend

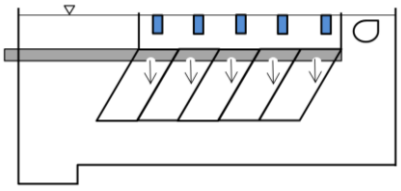


e)

Abbildung 6.6: Rohreinlauf unten liegend mit Prallblech

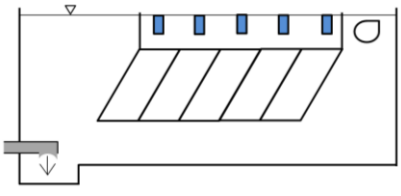


f)

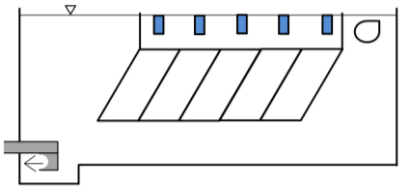


g)

Abbildung 6.7: Verteilerrohre im Längsschnitt

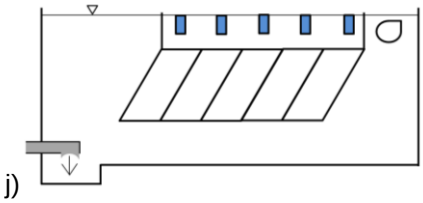


h)



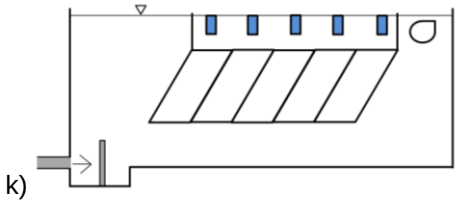
i)

Abbildung 6.8: Verteilerrohre im Querschnitt mit zwei Ausläufen

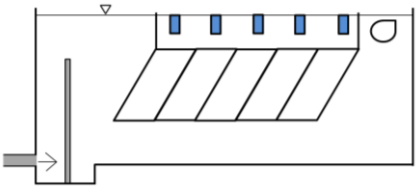


j)

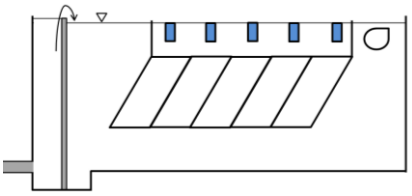
Abbildung 6.9: Verteilerrohre im Querschnitt mit vier Ausläufen



k)



l)



m)

Abbildung 6.10: Schwellen

6.3 Liste laufender und kürzlich abgeschlossener Vorhaben

Projekttitel: *„Messkampagne RÜB Homberg-Hakenfeld“*

Stand: abgeschlossen 2015

Förderung: LINEG

Beteiligte: LINEG, RWTH Aachen

Gegenstand der Untersuchungen: Untersuchungen zur Steigerung der Effizienz des RÜB Homberg-Hakenfeld durch Lamellenabscheider.

Projekttitel: „*Entwicklung einer semizentralen Anlage zur Behandlung von schadstoffbelasteten Niederschlagsabflüssen“ (Loewe-Vorhaben)*

Stand: läuft bis 2016

Förderung: Hessen Agentur GmbH

Beteiligte: Frankfurt University of Applied Sciences (FRA-UAS, Steinhardt GmbH, 3P

Gegenstand der Untersuchungen: Untersuchungen zur Abscheideleistung eines Gegenstromabscheiders zur Behandlung von Straßenabflüssen. Dem Schrägklärer ist eine Filtereinheit der Firma 3P zur Behandlung gelöster Inhaltsstoffe nachgeschaltet.

Projekttitel: „*Hydraulische Untersuchungen und numerische Strömungssimulation von Schrägklärern zur Regenwasserbehandlung im Misch- und Trennsystem*“

Stand: läuft bis Mitte 2017

Förderung: Umweltministerium Baden-Württemberg

Beteiligte: KIT Institut für Wasser und Gewässerentwicklung, Bereich Siedlungswasserwirtschaft und Wasserwirtschaft

Gegenstand der Untersuchungen: Erarbeitung von Empfehlungen zur konstruktiven Gestaltung von Regenbecken mit Schrägklärern im Misch- und Trennsystem

Projekttitel: *Dessin-Vorhaben*

Stand: läuft bis 2017

Förderung: EU-Vorhaben

Beteiligte im Teilprojekt: Emscher Genossenschaft, UFT, Segno, Universität Duisburg-Essen

Gegenstand der Untersuchungen: Untersuchungen zur Abscheideleistung von Kreuzstromabscheidern im Mischsystem

6.4 Liste von Herstellern und marktgängigen Modellen

Unternehmen*: Purac*

Produkttyp: Gegenstromabscheider

Produktname: „GEWE Lamella Separator“

Ausrüstung: Plattenabscheider

Bekannte Referenzen: keine

Unternehmen*: NordicWater*

Produkttyp: Gegenstromabscheider

Produktname: „Lamella Separator“

Ausrüstung: Plattenelemente

Bekannte Referenzen: keine

Unternehmen*: Steinhardt (DE) Hydroconcept (FR)*

Produkttyp: Gegenstromabscheider

Produktname: „Hydro MESI“

Ausrüstung: Wahlweise Platten- oder Röhrenelemente

Bekannte Referenzen: Sipplingen (Bodensee)

Unternehmen*: Uhrig GmbH*

Produkttyp: Gegenstromabscheider

Produktname: kein Produktname vorhanden, da keine Standardbauweise

Ausrüstung: Röhrenelemente (Fa: GEA)

Bekannte Referenzen: StrK mit SKL als nachgeschaltete Behandlungseinheit an den Standorten Eggenstein-Leopoldshafen (MS) & Söllingen (MS)

Unternehmen: *Weber Ing.*

Produkttyp: Gegenstromabscheider

Produktname: kein Produktname vorhanden, keine Standardbauweise

Ausrüstung: Plattenelemente

Bekannte Referenzen: Pforzheim (TS)

Unternehmen: *Creabeton*

Produkttyp: Gegenstromabscheider

Produktname: „friwa-sep Lamellenklärer SFK“ (Fertigbauweise)

Ausrüstung: Plattenelemente

Bekannte Referenzen: -

Unternehmen: *Mall*

Produkttyp: Gegenstromabscheider

Produktname: „ViaKan“ & „ViaTub“ (Fertigbauweise)

Ausrüstung: Röhrenelemente

Bekannte Referenzen: -

Unternehmen: *Saint Dizier*

Produkttyp: Gegenstromabscheider

Produktname: „Utep-Li“ (Fertigbauweise)

Ausrüstung: Röhrenelemente

Bekannte Referenzen: -

Unternehmen: *Terre Hill*

Produkttyp: Gegenstromabscheider

Produktname: „Terre Kleen“

Ausrüstung: Plattenelement

Bekannte Referenzen: -

Unternehmen: *UFT Umwelt- und Fluid-Technik*

Produkttyp: Gegenstromabscheider, Kreuzstromabscheider

Produktname: „FluidClear“ & „FluidClearX“

Ausrüstung: Röhrenelemente

Bekannte Referenzen: StrK mit SKL als nachgeschaltete Behandlungseinheit am Standort Rheinstetten (TS)

6.5 Ganglinien

6.5.1 **AFS**

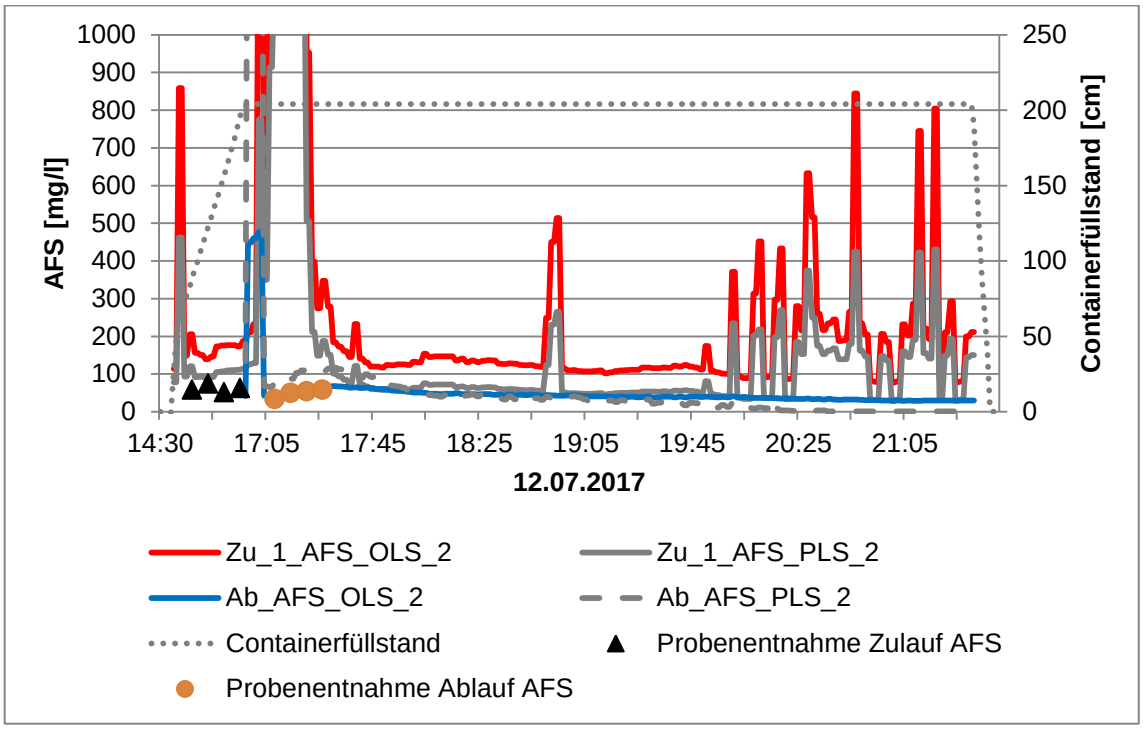


Abbildung 6.11: Ganglinien des Niederschlagsereignisses am 12.07.2017 – Sonde *Zu 1* und *Ab* – Parameter AFS – q_A = 2 m/h (Mayer 2018)

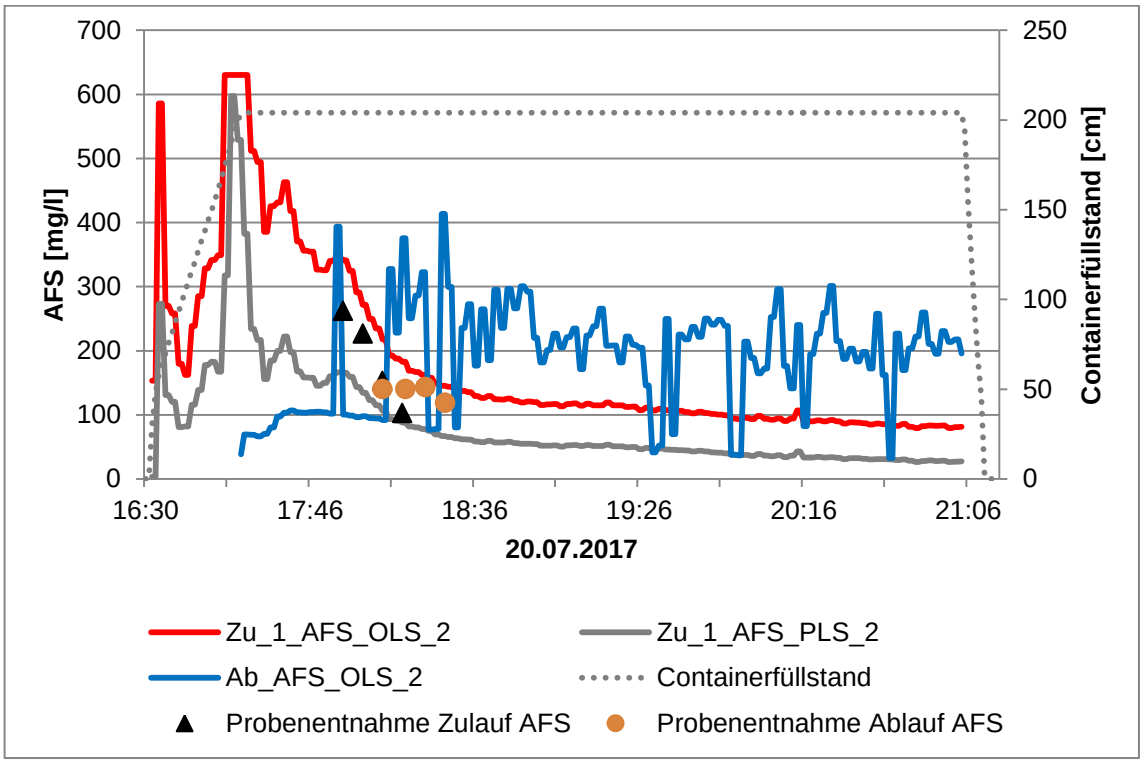


Abbildung 6.12: Ganglinien des Niederschlagsereignisses am 20.07.2017 – Sonde Zu 1 und Ab – Parameter AFS – qA = 2 m/h (Mayer 2018)

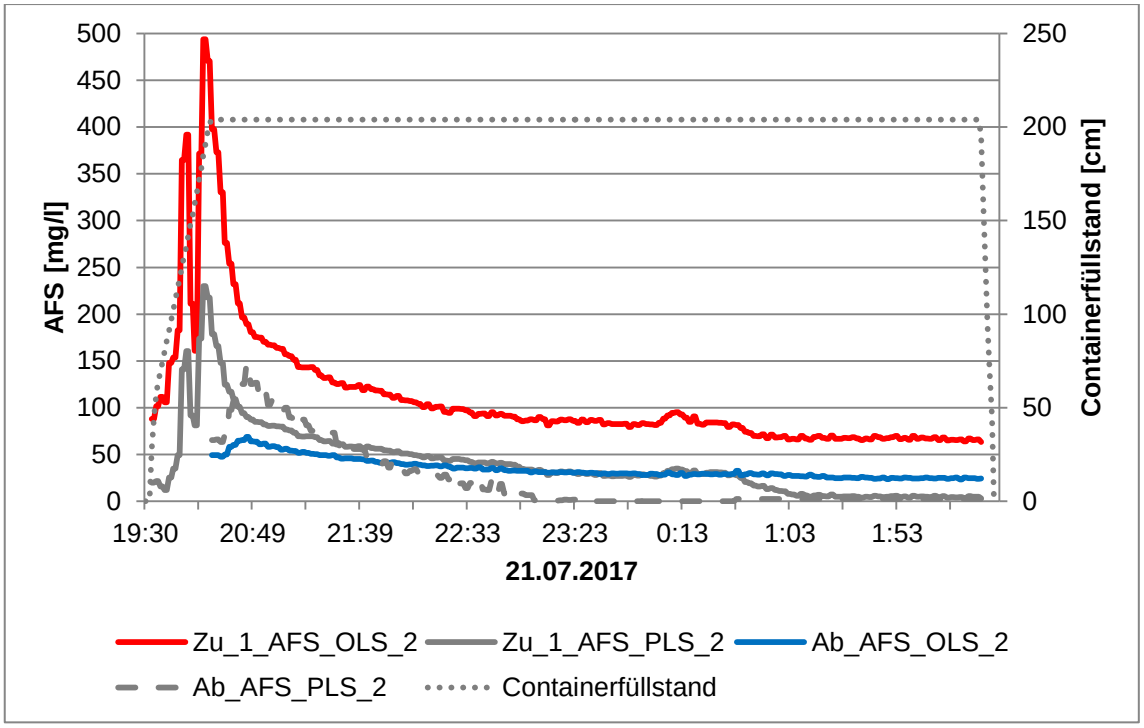


Abbildung 6.13: Ganglinien des Niederschlagsereignisses am 21.07.2017 – Sonde *Zu 1* und *Ab* – Parameter AFS – q_A = 2 m/h (Mayer 2018)

