

Regenwasserbehandlung in einer Großfilteranlage im Einzugsgebiet „In der Fleute“

Projektbericht

Auftraggeber

Stadt Wuppertal (Der Oberbürgermeister), vertreten durch
Wasser und Abwasser Wuppertal (WAW)

gefördert durch

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

Projektbearbeitung durch	Prof. Dr.-Ing. Helmut Grüning (Projektleitung) Fachhochschule Münster Institut für Wasser · Ressourcen · Umwelt Stegerwaldstraße 39 D-48565 Steinfurt Dr.-Ing. Klaus Hans Pecher Dr. Pecher AG Klinkerweg 5 40699 Erkrath Dipl.-Ing. Christian Massing WSW Energie & Wasser AG Bromberger Straße 39 - 41 42281 Wuppertal
--------------------------	--

15. August 2017

Regenwasserbehandlung in einer Großfilteranlage im Einzugsgebiet „In der Fleute“

Projektbeteiligungen

Antragstellung und Auftragsvergabe:	
Herr Dipl.-Ing. Robert Holstein	Stadt Wuppertal (Der Oberbürgermeister) Vertreten durch: Wasser und Abwasser Wuppertal (WAW) Johannes-Rau-Platz 1 42275 Wuppertal
Bearbeitung	
Wissenschaftliche Leitung und Bearbeitung:	
Prof. Dr.-Ing. Helmut Grüning Thorsten Schmitz M.Eng. Christian Schmidt M.Eng.	Fachhochschule Münster Institut für Wasser • Ressourcen • Umwelt Stegerwaldstraße 39 D-48565 Steinfurt
Wissenschaftliche Bearbeitung:	
Dr.-Ing. Klaus Hans Pecher Dipl.-Ing. Andreas Giga Dipl.-Ing. Katja Ines Fricke	Dr. Pecher AG Klinkerweg 5 40699 Erkrath
Betriebsführung:	
Dipl.-Ing. Christian Massing Dipl.-Ing. Thorsten Gigl Dipl.-Ing. Michael Kalz	WSW Energie & Wasser AG Bromberger Straße 39 - 41 42281 Wuppertal

Fördermittelgeber

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

Inhaltsverzeichnis

Verzeichnis der Abbildungen	III
Verzeichnis der Tabellen	V
1 Einleitung und Zielsetzung	1
1.1 Regenwasserbehandlung in trennentwässerten Gebieten	1
1.2 Organisation und Ziele des Projektes	2
2 Kenntnisstand zur Regenwasserfiltration	4
2.1 Erfahrungen zur Oberflächenabflussbehandlung mit Filtersystemen	4
2.2 Bisherige Erfahrungen in dezentral angeordneten Kompaktsystemen	5
2.3 Grundlegende Mechanismen der Filtration	6
2.4 Vorhandene Systeme und Betriebserfahrungen zur Regenwasserfiltration	7
3 Einzugsgebiet und konstruktive Gestaltung der Filteranlage	9
3.1 Einzugsgebiet und Zuflüsse	9
3.2 Konstruktion der Filteranlage	10
4 Messtechnik und Analytik	13
4.1 Kontinuierliche Messungen	13
4.1.1 Betriebsüberwachung durch Füllstandsmessungen im Zu- und Ablauf	13
4.1.2 Photometermessungen im Zu- und Ablauf	14
4.2 Probenahme und Analytik	17
4.2.1 Probenehmer Zu- und Ablauf	17
4.2.2 Parameteranalytik	18
5 Wirkung der Filteranlage und Betriebserfahrungen	19
5.1 Einflüsse auf den Betrieb und Projektverlauf	19
5.2 Bedingungen und Ergebnisse während der Betriebsphase I	20
5.3 Bedingungen und Ergebnisse während der Betriebsphase II	26
5.3.1 System- und Betriebsbedingungen	26
5.3.2 Systembelastung im Zeitraum von Juli bis November 2015	28
5.3.3 Auswertung der Rückhaltewirkung für beprobte Einzelereignisse mit besonderer Betrachtung der Schwermetalle	35
5.4 Bedingungen und Ergebnisse während der Betriebsphase III	42
5.5 Bedingungen und Ergebnisse während der Betriebsphase IV	45
6 Laboruntersuchungen zur Optimierung des Filtermaterials	49
6.1 Untersuchte Fragestellungen	49
6.2 Untersuchungskonzept und Beschreibung der Laboranlage zur Ermittlung des Feinstoffrückhalts	49
6.3 Untersuchungen im Labormaßstab mit dem Gesteinsmehl Millisil	50
6.4 Untersuchungen zur Rückhaltewirkung des Filtermaterials	52
6.4.1 Untersuchungen zur Anpassung und Optimierung des Filtermaterials	52
6.4.2 Maßnahmen zur Optimierung des Filteraufbaus	54
6.5 Untersuchung der Rückhaltekapazität des Filteraufbaus	55
6.6 Untersuchung zum Rückhalt gelöster Schwermetalle	55

7	Betriebliche Aspekte und Systemoptimierungen	58
7.1	Betriebserfahrungen	58
7.2	Konstruktive Systemoptimierung des Filterbauwerks	58
7.2.1	Gestaltung des Einlaufbereiches und Zuflussdrosselung	58
7.2.2	Schlammammelraum und Filterstraßen	59
7.2.3	Ableitung des Entlastungsabflusses	60
7.2.4	Bauwerksgestaltung und Filteraufbau	61
7.3	Betriebsaufwand und Betriebskosten	62
7.4	Entsorgungsmöglichkeiten	63
8	Schlussfolgerungen und Ausblick	65
9	Literatur	67