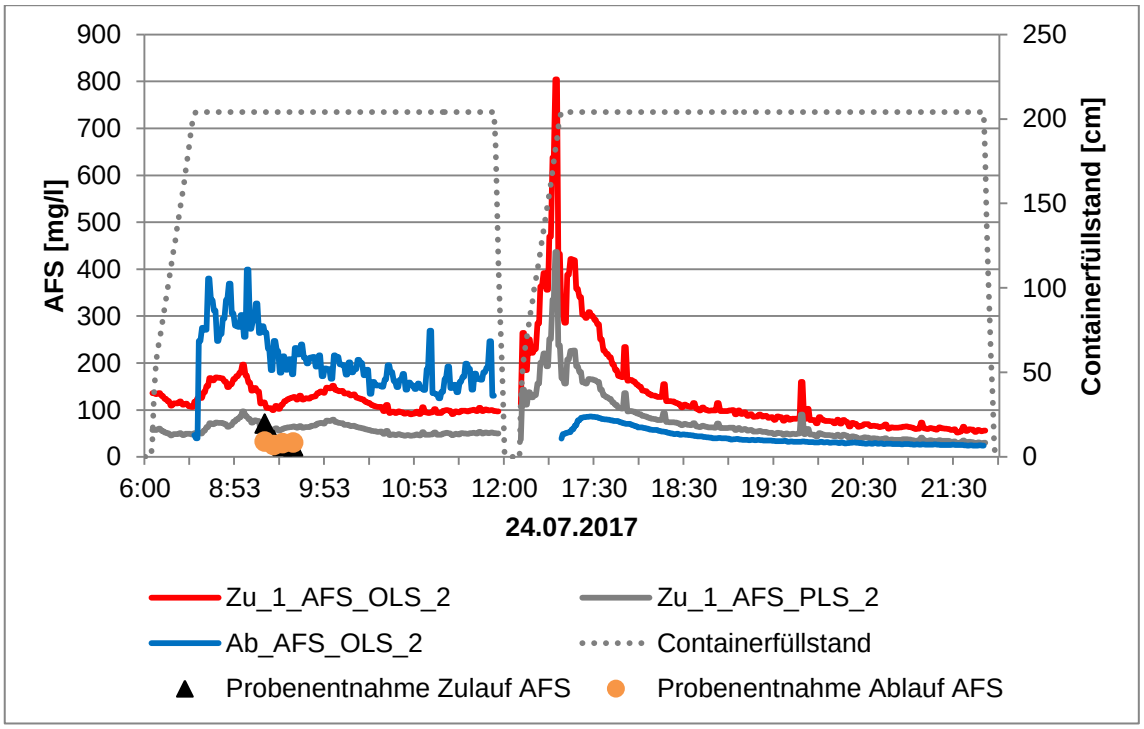


Abbildung 6.14: Ganglinien des Niederschlagsereignisses am 24.07.2017 – Sonde *Zu 1* und *Ab* – Parameter AFS – q_A = 2 m/h

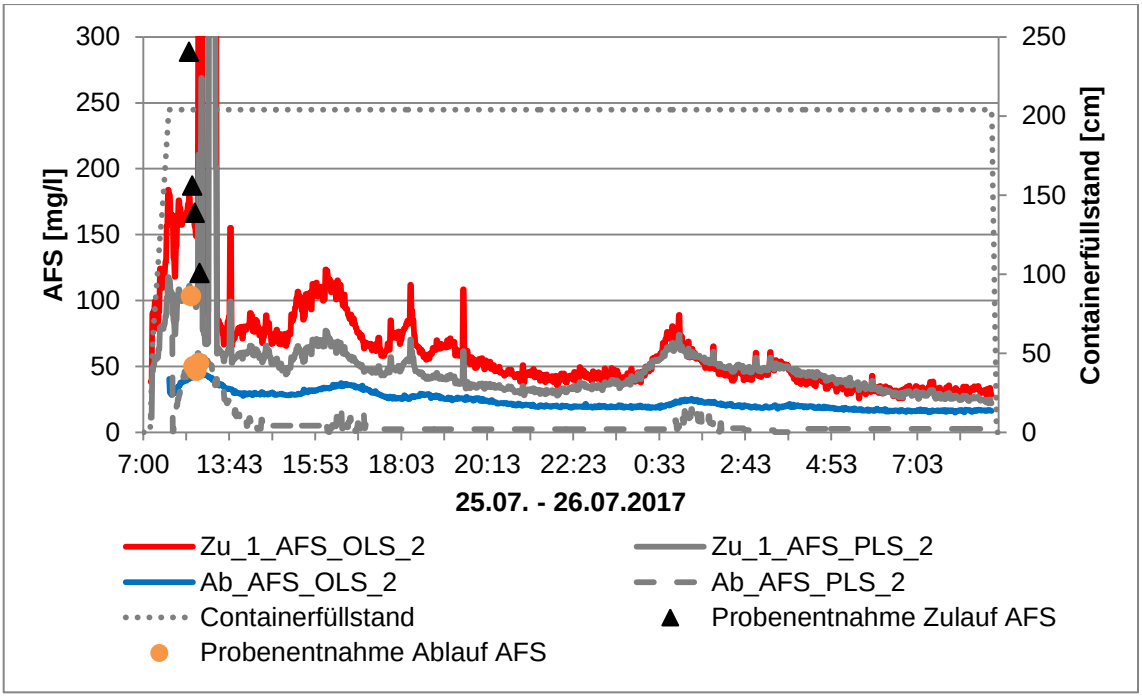


Abbildung 6.15: Ganglinien des Niederschlagsereignisses vom 25.07. bis 26.07.2017 – Sonde *Zu 1* und *Ab* – Parameter AFS – q_A = 2 m/h (Mayer 2018)

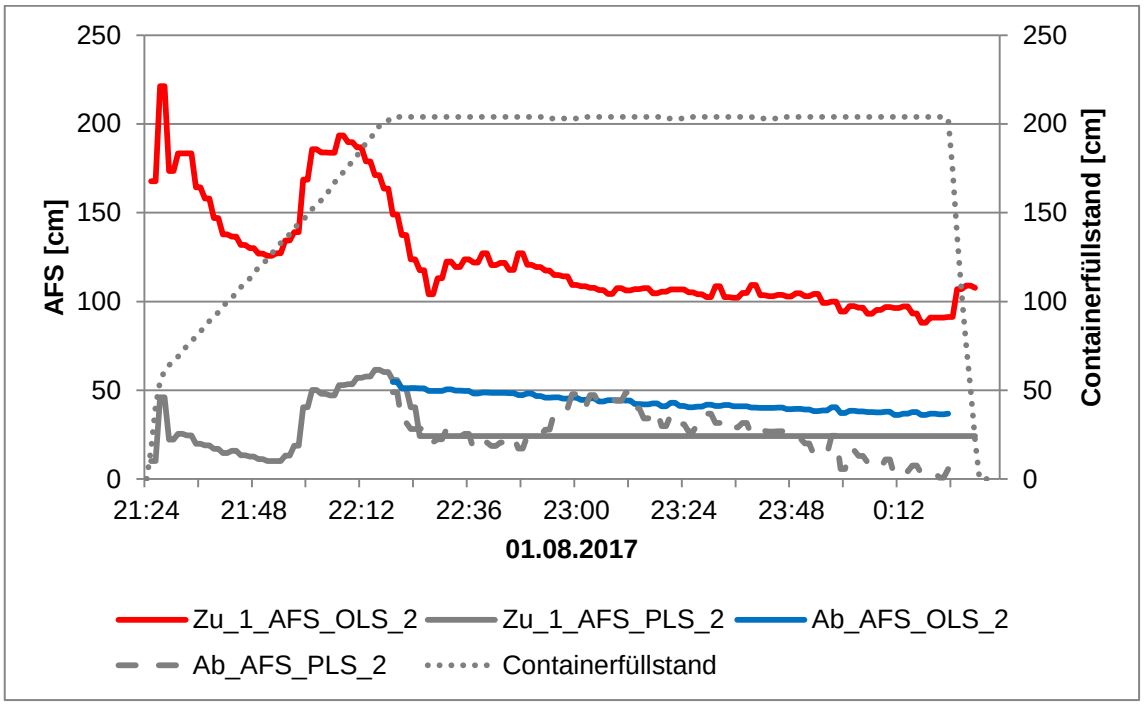


Abbildung 6.16: Ganglinien des Niederschlagsereignisses am 01.08.2017 – Sonde *Zu 1* und *Ab* – Parameter AFS – q_A = 1 m/h (Mayer 2018)

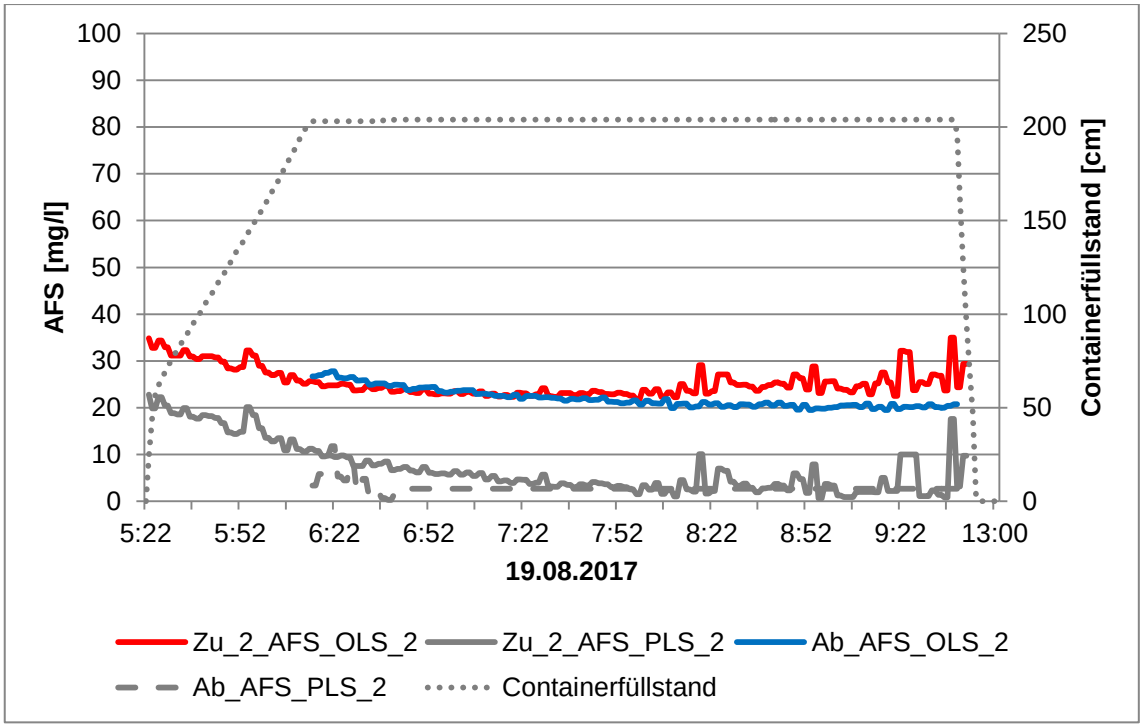


Abbildung 6.17: Ganglinien des Niederschlagsereignisses am 19.08.2017 – Sonde *Zu 2* und *Ab* – Parameter AFS – q_A = 1 m/h (Mayer 2018)

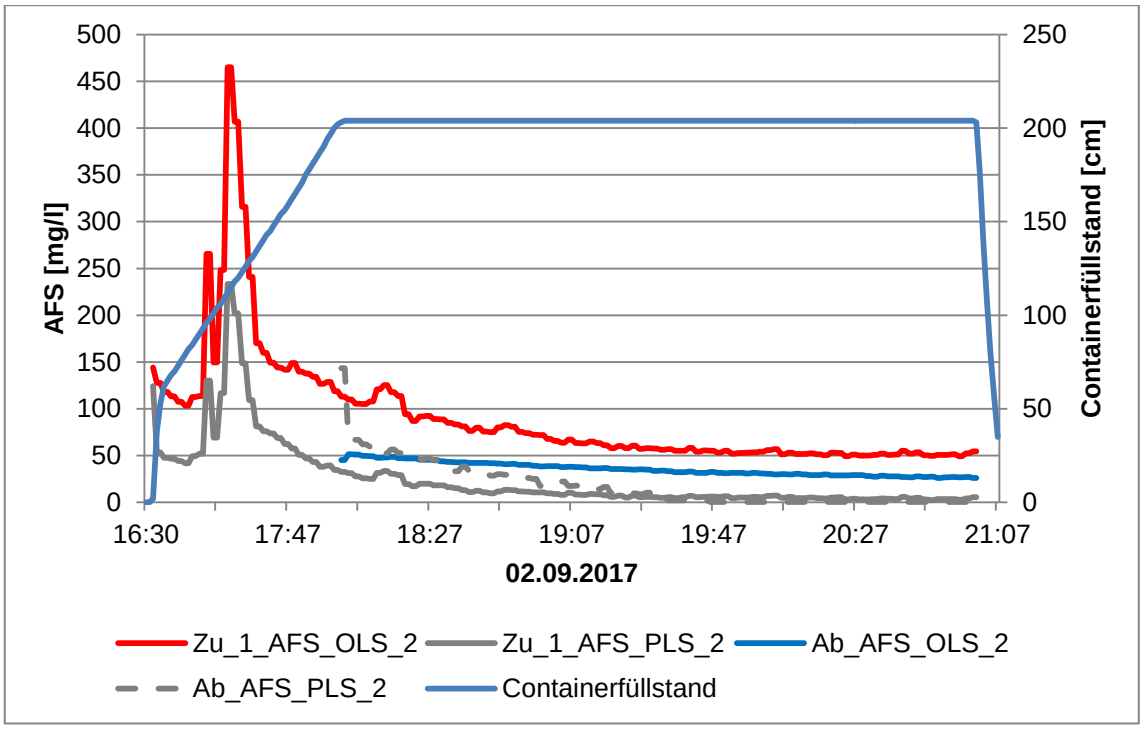


Abbildung 6.18: Ganglinien des Niederschlagsereignisses am 02.09.2017 – Sonde *Zu 1* und *Ab* – Parameter AFS – q_A = 1 m/h (Mayer 2018)

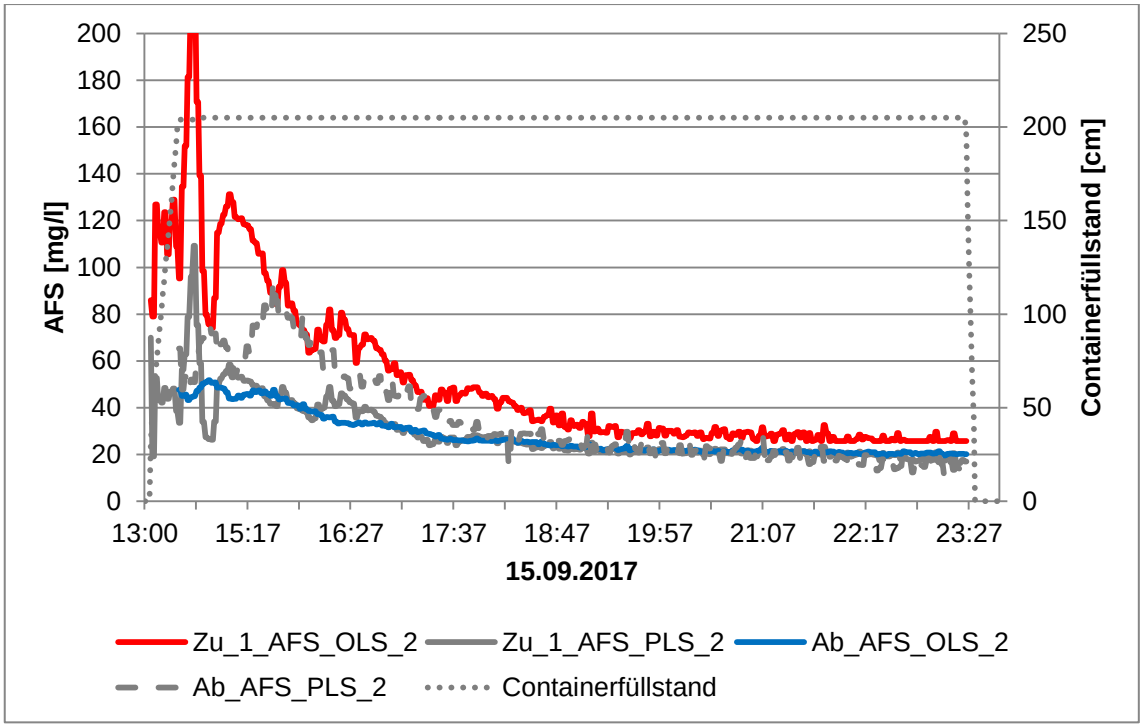


Abbildung 6.19: Ganglinien des Niederschlagsereignisses am 15.09.2017 – Sonde *Zu 1* und *Ab* – Parameter AFS – q_A = 3 m/h (Mayer 2018)

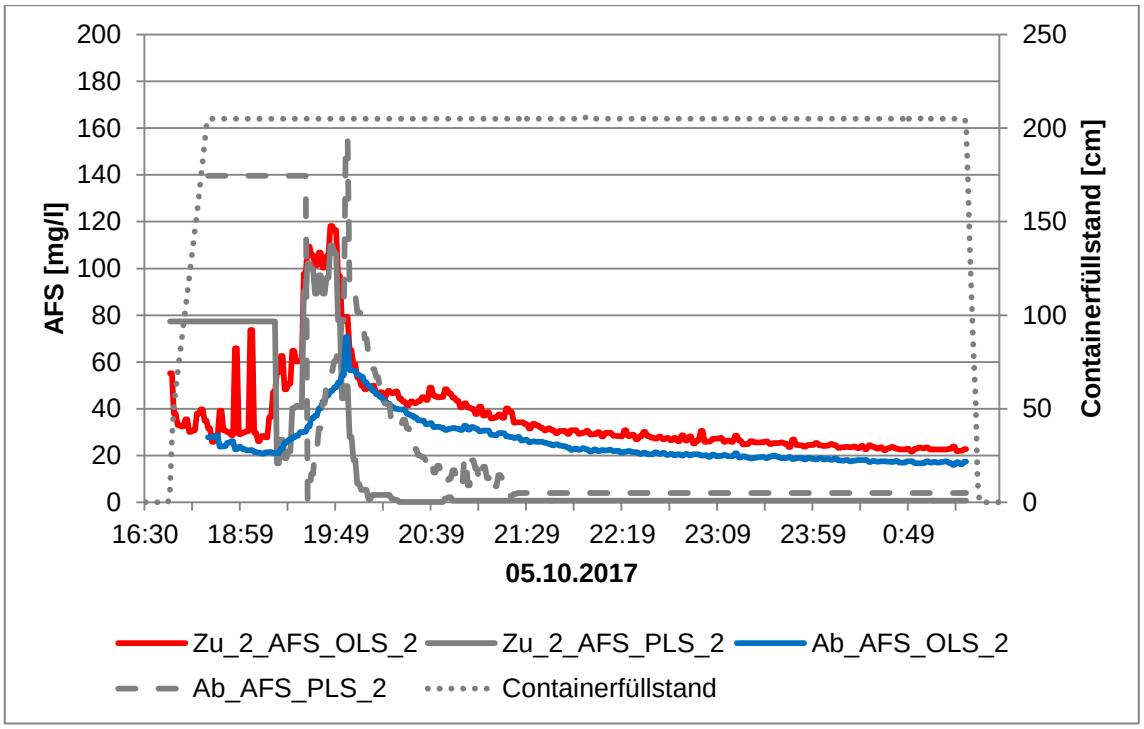


Abbildung 6.20: Ganglinien des Niederschlagsereignisses am 05.10.2017 – Sonde *Zu 2* und *Ab* – Parameter AFS – q_A = 3 m/h (Mayer 2018)

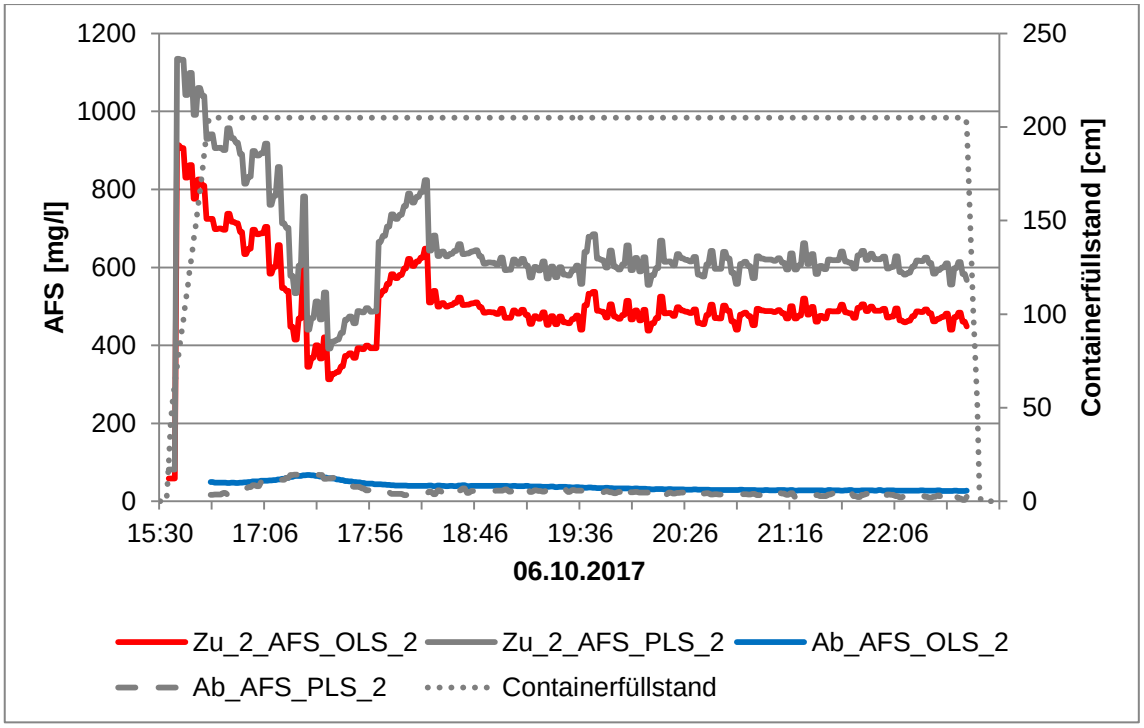


Abbildung 6.21: Ganglinien des Niederschlagsereignisses am 06.10.2017 – Sonde *Zu 2* und *Ab* – Parameter AFS – q_A = 3 m/h (Mayer 2018)

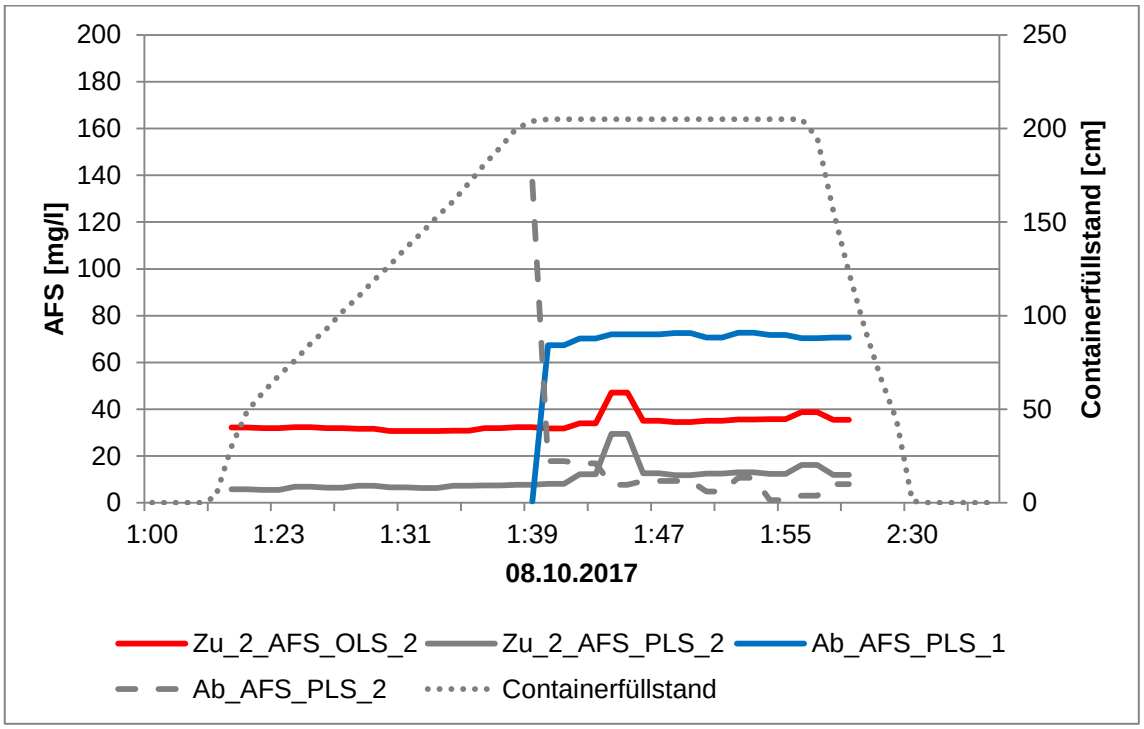


Abbildung 6.22: Ganglinien des Niederschlagsereignisses am 08.10.2017 – Sonde *Zu 2* und *Ab* – Parameter AFS – q_A = 3 m/h

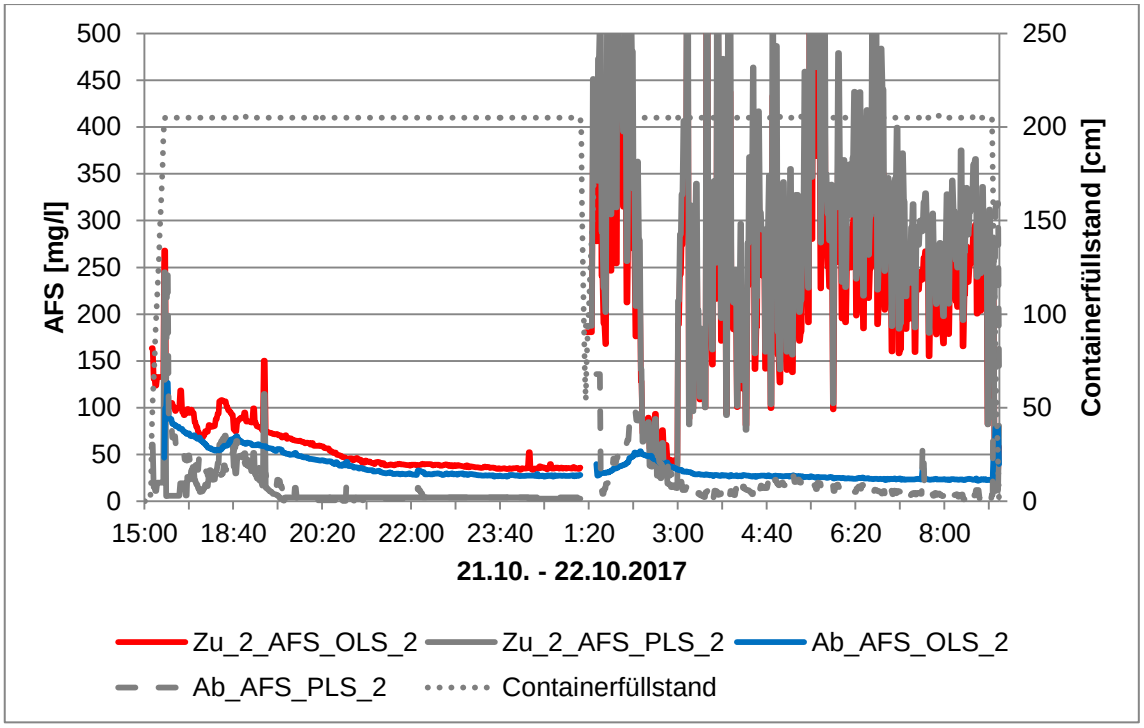


Abbildung 6.23: Ganglinien des Niederschlagsereignisses vom 21.10. bis 22.10.2017 – Sonde *Zu 2* und *Ab* – Parameter AFS – q_A = 4 m/h (Mayer 2018)