Verzeichnis der Abbildungen

Bild 1:	Einzugsgebiet der Großfilteranlage „In der Fleute“ in Wuppertal	9
Bild 2:	Flächenbeispiele im Einzugsgebiet des Filterbeckens „In der Fleute“	10
Bild 3:	Grundriss Großfilteranlage „In der Fleute“ in Wuppertal	11
Bild 4:	Längsschnitt Großfilteranlage „In der Fleute“ in Wuppertal	11
Bild 5:	Großfilteranlage „In der Fleute“ in Wuppertal Blick Zulauf (links) und Blick Ablauf (rechts).....	12
Bild 6:	Füllstandsmessung im Zulauf der Filteranlage „In der Fleute“	13
Bild 7:	Füllstandsmessung im Ablaufbereich der Filteranlage „In der Fleute“	13
Bild 8:	Beispielhafte Darstellung der Füllstände im Zu- und Ablauf der drei Filterstraßen (Messdatenserver)	14
Bild 9:	Installationsort Photometersonde Zulauf Großfilteranlage	15
Bild 10:	Anordnung der Photometersonde im Ablaufbereich.....	15
Bild 11:	Bedienrechner (Fa. s::can) und Datenfernübertragungseinheit im Schaltschrank auf dem Betriebsgelände des Filters	16
Bild 12:	Kontinuierliche Messdatenerfassung im Zu- und Ablaufbereich (Darstellung Messdatenserver)	16
Bild 13:	Probenehmer (Fa. Bühler) auf dem Betriebsgelände der Filteranlage.....	17
Bild 14:	Exemplarischer Filteraufbau der mittleren Filterstraße.....	19
Bild 15:	Einbau Filtermaterial unterste Lage am 15.05.2014.....	21
Bild 16:	Einbau Filtermaterial mittlere (links) und obere Lage (rechts) am 15.05.2014.....	21
Bild 17:	Niederschlag (oben) und im Zulaufbereich des Filterbeckens gemessene Füllstandsganglinie (unten) im Zeitraum von Juni 2014 bis Juli 2015	22
Bild 18:	Hygieneartikel (linkes Foto vom 25.06.2014) und Biofilmbildung im Einlaufbereich (rechtes Foto vom 03.07.2014).....	22
Bild 19:	Hygieneartikel in der Filterstraße (linkes Foto vom 31.07.2014) und entfernte Ablagerungen (rechtes Foto vom 14.08.2014)	23
Bild 20:	Zulaufsituation am 14.08.2014 (linkes Foto) und am 18.08.2014 (rechtes Foto)	23
Bild 21:	Zulaufsituation am 08.09.2014 (linkes Foto) und am 23.09.2014 (rechtes Foto)	24
Bild 22:	Ausbau des stark verunreinigten Filtermaterials am 07.07.2015	24
Bild 23:	Detailansicht des verunreinigten Filtermaterials beim Ausbau am 07.07.2015.....	25
Bild 24:	Schlammablagerungen im Sedimentationsraum im Zulaufbereich	25
Bild 25:	Schlammablagerungen im Sedimentationsraum der Filterstraßen	25
Bild 26:	Einbau der untersten beiden Filterschichten am 09.07.2015 Versuchsphase II	26
Bild 27:	Einbau oberste Filterschicht und Filtermatte am 09.07.2015	27
Bild 28:	Zulaufsituation am 28.07.2015 (linkes Foto) und am 09.11.2015 (rechtes Foto)	27
Bild 29:	Zulaufsituation 16.11.2015 (linkes Foto) und 04.12.2015 (rechtes Foto)	28
Bild 30:	Daten des Niederschlagsschreibers „Zu den Dolinen“ in Wuppertal 7. Juli bis zum 23. November 2015	29
Bild 31:	Schwellenwertüberschreitungen im Zulauf und Niederschlagsereignisse	30
Bild 32:	Darstellung der jeweiligen Volumenanteile	32
Bild 33:	Geometrie des Filterbauwerks.....	32
Bild 34:	Überschreitung des behandlungspflichtigen Abflusses Q_{krit} von 127,1 l/s	33
Bild 35:	AFS _{aq} -Konzentration im Zu- und Ablauf sowie Niederschlag im Zeitraum vom 7. Juli bis zum 23. November 2015	35
Bild 36:	Beispiel eines Einzelereignisses am 22.10.2015 mit Darstellung der AFS _{aq} - Konzentrationen im Zu- und Ablauf (oben) und dem Füllstand im Zulaufbereich (mitte) sowie dem Niederschlag (unten)	36

Bild 37:	Messergebnisse für ein Regenereignis mit Probenahme am 29.07.2015 (bei dem Peak der Ablaufkonzentration um ca. 17:10 handelt es sich um einen Messfehler)	37
Bild 38:	Ergebnisse der Messungen mit Photometersonden für ein Regenereignis mit ergänzender Probenahme am 04.08.2015	39
Bild 39:	Schichtaufbau mit Zeolith 1 (8-16 mm) und Zeolith 2 (8-10 mm)	43
Bild 40:	Filtermatten im Randbereich der Filterstraßen	44
Bild 41:	Kontinuierlicher Anstieg des Füllstands im Zulauf nach dem Einbau am 13.05.2016 bzw. 19.05.2016 (13.05.2016 – 11.06.2016)	44
Bild 42:	Wiederherstellen der Durchlässigkeit der Filteranlage durch Lösen der Auftriebssicherung	45
Bild 43:	Die durchlässige neue Filtermatte (oben) und die undurchlässigere alte Filtermatte (unten)	45
Bild 44:	Darstellung der AFS _{aq} -Werte (13.12.16) die auf eine mögliche Fehleinleitung im Einzugsgebiet Fleute hinweisen	46
Bild 45:	AFS _{aq} -Konzentrationen im Zu- und Ablauf des Filters "In der Fleute" am 07.02.2017	47
Bild 46:	AFS _{aq} -Konzentrationen im Zu- und Ablauf der Filteranlage "In der Fleute" am 19.02.2017	48
Bild 47:	Modellfilter im Labor für Urbanhydrologie und Wasserversorgung	50
Bild 48:	Kalibrierkurve der Trübungssonde (Jumo ecoLine NTU) zur AFS-Messung in der Laboranlage	51
Bild 49:	Ergebnis der Untersuchungen zum Rückhalt von Millisil in der Versuchsanlage ausschließlich durch Sedimentation	52
Bild 50:	Vergleichende Gegenüberstellung der Feststoff-Ablaufkonzentration bei verschiedenen Filtern im Vergleich zur Konzentration ohne Filter	54
Bild 51:	Schema des Säulen-Versuchsaufbaus zur Untersuchung des Schwermetallrückhalts	56
Bild 52:	Reduzierung der Schwermetallkonzentration unterschiedlicher Filtersubstrate bei einer Regenspende von 6l/s · ha	57
Bild 53:	Schlammablagerungen Filterstraße (Foto vom am 07.07.2015)	60
Bild 54:	Sediment oberhalb des Filters nach Regenereignis (Foto vom 08.09.2014)	60
Bild 55:	Algenbildung auf dem Gitterrost der mittleren Filterstraße (Foto vom 31.07.2014)	61

Verzeichnis der Tabellen

Tabelle 1:	Nutzungsspezifische Aufteilung der abflusswirksamen Flächen	10
Tabelle 2:	Regenereignisse im Zeitraum vom 7. Juli bis zum 23. November 2015	28
Tabelle 3:	Zugeflossenes Volumen im Zeitraum vom 7. Juli bis zum 23. November 2015.....	29
Tabelle 4:	Anzahl der Einstauereignisse (Füllstand > 2 cm) im Zeitraum von Juli bis November 2015	30
Tabelle 5:	Anzahl Entlastungsereignisse (Füllstand > 78,6 cm) im Zeitraum von Juli bis November 2015	31
Tabelle 6:	Bilanzierung des zugeflossenen und des behandelten Volumens in der Zeit vom 7. Juli bis zum 23. November 2015	31
Tabelle 7:	Mittlere AFS _{aq} -Konzentration im Zu- und Ablauf (fremdwasserbereinigt und ohne Entlastungsereignisse)	33
Tabelle 8:	Mittlere AFS _{aq} -Konzentration im Zu- und Ablauf (inkl. Fremdwasser und Entlastungsereignisse).....	34
Tabelle 9:	Schwermetallkonzentrationen im Zu- und Ablauf sowie Reduzierung der Schwermetallkonzentrationen (Ereignis am 29.07.2015)	38
Tabelle 10:	Mittlere Schwermetallkonzentrationen im Zu- und Ablauf und Reduzierung der Schwermetalle bei einem Regenereignis am 04.08.2015	40
Tabelle 11:	Gemessene Spannbreite der Konzentration und Zusammensetzung der Schwermetalle im Zulauf.....	40
Tabelle 12:	Aus sechs beprobten Einzelereignissen ermittelte Reduktion von Schwermetallen (Darstellung als Median)	41
Tabelle 13:	Stoffdaten des Quarzmehles Millisil W4	50

1 Einleitung und Zielsetzung

1.1 Regenwasserbehandlung in trennentwässerten Gebieten

Die Behandlung von Oberflächenabflüssen innerhalb trennentwässerter Gebiete erfolgte in den vergangenen Jahrzehnten in erster Linie durch Regenklärbecken. Für kleinere Einzugsgebiete sind seit einigen Jahren kompakte Anlagen verfügbar, die eine Behandlung an dezentralen Standorten ermöglichen. Bei besonderen Anforderungen aufgrund hoher Verunreinigung der Oberflächenabflüsse (Flächen der Kategorie III) besteht die Möglichkeit bzw. die Forderung, dass eine Behandlung in der Kläranlage oder in einem Retentionsbodenfilter (RBF) erfolgen muss. Die bisherigen Behandlungsmöglichkeiten weisen u. a. folgende Einschränkungen auf:

- ▶ Die hydraulische Aufnahmekapazität der Kläranlagen ist etwa auf den doppelten Trockenwetterzufluss beschränkt. Insofern ist eine Behandlung von Oberflächenabflüssen nur in eingeschränktem Umfang möglich.
- ▶ Regenklärbecken mit Dauerstau haben sich nicht bewährt.
- ▶ Regenklärbecken ohne Dauerstau weisen eine bessere Reinigungswirkung auf als Regenklärbecken mit Dauerstau. Allerdings stellen dauerhafte Fremdwasserzuflüsse hier ein maßgebliches Problem dar, weil das Becken bereits durch den ständigen Zufluss gefüllt ist. Die zusätzliche Aufnahme und Behandlung der eigentlichen verunreinigten Oberflächenabflüsse ist in diesem Fall nicht gewährleistet.
- ▶ Retentionsbodenfilter ermöglichen eine weitgehende Reinigung, sind aber auch durch einen nennenswerten Betriebsaufwand sowie durch einen hohen Flächenbedarf gekennzeichnet. Im eng bebauten urbanen Raum sind die erforderlichen Flächen nicht verfügbar. Darüber hinaus können dauerhafte Fremdwasserzuflüsse zu einer Kolmation der Anlagen führen.
- ▶ Dezentral angeordnete Kompaktsysteme führen systembedingt zu einer höheren Anzahl von Betriebspunkten. Für die inzwischen hohe Anzahl unterschiedlicher Systeme fehlen teilweise langfristige Wirknachweise und Betriebserfahrungen.

Weitergehende Möglichkeiten der Regenwasserbehandlung werden derzeit u. a. durch konstruktive Optimierungen untersucht. Dazu zählen folgende Projekte: Maßnahmen zur Ertüchtigung von Regenklärbecken - NRW-MEREBEN (Voßwinkel und Mohn, 2017) oder Optimierung des Feststoffrückhalts im Trennsystem durch Schrägklärer - „Opti-Trenn (Fuchs und Kemper, 2016). Für einige der dezentral angeordneten Kompaktsysteme mit Filtereinheiten, die eine effektive Niederschlagswasserbehandlung ermöglichen, liegen inzwischen mehrjährige Betriebserfahrungen vor (Grüning et al., 2010 sowie Sommer et al., 2014 oder Werker, 2015). Untersuchungen von zentralen Regenwasserfiltern für größere Einzugsgebiete in großtechnischen Anlagen fehlen bislang oder sind aufgrund betrieblicher Einschränkungen nicht weiterverfolgt worden (Brombach und Weiß, 2007).

Bei dauerhaftem Fremdwasserzufluss ist bislang entweder das eingeschränkt wirkende Regenklärbecken im Dauerstau oder eine relativ aufwändige qualitätsbasierte Steuerung möglich, um Regenwasser zu behandeln. Bei der qualitätsbasierten Steuerung wird durch kontinuierliche Parametermessung der unbelastete Fremdwasserabfluss im Bypass an einem Regenklärbecken ohne Dauerstau vorbei geleitet. Kommt es nach Regenbeginn zu verunreinigten Oberflächenabflüssen, werden diese in das Becken geleitet. Inzwischen werden in Wuppertal Steuerungen von RKBoD durch Photometermessungen im Zulauf mit Bypassführung des sauberen Zuflusses erprobt. Mit dieser Lösung sind allerdings ein entsprechender Betriebsaufwand und nennenswerte Kosten verbunden. Als Alternative zu diesen Systemen ist eine Filterung des abfließenden Niederschlags- und Fremdwassers möglich. Die Behandlung in technischen Filtern ermöglicht eine deutlich wirksamere Reinigung des Niederschlagswassers als die Behandlung in Anlagen mit reiner Absetzwirkung. Neben partikulären Stoffen können

im Filter auch gelöste Stoffe zurückgehalten werden. Außerdem wird bei diesen Systemen der komplette Volumenstrom behandelt. Bei einer gesteuerten Lösung erfolgt die Behandlung erst ab einem zu definierenden Grenzwert.

Die Zielvorgaben der EG-Wasserrahmenrichtlinie erfordern zusätzliche Anstrengungen im Bereich der Regenwasserbehandlung. Konventionelle Maßnahmen reichen hier nicht aus. In Nordrhein-Westfalen fällt es schwer die Vorgaben zur Erreichung des guten ökologischen Zustands/Potenzials und des guten chemischen Zustands einzuhalten. In die Bewertung des ökologischen Zustands fließen die sogenannten flussgebietsspezifischen Schadstoffe ein. Unter ihnen sind die Schwermetalle Zink und Kupfer. Zink führt zu einer „mäßigen“ Beurteilung für 24 % der Gewässerlänge und Kupfer auf 8 % der Gewässerlänge der Oberflächengewässer in NRW (MKULNV, 2016). Haupteintragspfad dieser beiden Schwermetalle sind Oberflächenabflüsse von befestigten Flächen. Zink wird in NRW zu 65 % durch Oberflächenabflüsse aus trennentwässerten Gebieten emittiert und Kupfer zu 58 % (Odenkirchen, 2017). Hinzu kommen noch Einträge durch Abflüsse von außerörtlichen Straßen. Dies zeigt die Signifikanz der Oberflächenabflüsse für diese Schadstoffe, die auch durch Weiterentwicklungen von Regenklärbecken mit verbesserter Sedimentationsleistung nicht in ausreichendem Umfang zurückzuhalten sein werden. Ein erheblicher Anteil der Schwermetalle liegt gelöst im Abfluss vor. Die Literaturangaben des gelösten Anteils in Oberflächenabflüssen für Zink und Kupfer schwanken zwischen etwa 25 % bis über 90 % (vgl. Huth et al., 1995; Herrmann et al., 1992; Manson et al., 1999). Zumindest an besonders kritischen Standorten wird daher die Etablierung von Filtersystemen erforderlich sein.