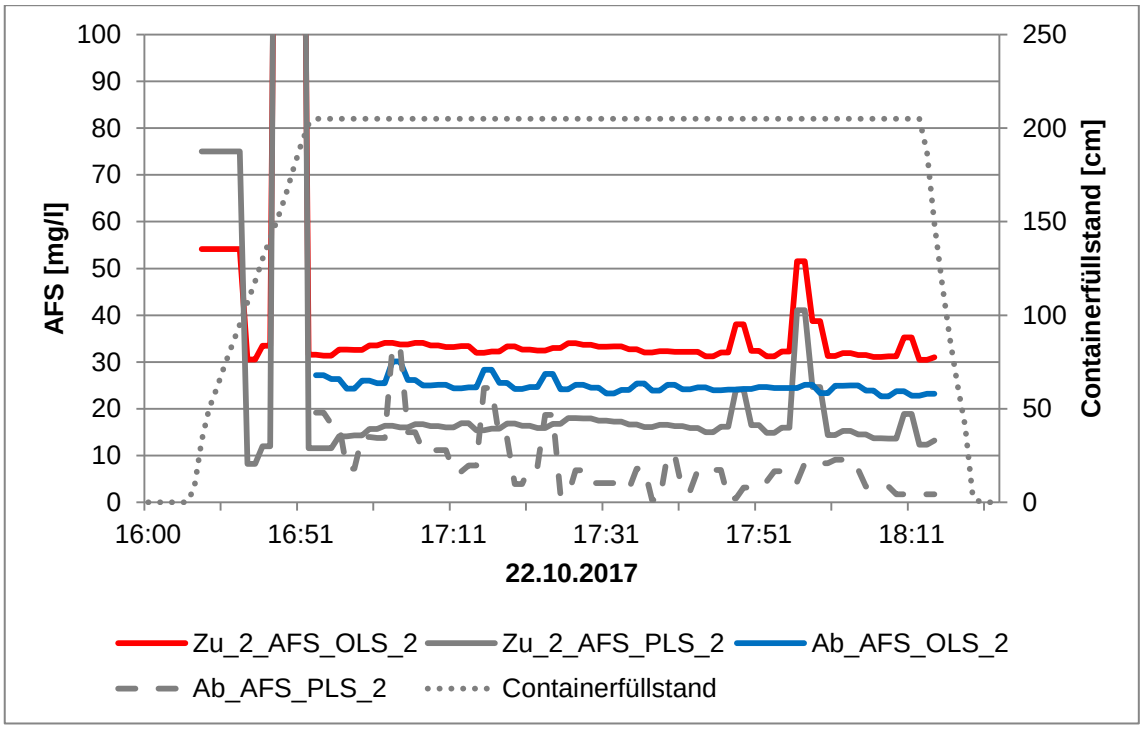


Abbildung 6.24: Ganglinien des Niederschlagsereignisses am 22.10.2017 – Sonde Zu *2* und *Ab* – Parameter AFS – q_A = 4 m/h (Mayer 2018)

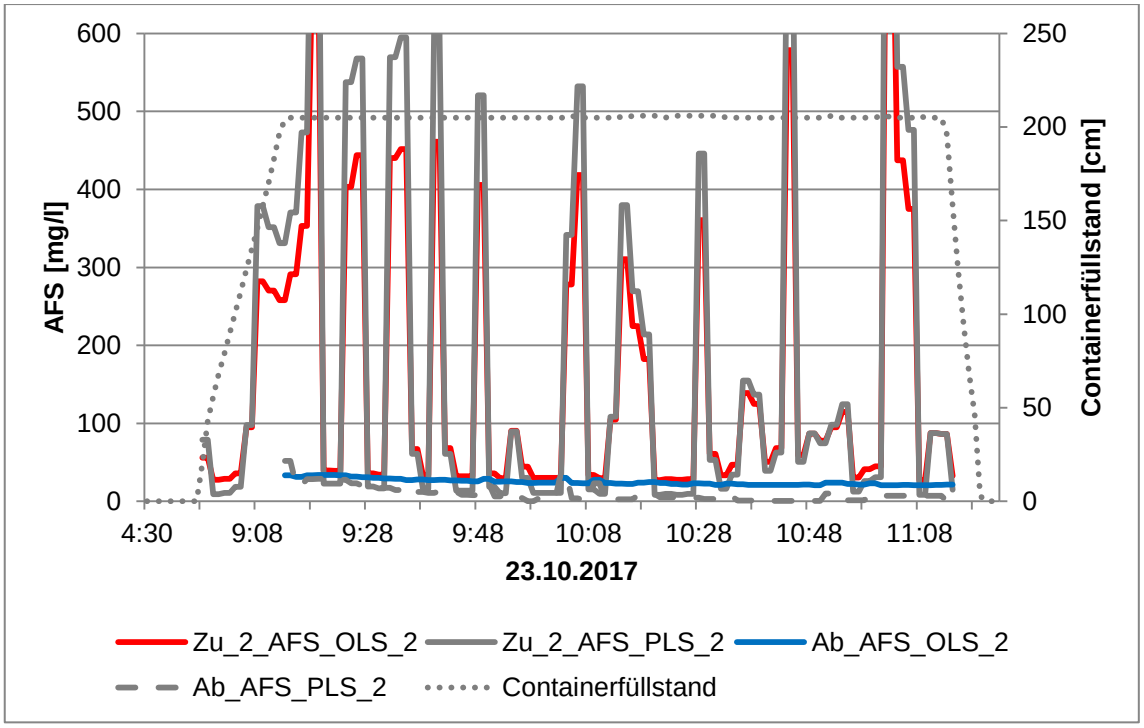


Abbildung 6.25: Ganglinien des Niederschlagsereignisses am 23.10.2017 – Sonde *Zu 2* und *Ab* – Parameter AFS – q_A = 4 m/h (Mayer 2018)

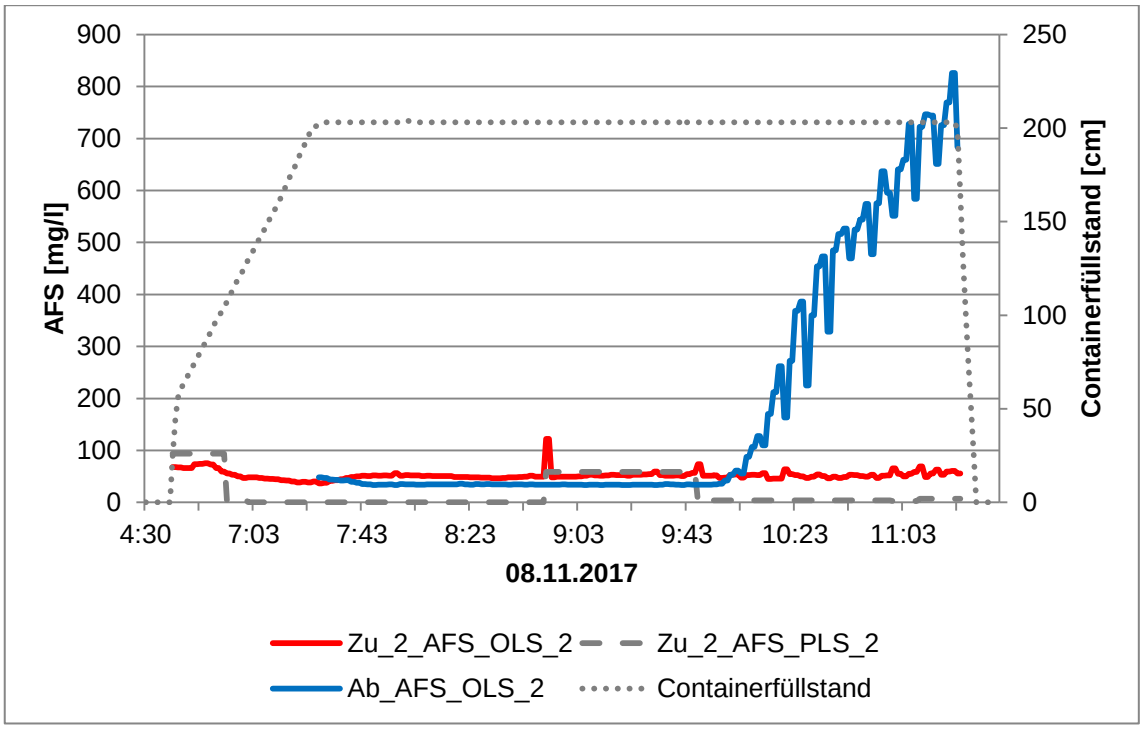


Abbildung 6.26: Ganglinien des Niederschlagsereignisses am 08.11.2017 – Sonde *Zu 2* und *Ab* – Parameter AFS – q_A = 1 m/h (Mayer 2018)

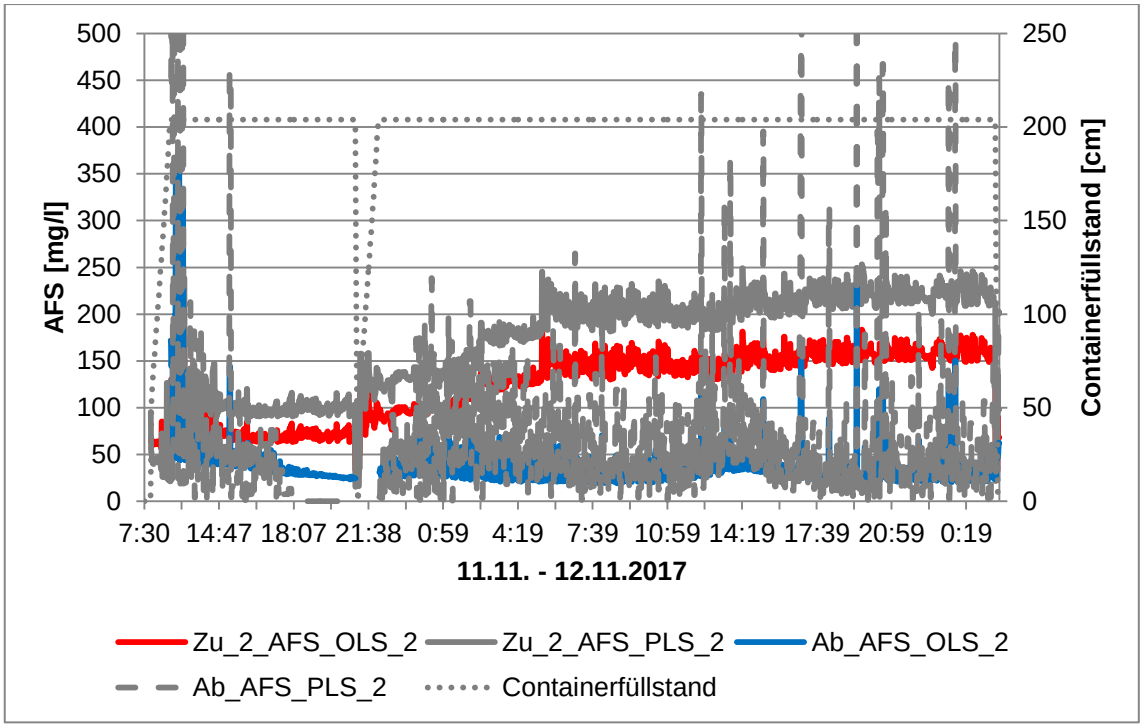


Abbildung 6.27: Ganglinien des Niederschlagsereignisses vom 11.11. bis 12.11.2017 – Sonde *Zu 2* und *Ab* – Parameter AFS – q_A = 1 m/h (Mayer 2018)

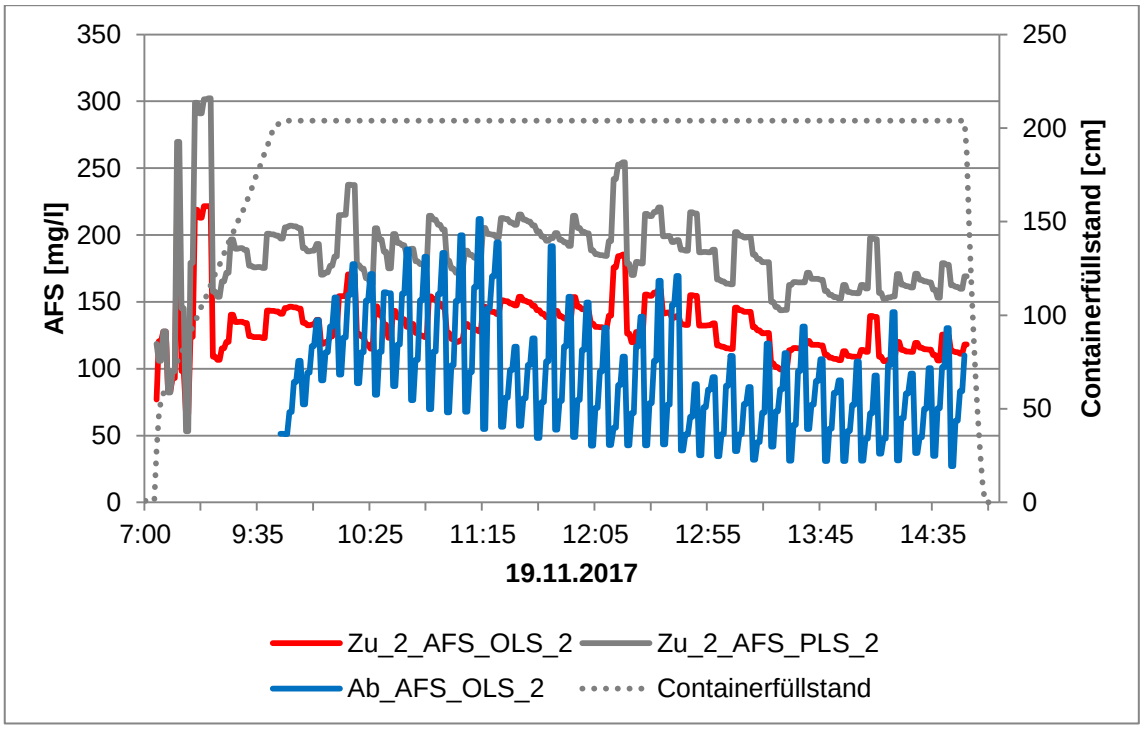


Abbildung 6.28: Ganglinien des Niederschlagsereignisses am 19.11.2017 – Sonde *Zu 2* und *Ab* – Parameter AFS – q_A = 1 m/h (Mayer 2018)

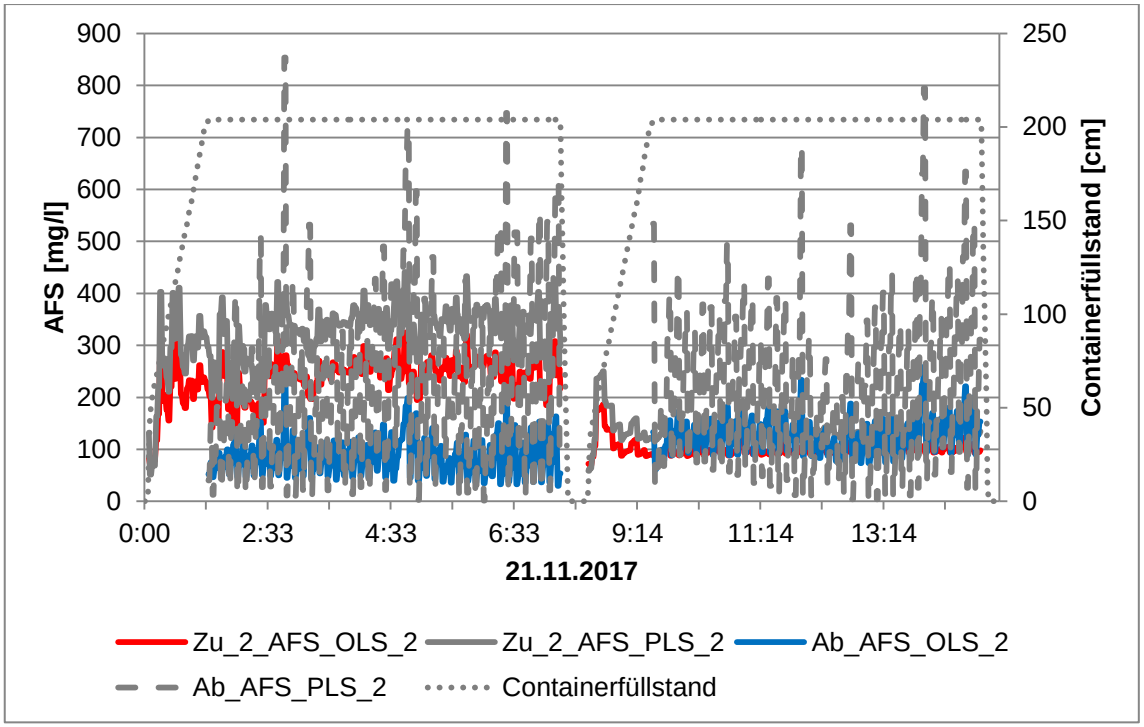


Abbildung 6.29: Ganglinien des Niederschlagsereignisses am 21.11.2017 – Sonde *Zu 2* und *Ab* – Parameter AFS – q_A = 1 m/h (Mayer 2018)

6.5.2 **CSB**

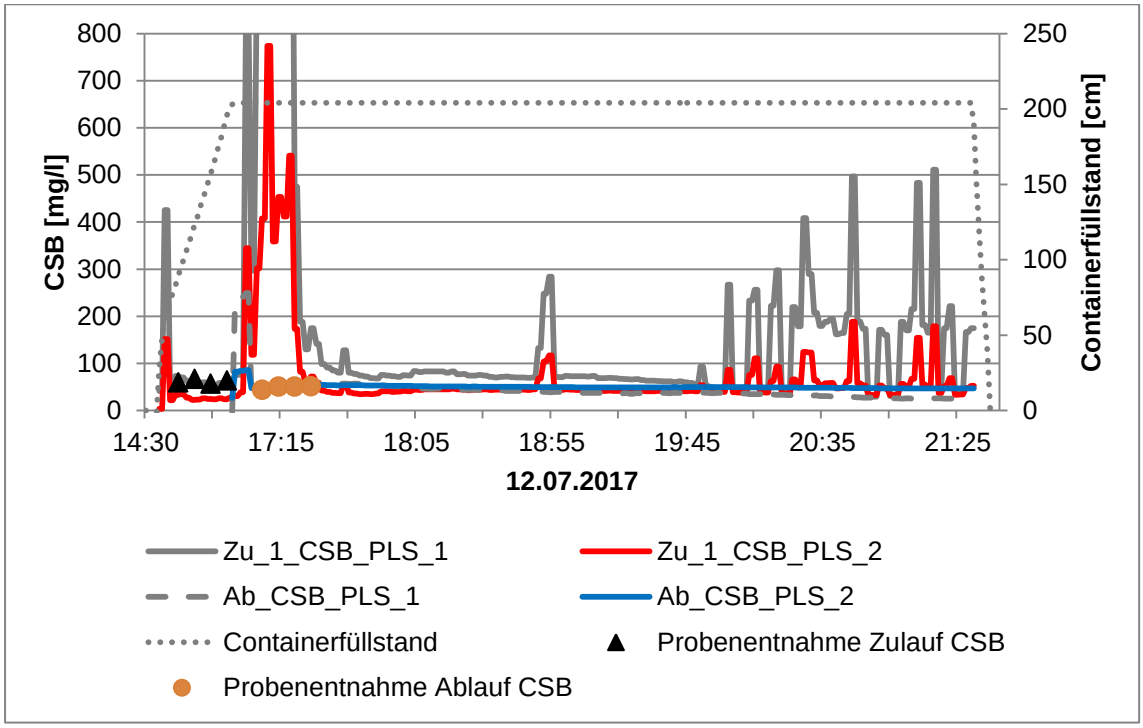


Abbildung 6.30: Ganglinien des Niederschlagsereignisses am 12.07.2017 – Sonde *Zu 1* und *Ab* – Parameter CSB – q_A = 2 m/h

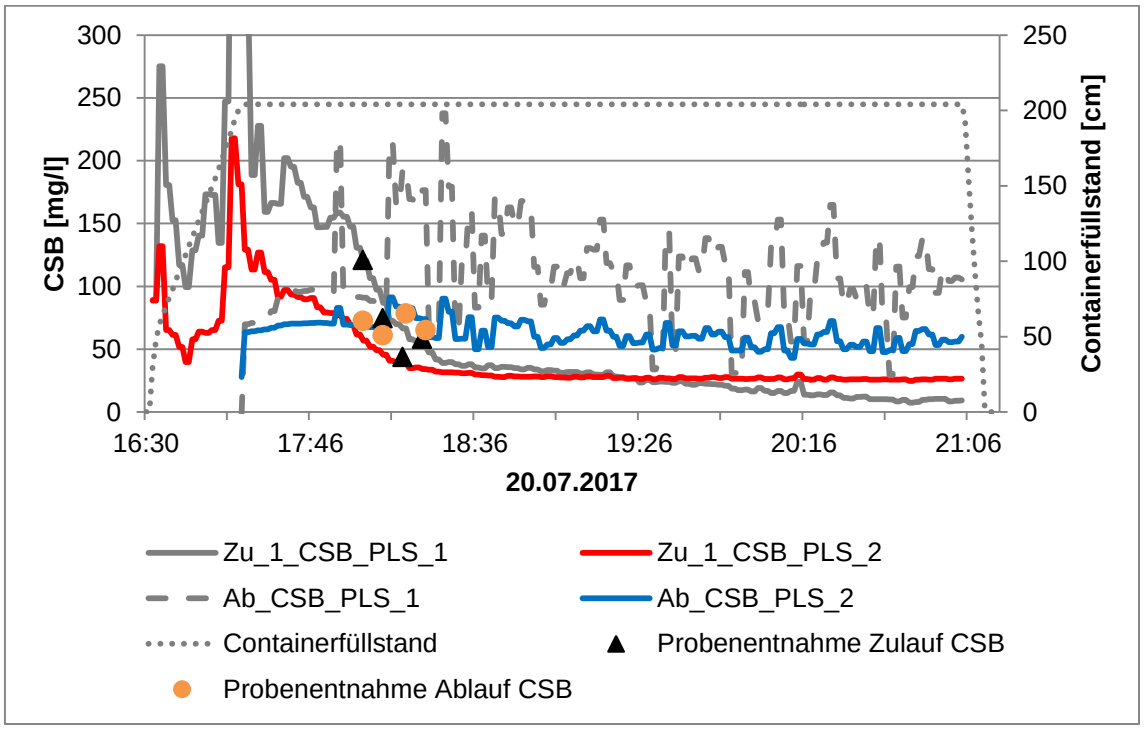


Abbildung 6.31: Ganglinien des Niederschlagsereignisses am 20.07.2017 – Sonde *Zu 1* und *Ab* – Parameter CSB – q_A = 2 m/h

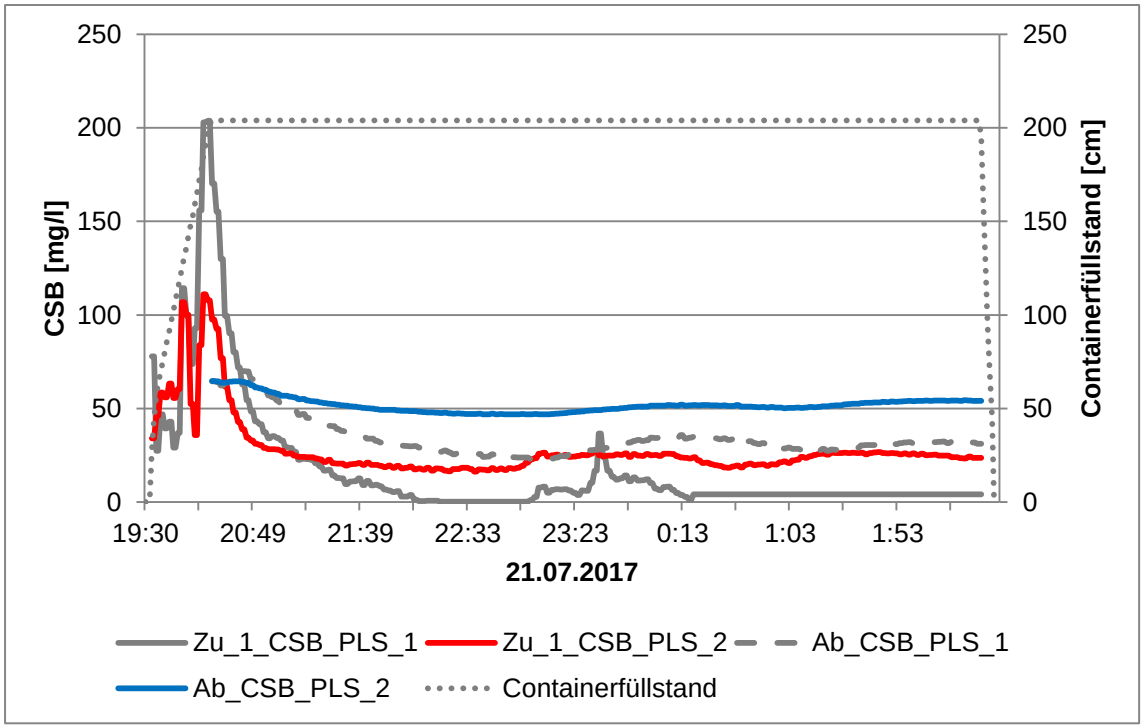


Abbildung 6.32: Ganglinien des Niederschlagsereignisses am 21.07.2017 – Sonde *Zu 1* und *Ab* – Parameter CSB – q_A = 2 m/h

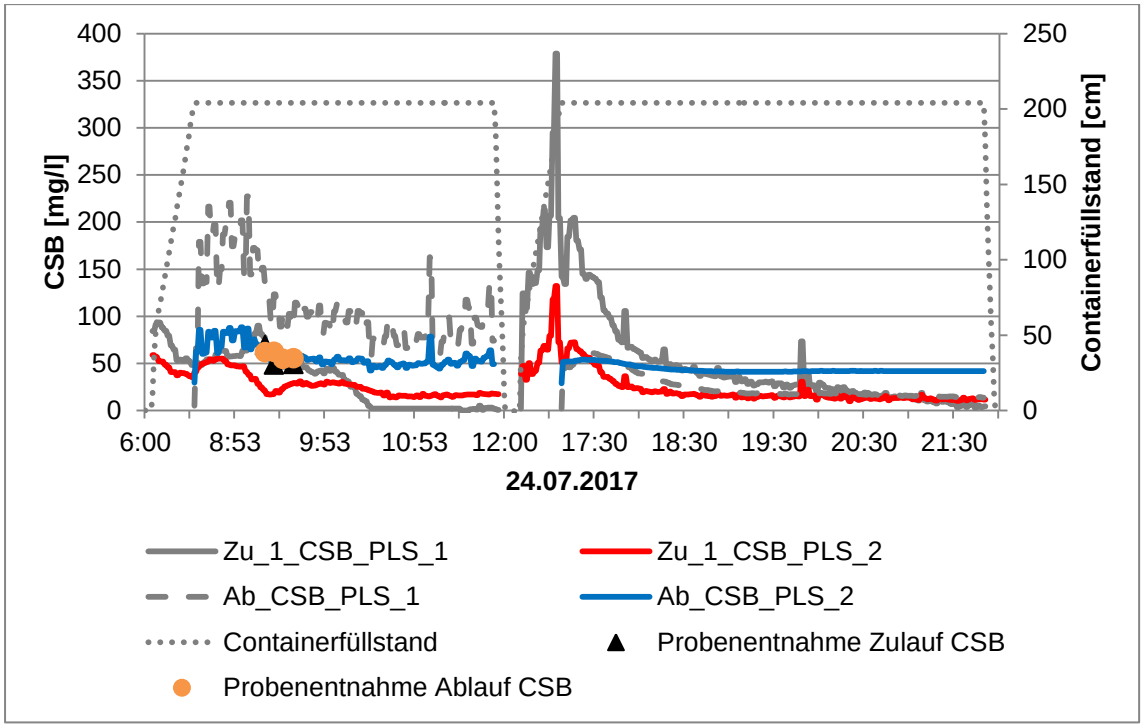


Abbildung 6.33: Ganglinien des Niederschlagsereignisses am 24.07.2017 – Sonde *Zu 1* und *Ab* – Parameter CSB – q_A = 2 m/h

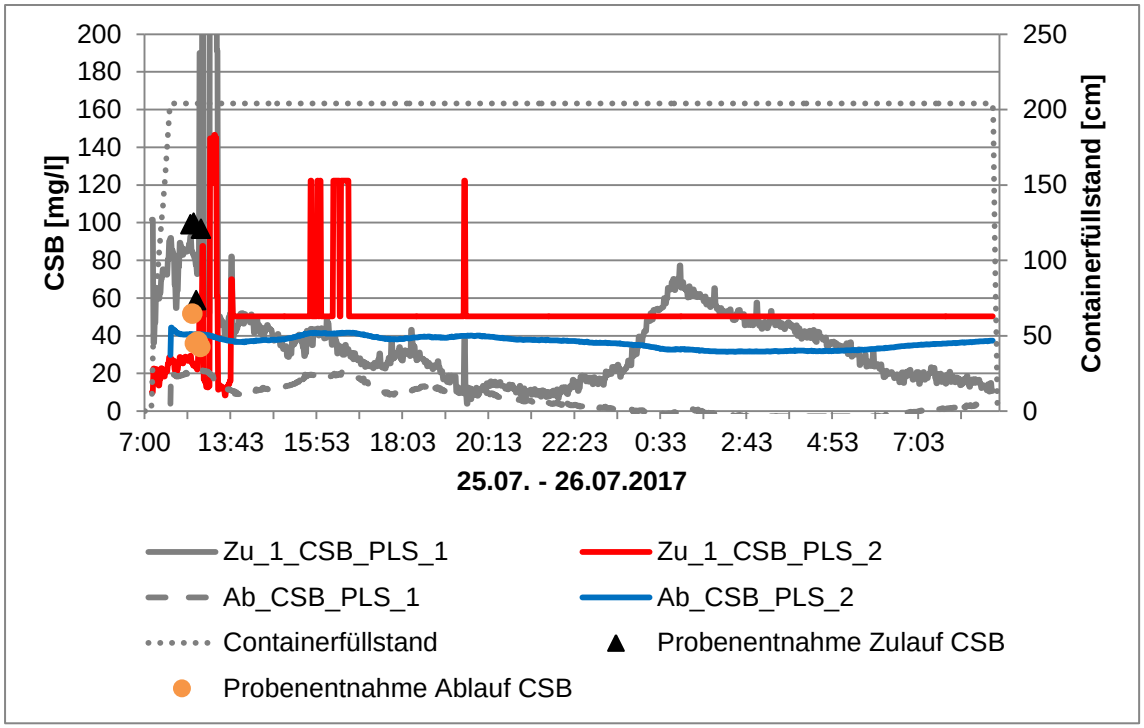


Abbildung 6.34: Ganglinien des Niederschlagsereignisses vom 25.07. bis 26.07.2017 – Sonde *Zu 1* und *Ab* – Parameter CSB – q_A = 2 m/h