1.2 Organisation und Ziele des Projektes

Die Untersuchung eines technischen Filters zur zentralen Regenwasserbehandlung wird im Rahmen dieses Projektes für ein fast 27 ha großes Einzugsgebiet in Wuppertal durchgeführt. Aufgrund des ständigen Fremdwasserzuflusses wurde statt des ursprünglich geplanten RKB eine Filteranlage konzipiert. Die Anlage behandelt die Oberflächenabflüsse vor der Einleitung in den Schwelmestollen und nachfolgend in die Schwelme bzw. Wupper. Eine kurzfristige Beseitigung des kontinuierlichen Fremdwasserabflusses war aufgrund der komplexen Einflüsse nicht möglich.

Die Entwässerung des Wuppertaler Stadtgebietes erfolgt zum größten Teil im Trennverfahren. Damit ist Wuppertal eine der wenigen Großstädte in NRW, die diese zukünftige Art der Siedlungsentwässerung bereits weitgehend betreibt. Die dichte Besiedlung mit intensiver Flächennutzung erfordert in Wuppertal umfangreiche Maßnahmen zur Regenwasserbehandlung. An zahlreichen Stellen im Stadtgebiet sind inzwischen dezentrale bzw. semizentrale Systeme zur Regenwasserbehandlung angeordnet worden. Dabei handelt es sich u. a. um Filterschächte des Systems FiltaPex®. Die Anschlussflächen dieser bislang eingebauten Schachtsysteme umfassen einen Bereich von einigen 100 m² bis zu mehreren Hektar.

Mit dem Forschungs- und Entwicklungsvorhaben

Regenwasserbehandlung in einer Großfilteranlage im Einzugsgebiet „In der Fleute“

hat das Ministerium für Klimaschutz, Umwelt, Landwirtschaft, Natur- und Verbraucherschutz des Landes Nordrhein-Westfalen die Untersuchung eines Filters zur Regenwasserbehandlung an einem zentralen Standort gefördert. Projektpartner dieses Verbundprojektes und deren Aufgaben sind:

Stadt Wuppertal	FH Münster	Dr. Pecher AG	WSW AG
Herr Dipl.-Ing. R. Holstein (Wasser und Abwasser Wuppertal)	Prof. Dr.-Ing. H. Grüning T. Schmitz M. Eng. C. Schmidt M. Eng.	Dr. K.-H. Pecher Dipl.-Ing. A. Giga (bis 10/2016) Dipl.-Ing. Katja Raith	Dipl.-Ing. C. Massing Dipl.-Ing. U. Schaub Dipl.-Ing. M. Kalz
Antragstellung, Finanzierung und Koordination	Wissenschaftliche Leitung Laboranlage zur Betriebsoptimierung Betriebsbegleitung Auswertung und Dokumentation	Einbau und Betriebsbegleitung des Filters Wartung und Betrieb der Messtechnik Probenahme Systemoptimierung	Einbau und Betriebsbegleitung des Filters Messtechnische Ausrüstung Begleitung und Optimierung des Betriebs Analytik

Bisher wird die Behandlung von behandlungspflichtigen Niederschlagswasser durch Filteranlagen in vergleichsweise kleinen Anlagen an dezentralen Standorten realisiert. Somit waren bislang der gesamte Betriebsprozess und Untersuchungen auf diese kompakten Bauwerke limitiert und entsprechende Betriebserfahrungen und Planungshinweise für größere Einzugsgebiete nicht verfügbar. Bei der Entwicklung technischer Filter zur Niederschlagswasserbehandlung ist die Auseinandersetzung mit folgenden Fragestellungen erforderlich:

- ▶ Welche Möglichkeiten der chemisch-physikalischen Niederschlagswasserbehandlung von stark belasteten Oberflächenabflüssen (Kategorie IIb und III) bestehen?
- ▶ In welchem Umfang ist der Rückhalt von Stoffen mit schädigender Wirkung, die speziell in Oberflächenabflüssen enthalten sind (Kohlenwasserstoffe, Schwermetalle sowie diverse Bauchemikalien) möglich?
- ▶ In welchem Umfang ist der Rückhalt von feinen Partikeln (AFS63) im Vergleich zu eingeschränkt wirksamen herkömmlichen Anlagen (Regenklärbecken) möglich?
- ▶ Welche Rückhaltewirkung ist mit diesen speziell für den urbanen Raum zu entwickelnden technischen Filtern, im Vergleich zu Retentionsbodenfiltern mit hohem Flächenbedarf und vegetationsspezifischen Anforderungen möglich?
- ▶ Ist der Einsatz auch bei Fremdwasserzufluss ohne hohen messtechnischen Aufwand mit Bypasslösung, der bei Regenklärbecken ohne Dauerstau erforderlich wäre, langfristig möglich?

Neben der Systementwicklung und den jeweiligen Wirknachweisen ist als erster Schritt die Erhebung und Optimierung der betrieblichen Aufwendungen für technische Regenwasserfilter im zentralen Maßstab (TRF) zu klären. Dies ist ein wesentliches Ziel dieses Vorhabens. Dabei werden vor allem folgende Bereiche betrachtet:

- ▶ Betriebsdauer: Zielgröße ist dabei der Zeitraum eines Jahres, bis zum Austausch bzw. zur Regeneration des Filtermaterials. Es wird untersucht, ob diese Zeiträume für ein Filtersystem an einem zentralen Standort möglich sind.
- ▶ Kosten: Neben dem Filtermaterial werden die Betriebskosten in die Bewertung einbezogen. Es wird untersucht in welchem Umfang sich die betrieblichen Aufwendungen von einem herkömmlichen Regenklärbecken unterscheiden.
- ▶ Einbau und Wartung: In enger Abstimmung mit den Mitarbeitern des Kanalbetriebs werden der Aufwand für die jeweiligen Maßnahmen erhoben und optimiert.
- ▶ Entsorgung: Möglichkeiten zur Entsorgung des Filtermaterials