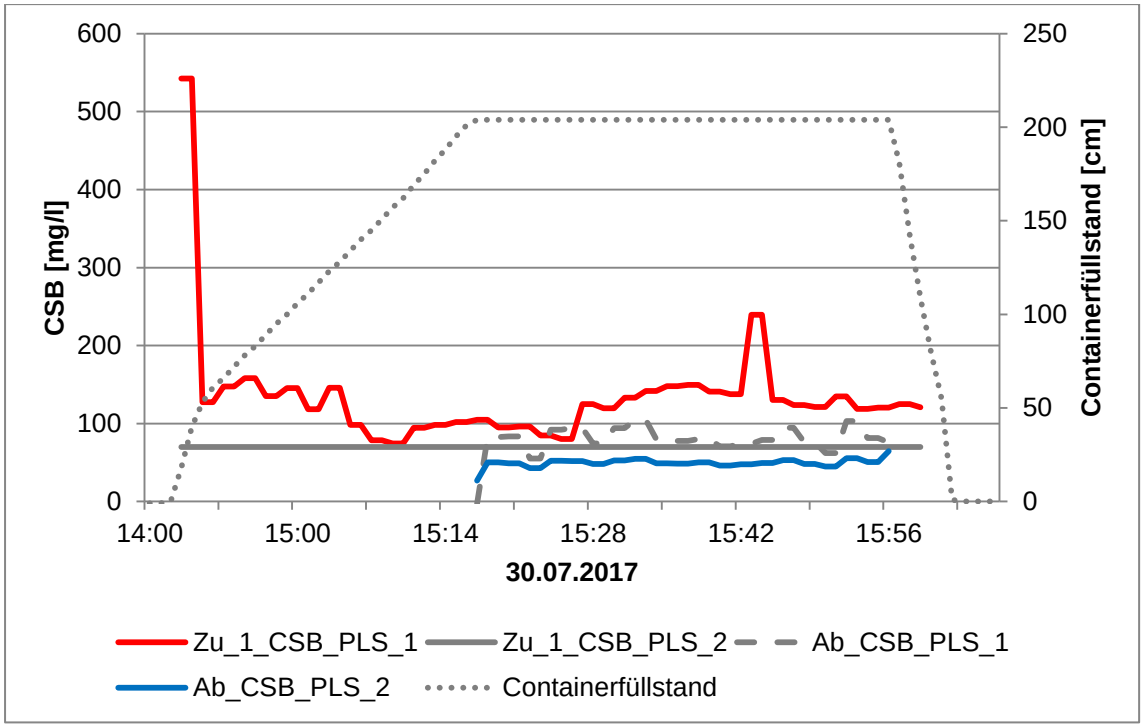


Abbildung 6.35: Ganglinien des Niederschlagsereignisses am 30.07.2017 – Sonde *Zu 1* und *Ab* – Parameter CSB – q_A = 2 m/h

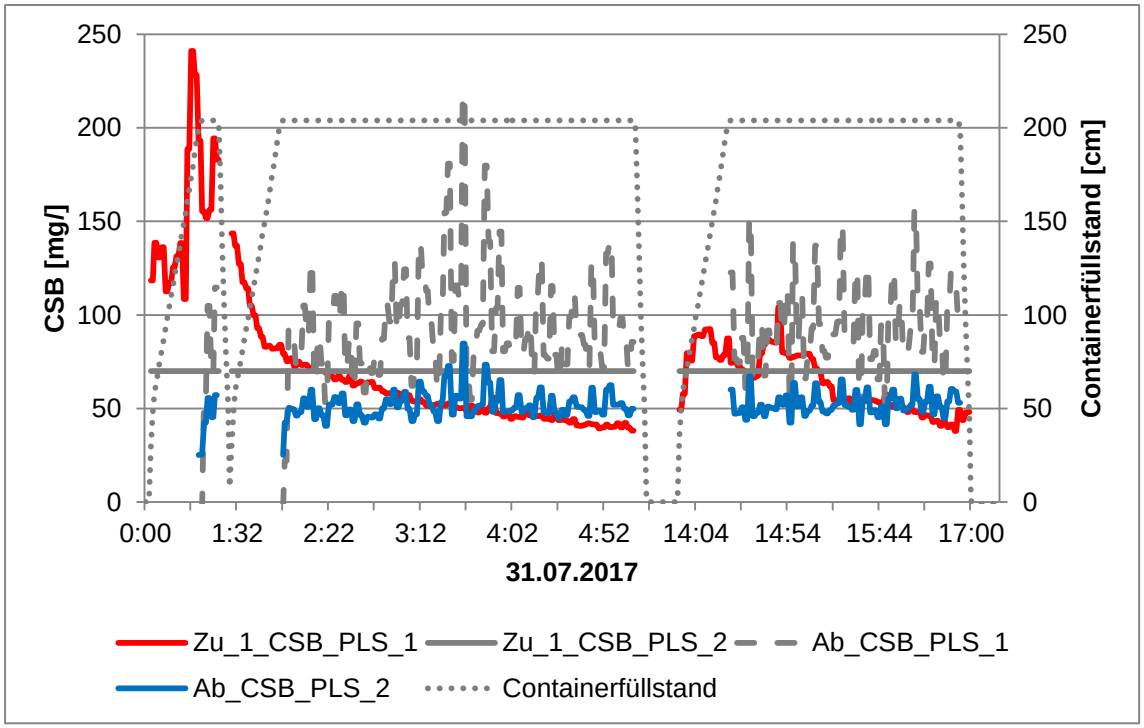


Abbildung 6.36: Ganglinien des Niederschlagsereignisses am 31.07.2017 – Sonde *Zu 1* und *Ab* – Parameter CSB – q_A = 2 m/h

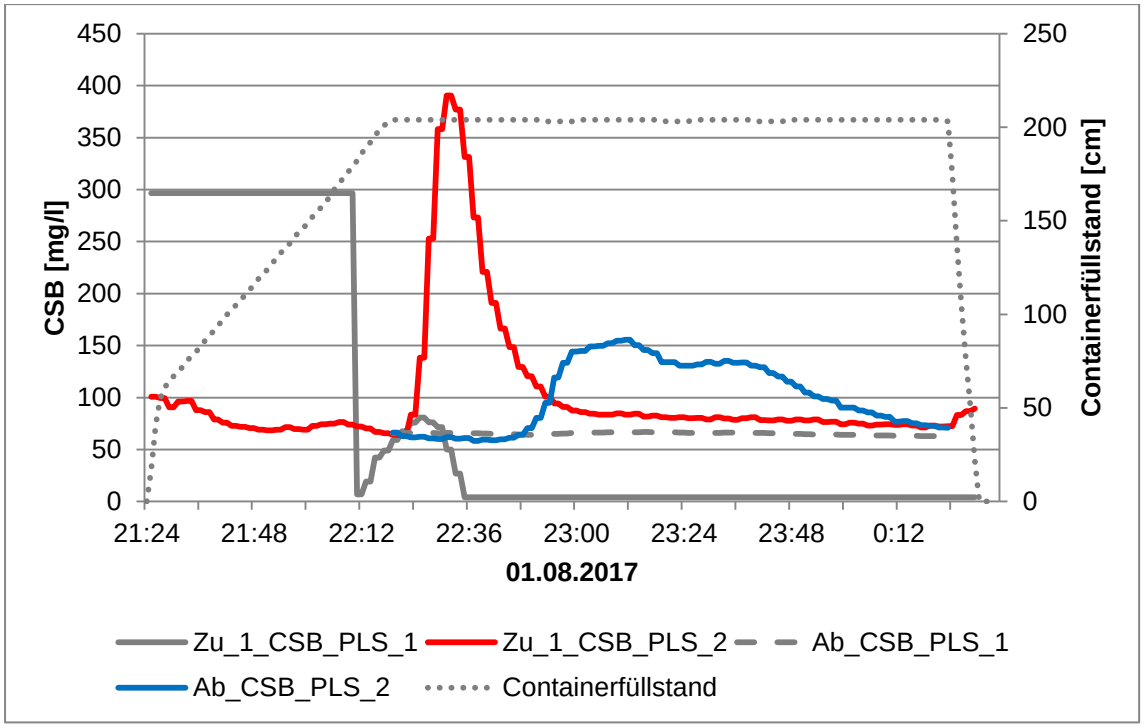


Abbildung 6.37: Ganglinien des Niederschlagsereignisses am 01.08.2017 – Sonde *Zu 1* und *Ab* – Parameter CSB – q_A = 1 m/h

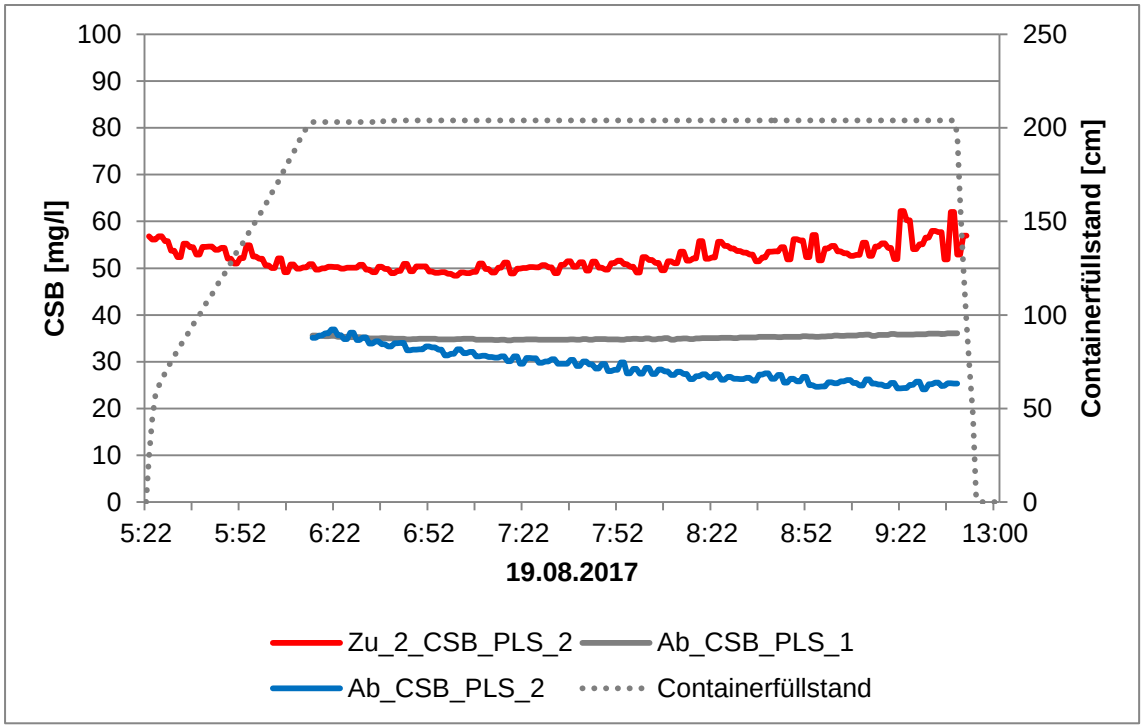


Abbildung 6.38: Ganglinien des Niederschlagsereignisses am 19.08.2017 – Sonde *Zu 2* und *Ab* – Parameter CSB – q_A = 1 m/h

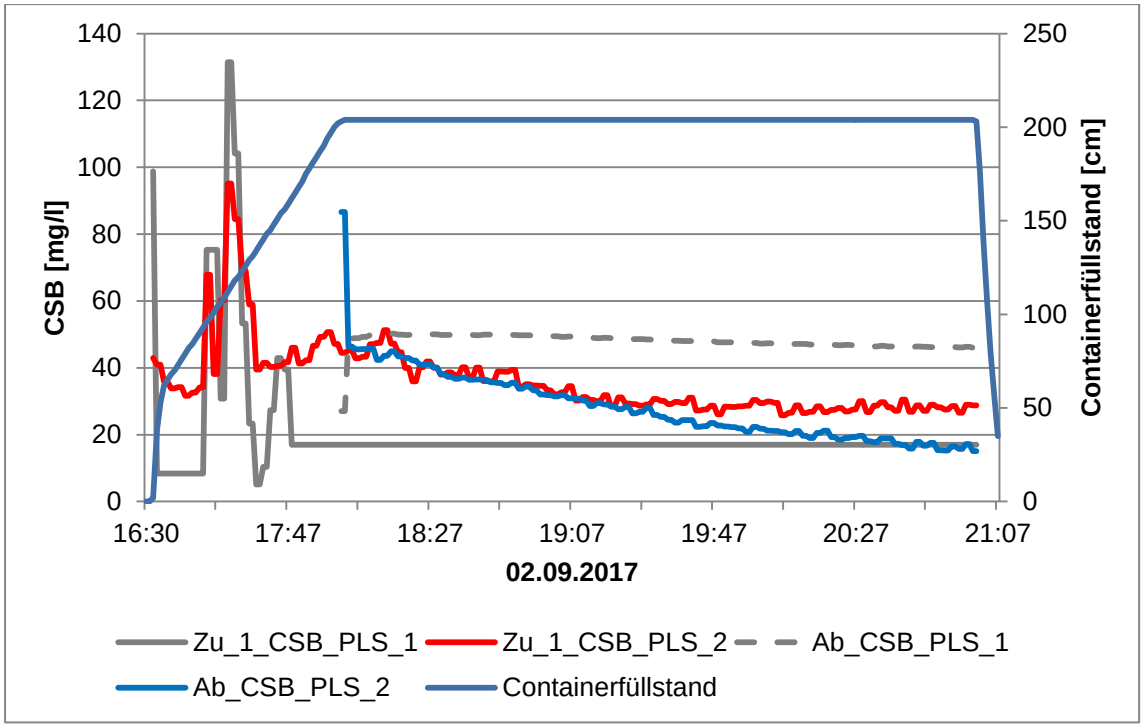


Abbildung 6.39: Ganglinien des Niederschlagsereignisses am 02.09.2017 – Sonde *Zu 1* und *Ab* – Parameter CSB – q_A = 1 m/h