2 Kenntnisstand zur Regenwasserfiltration

2.1 Erfahrungen zur Oberflächenabflussbehandlung mit Filtersystemen

Der Rückhalt molekular bis grob disperser Abwasserinhaltsstoffe kann nur durch Behandlungssysteme erfolgen, die neben rein sedimentativen Rückhalteeffekten auch physikalisch-chemische Wirkmechanismen, wie z. B. Fällung und Flockung, aufweisen oder adsorptiv wirken. Viele Aspekte sind bisher jedoch ungeklärt (Grüning und Schmitz, 2017). Vor dem Hintergrund, dass Niederschlagswasserbehandlungsanlagen meist für eine Nutzungsdauer von mehreren Jahrzehnten konzipiert werden, ist die kritische Auseinandersetzung mit der Zukunftssicherheit und Nachhaltigkeit solcher Anlagen erforderlich. Eine zentrale Behandlung von Niederschlagsabflüssen durch Filtration erfolgt bislang ausschließlich durch Retentionsbodenfilter. Hierbei ist ein hoher Wirkungsgrad bei den organischen Stoffen möglich. Allerdings sind die saisonal abhängige Wirkung und der vergleichsweise hohe Platzbedarf nachteilig. Letzterer stellt gerade in dicht besiedelten urbanen Räumen ein Problem dar.

Gelöste Stoffe sowie Spurenstoffe im Niederschlagsabfluss stehen bislang noch wenig im Fokus der Planung und Dimensionierung von dezentralen Regenwasserbehandlungsanlagen, die nur teilweise mit einem Filtersystem ausgerüstet sind. Die Wirkung von dezentralen Sedimentationsanlagen, bei denen sich die Behandlungsmechanismen wie bei klassischen Regenklärbecken auf Sedimentationsprozesse beschränken, ist vor diesem Hintergrund kritisch zu hinterfragen.

Während die von den Straßenflächen abgespülten anthropogenen Schadstoffe wie Schwermetalle, MKW und PAK bereits Teil aktueller Untersuchungen sind, werden Auswaschungen von Gebäudeteilen, dazu gehören Schwermetalle (z. B. Von Metalldächern, Dachrinnen) oder Emissionen von Fahrzeugen (z. B. Antiklopfmittel) in gelöster Form, als auch Additive aus Flachdachabdichtungen, Biozide aus Fassadenfarben, Wärmedämmverbundsystemen o.ä. sowie weitere Bauchemikalien und Nanopartikel bislang noch kaum betrachtet. Erste Untersuchungen zu Niederschlagswasserbehandlungssystemen im dezentralen Bereich durch das Land NRW wurden unter anderem im Rahmen des Forschungs- und Entwicklungsvorhabens „Reduktion von Kohlenwasserstoffen und anderen organischen Spurenstoffen durch ein dezentrales Behandlungssystem für Verkehrsflächenabflüsse“ (Ruhr-Universität Bochum / TU München / Dr. Pecher AG) gefördert.

Neben den kompakten dezentral angeordneten Filtrationsanlagen bietet ein technischer Regenwasserfilter im zentralen Maßstab aufgrund der chemisch-physikalischen Wirkprozesse einen über den Verlauf eines Jahres weitgehend konstanten Rückhalt auch von gelösten Stoffen bei vergleichsweise geringem Platzbedarf. Speziell für Oberflächenabflüsse von Flächen der Kategorie III sind bislang nur eingeschränkte Lösungen mit adäquater Wirkung verfügbar. Die Ableitung von Oberflächenabflüssen zur Kläranlage sollte nur eine Ausnahme darstellen. Somit stellt eine zentrale technische Filtrationsanlage für den wirksamen Rückhalt von Feinststoffen ($< 63 \mu\text{m}$) und gelösten Stoffen eine notwendige Ergänzung der bisherigen Behandlungsmöglichkeiten dar. Gegenüber herkömmlichen Regenklärbecken, die ausschließlich durch Sedimentation wirken, ist somit durch einen Filter eine erforderliche weitergehende Möglichkeit zur Behandlung belasteter Oberflächenabflüsse gegeben. Die uneingeschränkte Anwendung derartiger Systeme erfordert jedoch noch eine Reihe von Untersuchungen, um die konstante Wirkung bei hohen betrieblichen Ansprüchen zu gewährleisten. Wesentlicher ist dabei die Akzeptanz des erforderlichen geänderten betrieblichen Aufwandes im Vergleich zu herkömmlichen Regenklärbecken, der unter anderem durch den Wechsel des Filtermaterials erforderlich ist.