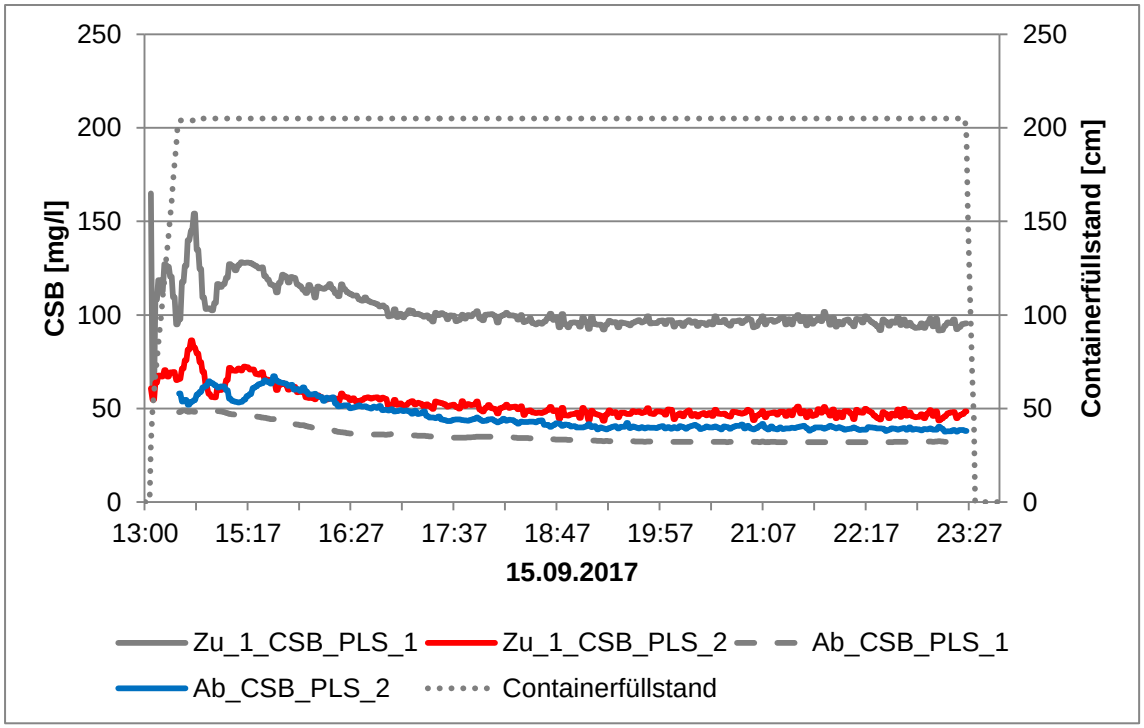


Abbildung 6.40: Ganglinien des Niederschlagsereignisses am 15.09.2017 – Sonde *Zu 1* und *Ab* – Parameter CSB – q_A = 3 m/h

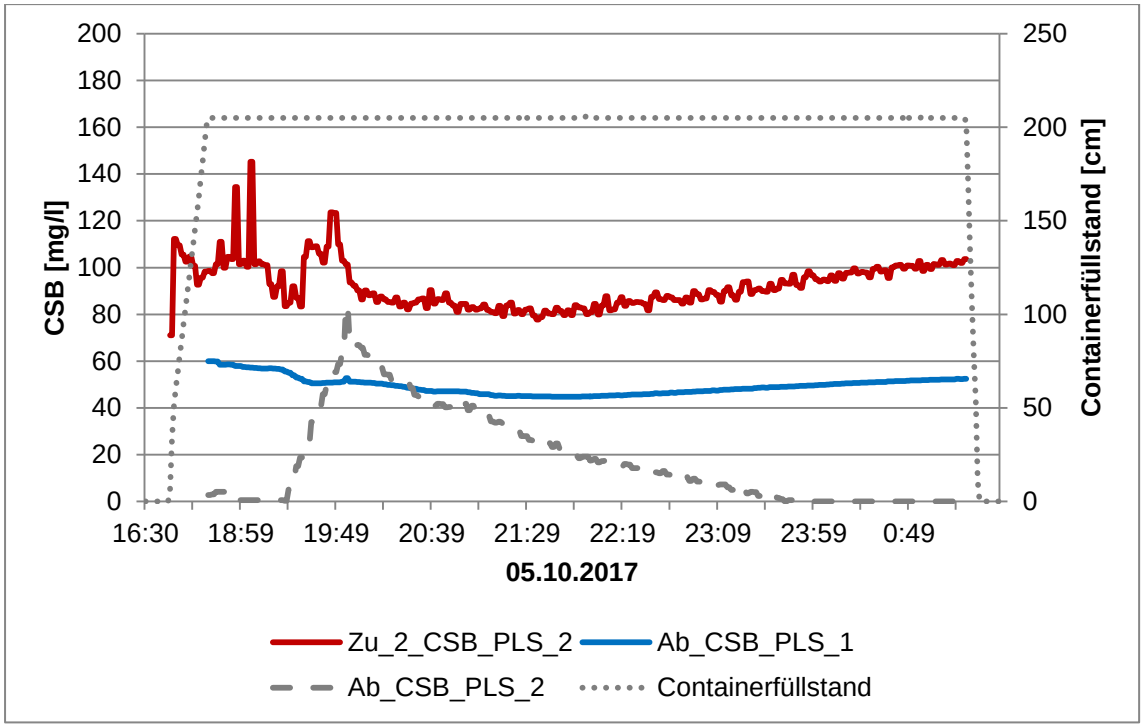


Abbildung 6.41: Ganglinien des Niederschlagsereignisses am 05.10.2017 – Sonde *Zu 2* und *Ab* – Parameter CSB – q_A = 3 m/h

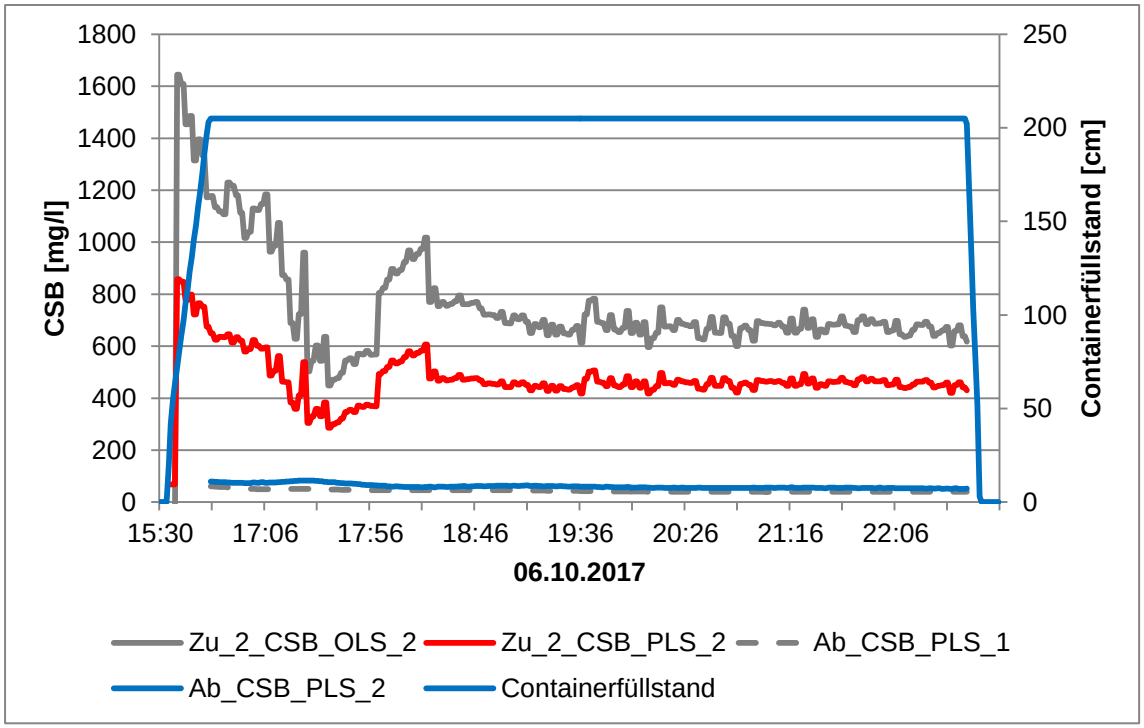


Abbildung 6.42: Ganglinien des Niederschlagsereignisses am 06.10.2017 – Sonde *Zu 2* und *Ab* – Parameter CSB – q_A = 3 m/h

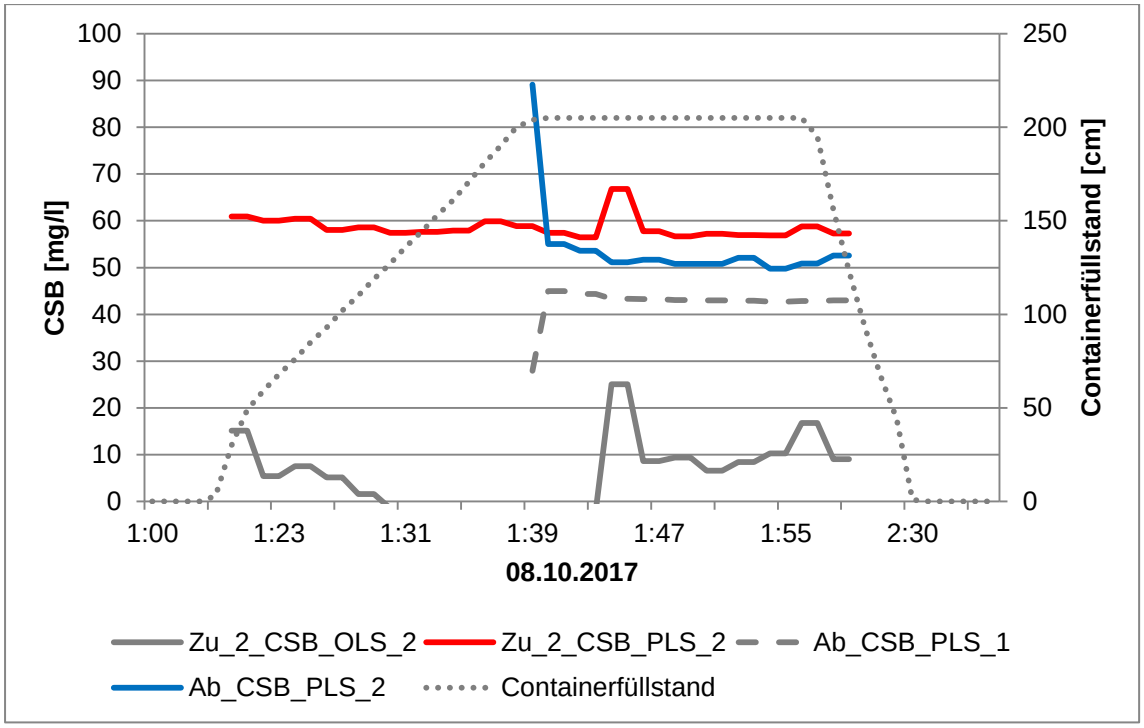


Abbildung 6.43: Ganglinien des Niederschlagsereignisses am 08.10.2017 – Sonde *Zu 2* und *Ab* – Parameter CSB – q_A = 3 m/h

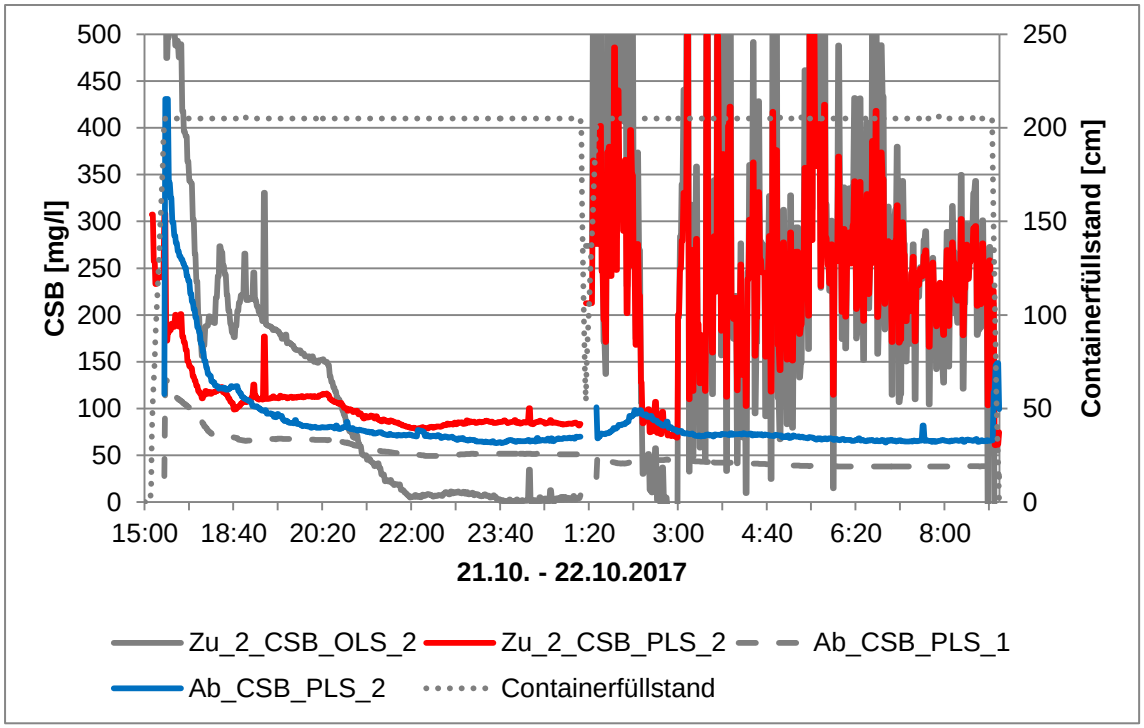


Abbildung 6.44: Ganglinien des Niederschlagsereignisses vom 21.10. bis 22.10.2017 – Sonde *Zu 2* und *Ab* – Parameter CSB – q_A = 4 m/h

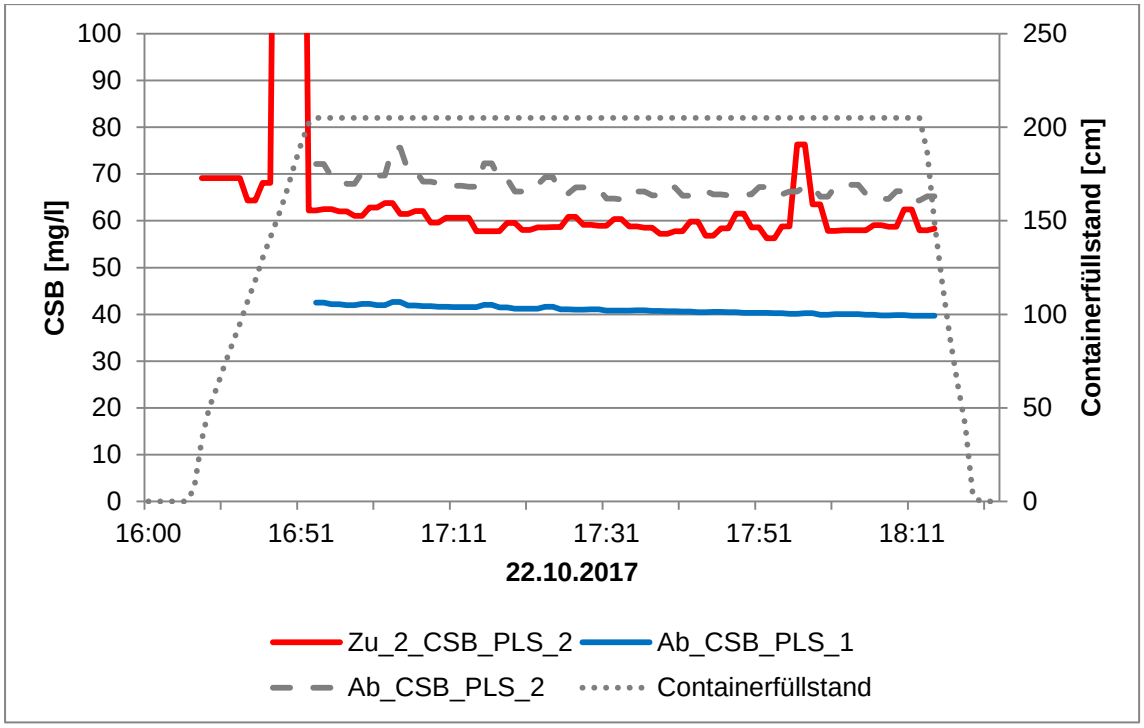


Abbildung 6.45: Ganglinien des Niederschlagsereignisses am 22.10.2017 – Sonde *Zu 2* und *Ab* – Parameter CSB – q_A = 4 m/h