2.2 Bisherige Erfahrungen in dezentral angeordneten Kompaktsystemen

Bei der dezentralen Regenwasserbehandlung sind Filtersysteme bereits seit einigen Jahren im Einsatz. Beispiele dafür sind:

- ▶ Straßenablaufeinsätze
- ▶ Filterschachtsysteme
- ▶ Einlaufrinnen mit Filtersubstrat

Da es sich bei diesen Systemen um kommerzielle Entwicklungen handelt, deren Bemessung bislang nicht durch Bemessungsrichtlinien geregelt wird (und wahrscheinlich aufgrund der individuellen Systemspezifika auch zukünftig nicht allgemeingültig einfach geregelt werden kann), sind die Genehmigungsbehörden teilweise verunsichert. Die häufig geforderte Bauartzulassung der Systeme gewährleistet im gewissen Rahmen die Qualität der Systeme, ist aber für die erforderliche Variabilität im Bereich der Regenwasserbehandlung nicht immer nützlich. Eine bauliche Anpassung der Anlage oder eine Änderung des Filteraufbaus zur Berücksichtigung ortsspezifischer Bedingungen ist streng genommen immer mit einem aufwändigen und auch kostspieligen neuen Zulassungsverfahren verbunden. Darüber hinaus erfordert ein Filter immer eine Einstauhöhe zur Erzeugung der erforderlichen Druckhöhe für die Filtration. Je nach Kanalnetz gibt es hier sehr unterschiedliche Möglichkeiten bzw. Restriktionen. Eine Bauartzulassung mit einer vorgegebenen Einstauhöhe ist damit wenig praxistauglich. Ein Filter erfordert damit immer eine individuelle Bemessung. Eine Bauartzulassung kommt nur für häufig wiederkehrende Standardeinbausituationen in Frage, die allenfalls für relativ kleine Anschlussflächen mit kleinen Standardanlagen zu erwarten sind. Für zentrale Filteranlagen ist dies daher keine Option.

Aktuell ist von der DWA eine Arbeitsgruppe gegründet worden, um Richtlinien für die Bemessung und den Betrieb von dezentralen Systemen zu formulieren. Das neue Merkblatt „Empfehlungen für Planung und Betrieb von dezentralen Anlagen zur Niederschlagswasserbehandlung“ (DWA-M 179) wird Informationen zum Betrieb und Betriebsaufwand sowie zur Einordnung der Anlagen in die Systematik der Regenwasserbehandlung enthalten.

Eine grundlegende Voraussetzung für eine wirksame Regenwasserbehandlung dieser Systeme ist die erforderliche Wartung und Überwachung. Auch aufwändige Zulassungsverfahren lassen einen Verzicht auf eine regelmäßige Systemüberwachung im Betrieb nicht zu. Einer Forderung fest vorgegebener Standzeiten kann aufgrund der Dynamik des Niederschlagsgeschehens und der Variabilität des Flächennutzungsverhaltens nicht entsprochen werden. So hängt die Verunreinigung von Verkehrswegen und Plätzen unter anderem ab von:

- ▶ jahreszeitlichen und saisonalen Einflüssen (Streumaterial, Laub und Pollenanfall, Reste von Silvesterfeuerwerken etc.)
- ▶ nutzungsspezifischen Einflüssen (Art und Häufigkeit von Veranstaltungen, Verkehrsaufkommen, Stop-and-go-Verkehr etc.)
- ▶ möglichen Baumaßnahmen und betrieblichen Aspekten (Straßenreinigung etc.)

Darüber hinaus kann die Standzeit eines Filters durch singuläre Ereignisse, wie z. B. der (unerlaubten) Einleitung von verschmutztem Wasser in die Kanalisation oder die Bodenerosion von unbefestigten Flächen bei Starkregenereignissen beeinträchtigt werden.

Teilweise besteht die Erwartungshaltung, dass bei Einsatz eines Filterschachtes auf den Fangeimer im Straßeneinlauf verzichtet werden kann. Bei der Betrachtung eines Fangeimers nach mehrmonatigem Einsatz an einer hochfrequentierten Straße wird deutlich, dass kein wirtschaftlich dimensionierter

Filter zur langfristigen Aufnahme der unterschiedlichen Stoffe ausgelegt werden kann. Der Filter ist im Idealfall in erster Linie für den Rückhalt von Feinpartikeln nach vorheriger Grobstoffabscheidung konzipiert.

2.3 Grundlegende Mechanismen der Filtration

Die natürlichen Wasserinhaltsstoffe lassen sich über die Kriterien „Durchmesser“ und „typischer Konzentrationsbereich“ einteilen. Die Matrix der Wasserinhaltsstoffe umfasst die drei Hauptgruppen „gelöst“, „kolloidal“ und „suspendiert“. Die molekulardispersen Stoffe (Moleküle, Ionen) liegen in gelöster Form vor. Die Grenzen der jeweiligen Stofffraktionen sind in der Literatur unterschiedlich festgelegt. Für kolloiddisperse Stoffe (z. B. Huminstoffe, Silikat), die als fein verteilte Teilchen oder Tröpfchen vorliegen gilt ein Grenzdurchmesser von 0,45 bis 1 µm. Stoffe mit noch größerem Durchmesser sind Suspensa, Trübstoffe oder abflitrierbare Stoffe (AFS). Das Spektrum der Wasserinhaltsstoffe reicht also von echt gelösten Stoffen bis zu groben Suspensionen. Neben gelösten Salzen und Gasen können organische Stoffe und auch feine Tonminerale bis zu Geröll im Oberflächenabfluss enthalten sein. Eine besondere Bedeutung haben Kolloide (10^{-7} bis 10^{-5} m), die durch abstoßende elektrische Kräfte entgegen der Schwerkraftwirkung suspendieren, so dass auch nach längerer Zeit kein Absetzvorgang eintritt. Kolloide lassen sich auch durch eine normale Filtration nicht abscheiden, da sie durch die üblichen Filterporen hindurchwandern.