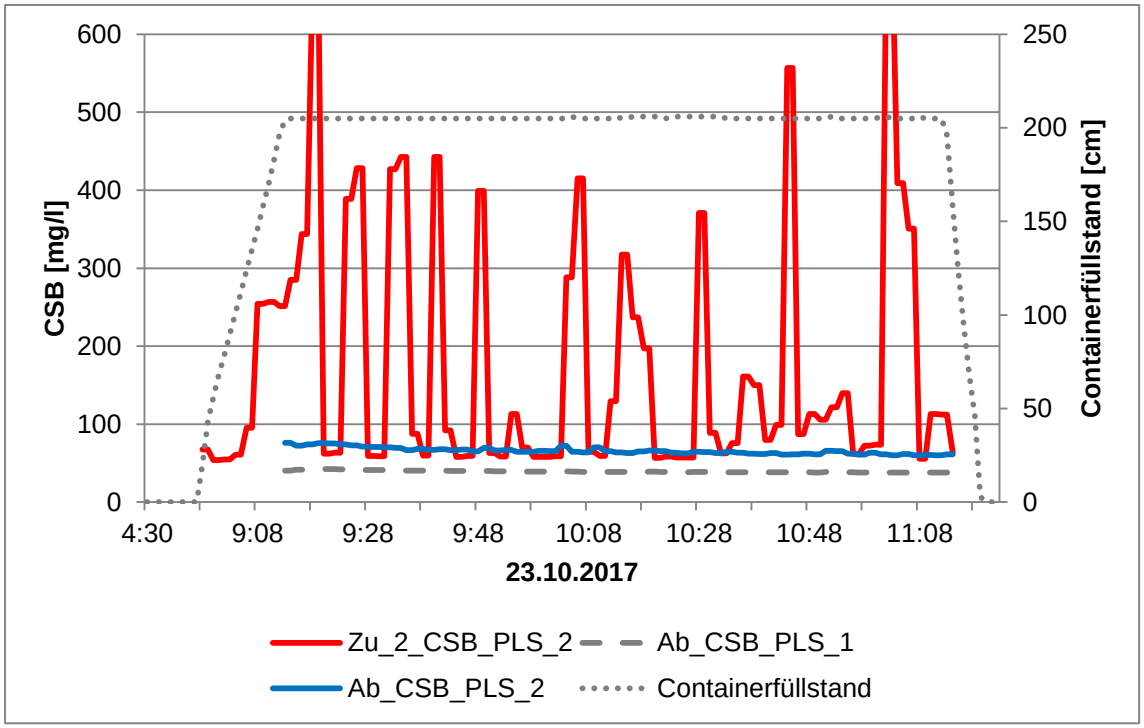


Abbildung 6.46: Ganglinien des Niederschlagsereignisses am 23.10.2017 – Sonde *Zu 2* und *Ab* – Parameter CSB – q_A = 4 m/h

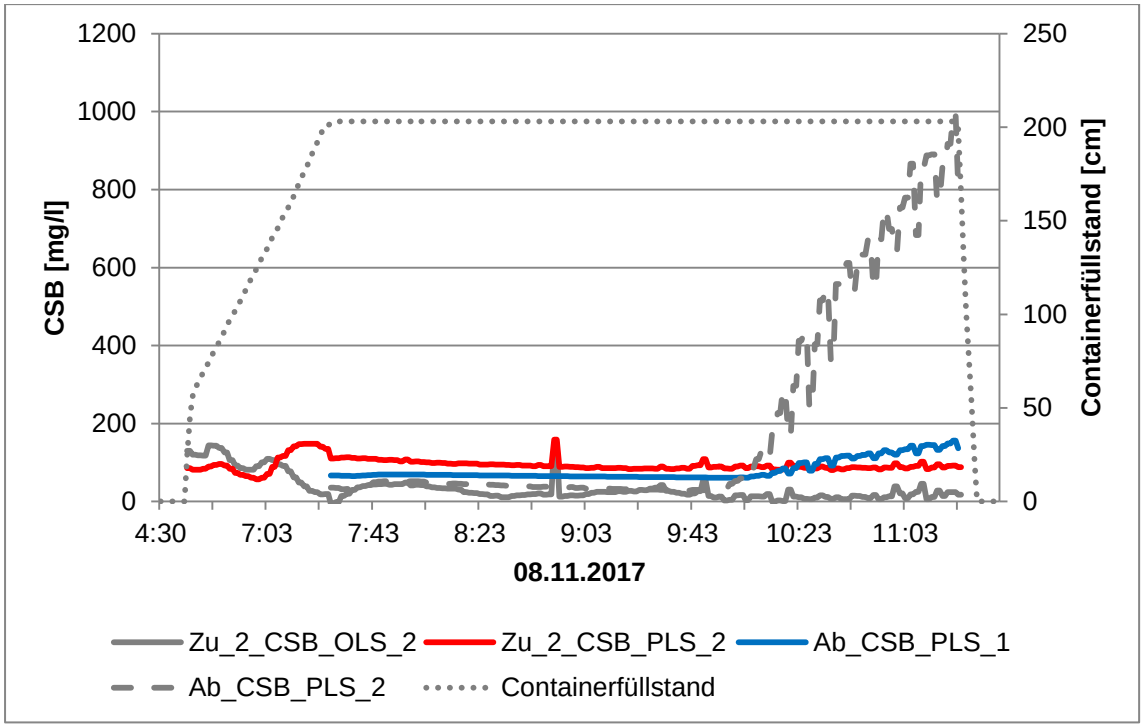


Abbildung 6.47: Ganglinien des Niederschlagsereignisses am 08.11.2017 – Sonde *Zu 2* und *Ab* – Parameter CSB – q_A = 1 m/h

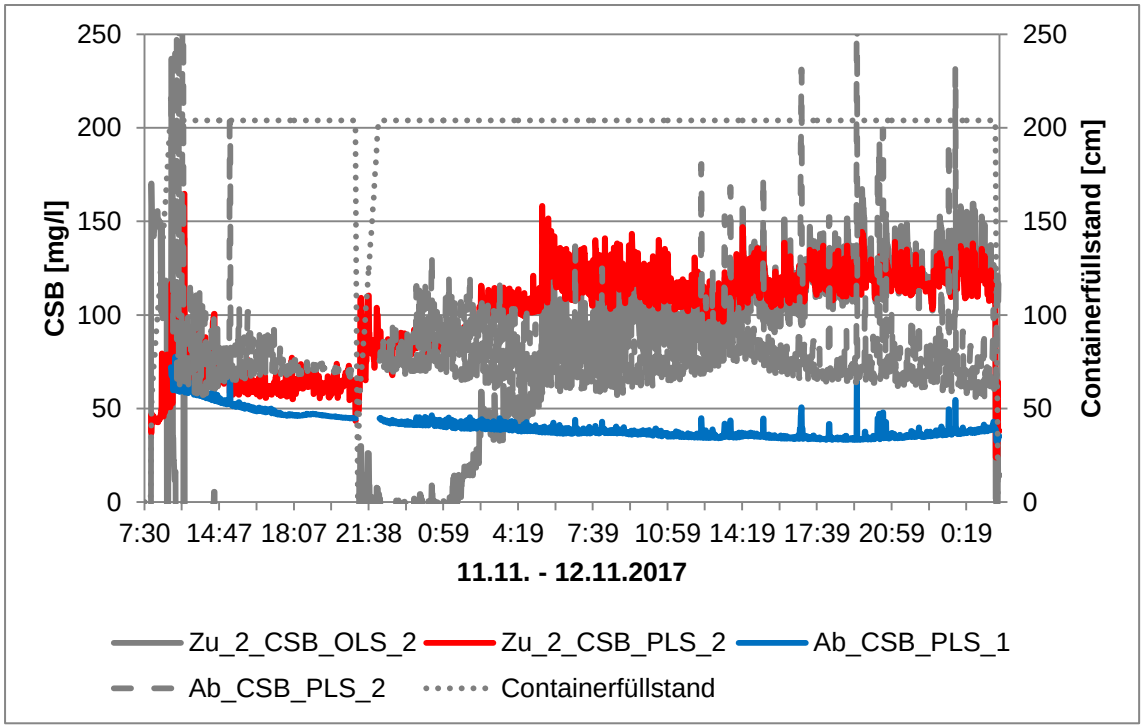


Abbildung 6.48: Ganglinien des Niederschlagsereignisses vom 11.11. bis 12.11.2017 – Sonde *Zu 2* und *Ab* – Parameter CSB – q_A = 1 m/h

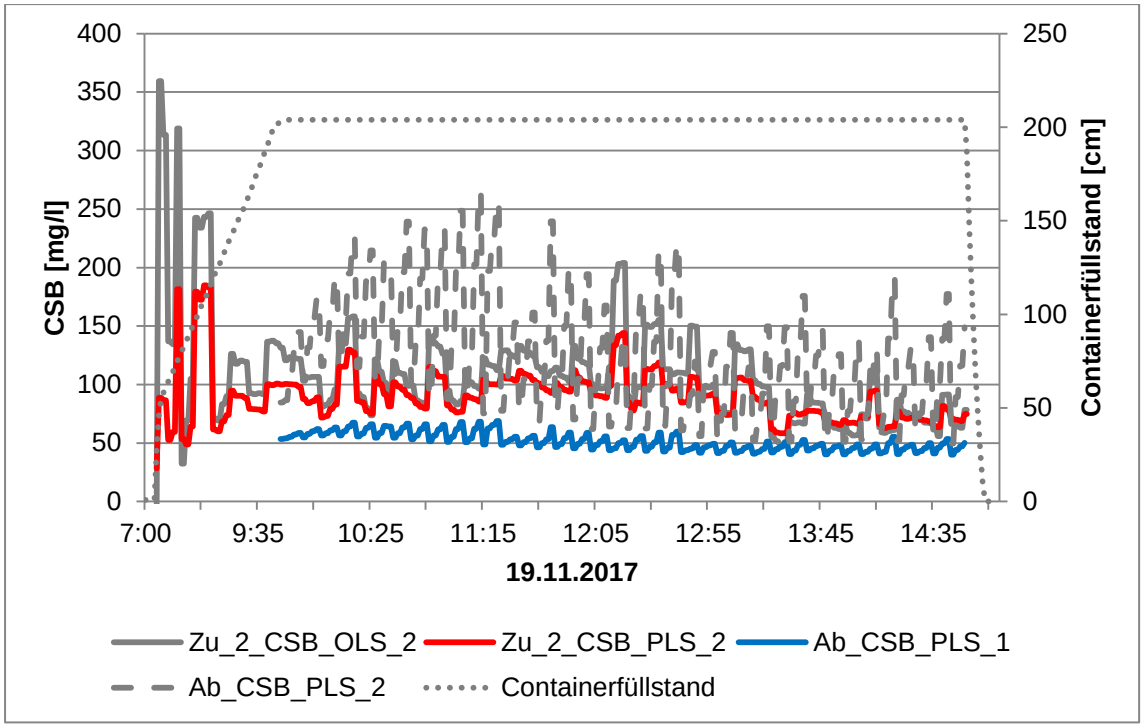


Abbildung 6.49: Ganglinien des Niederschlagsereignisses am 19.11.2017 – Sonde *Zu 2* und *Ab* – Parameter CSB – q_A = 1 m/h

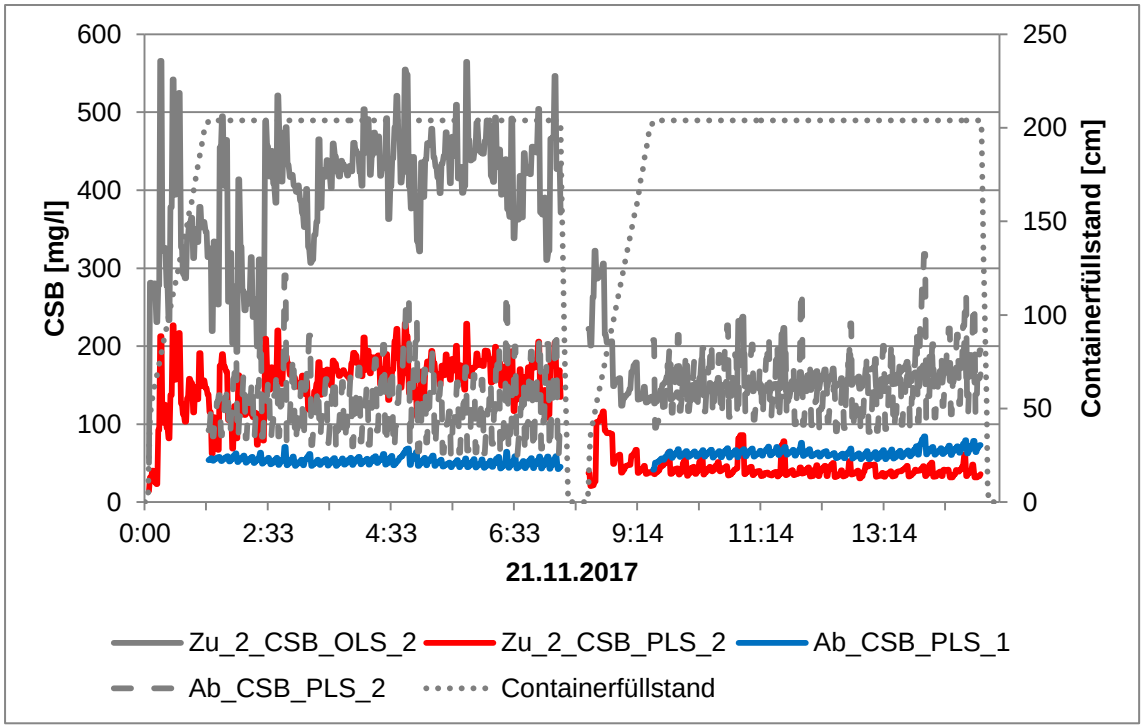


Abbildung 6.50: Ganglinien des Niederschlagsereignisses am 21.11.2017 – Sonde *Zu 2* und *Ab* – Parameter CSB – q_A = 1 m/h