Bei der Filtration durchläuft das zu trennende Gemisch, je nach Art der Filtration, ein Vlies bzw. Gewebe oder einen Füllkörper. Das Filtermedium ist ein durchlässiges Porensystem. Der Stoffrückhalt kann durch chemische, physikalische und biologische Wirkmechanismen an der Oberfläche erfolgen. Häufig liegt eine Kombination von Wirkmechanismen vor. Das Filtermaterial stellt einen Widerstand gegenüber den Partikeln des zu trennenden Gemisches dar. Dabei werden nicht nur Partikel zurückgehalten, die größer sind als die Porengröße des Filters. Weitere Mechanismen sind Partikelträgheit, Diffusionseffekte, Elektrostatik oder Sperreffekte. Daher werden grundsätzlich auch Partikel abgeschieden, die deutlich kleiner als die Porengröße des Filters sind. Größere Partikel werden beispielsweise durch Trägheit und Sperreffekte zurückgehalten.

Grundsätzlich wird bei der Filtration zwischen einer Oberflächenfiltration und einer Tiefenfiltration unterschieden. Bei einer Oberflächenfiltration entspricht die Filterwirkung einem Siebeffekt. Hier werden die Partikel an der Oberfläche zurückgehalten, sofern die Porenweite des Filtermittels kleiner als die Größe der Partikel ist. Bei der Oberflächenfiltration kommt es zu einer Kuchenbildung, so dass der Filterwiderstand des Filters mit der Standzeit sehr schnell abnimmt. Auch Partikel die kleiner sind als die Porengröße des Filtermediums werden durch den gebildeten Filterkuchen zurückgehalten. Der Filter muss häufig regeneriert werden.

Bei der Tiefenfiltration lagern sich die Feststoffe innerhalb der gesamten Filterschüttung an den Oberflächen der Filtersubstrate an. Es können hierbei auch Partikel aufgehalten werden, welche deutlich kleiner sind als die Poren der Filterschüttung. Dies geschieht vor allem durch chemische und physikalische Wirkmechanismen an der Oberfläche der Filtersubstrate. Die mechanische Abscheidung durch Sperreffekte hat hingegen nur einen geringen Anteil an der Wirkung von Tiefenfiltern. Ist die Oberfläche vollständig beladen kommt es zu einer Reduzierung der Partikelabscheidung, die Durchlässigkeit ändert sich jedoch entgegen der Oberflächenfiltration nur langsam. Der Zeitpunkt, ab wann der Filter in seiner Wirksamkeit nachlässt, ist dadurch schwerer zu erkennen. Wird der Filter zu früh getauscht resp. regeneriert, kostet das Geld, erfolgt die Maßnahme zu spät, wird das Gewässer belastet, oder es besteht bei Anlagen ohne Entlastungsmöglichkeit die Gefahr von Überflutungen im Einzugsgebiet wegen nicht mehr vorhandener hydraulischer Leistungsfähigkeit.

2.4 Vorhandene Systeme und Betriebserfahrungen zur Regenwasserfiltration

Die Funktion der dezentralen Regenwasserfiltrationssysteme entspricht häufig einer Tiefenfiltration. Bei der Tiefenfiltration durchströmt das Wasser die Porenräume des Filterbettes, in denen die Substanzen zurückgehalten werden. Die Wirkung des Filters wird maßgeblich durch das Volumen der Porenräume limitiert. Das Filtermaterial der jeweiligen Systeme ist unterschiedlich. Aus nachvollziehbaren Gründen geben auch nicht alle Hersteller das Material bzw. die Materialkombination an. Mit dem Filtermaterial und der Ermittlung des Filteraufbaus ist zumeist nennenswerter Entwicklungsaufwand verbunden. Eine Zusammenstellung der inzwischen umfangreichen Systempalette liefern Sommer et al. (2014). Neben klassischen Versickerungssystemen werden dort fast 20 Systeme aufgeführt, die mit einem Filter ausgerüstet sind. Dabei zeichnen sich Einlaufrinnen mit Filtersubstrat durch hohe Standzeiten aus. Bei diesen Anlagen werden dem Filtersubstrat chemisch-physikalische und auch biologische Reinigungsmechanismen zugesprochen. Damit ist das Wirkprinzip vergleichbar mit der belebten Bodenzone oder dem Retentionsbodenfilter. Die langfristigen Standzeiten erklären sich durch die hohen Filterflächen, die bis zu 1,5 % der angeschlossenen Fläche ausmachen können (Grüning und Schmitz, 2017).

Das Wirkprinzip von Textilfiltern oder Filtersäcken, die in Straßeneinläufe eingehängt werden, entspricht einer Oberflächenfiltration. Auf diesen Flächenfiltern bildet sich mehr oder weniger kurzfristig ein Filterkuchen. Wenn sich in diesem Fall der Filter zusetzt, kann der Straßeneinlauf seine ursprüngliche Funktion - die rasche Ableitung von Oberflächenabflüssen - nicht mehr wahrnehmen und im Extremfall steht das Wasser auf der Straße (Ellerhorst, 2012 sowie Werker 2015) und es kann zu Überflutungen kommen. Um dieses Problem zu vermeiden, sind sehr kurze, nicht praxisnahe Wartungsintervalle erforderlich. Alternativ werden solche Systeme mit Bypässen ausgestattet, um Überflutungen bei verlegten Filtern zu vermeiden. Dies ändert jedoch nichts an der grundsätzlichen Notwendigkeit kurzer Wartungsintervalle, sondern vermeidet lediglich negative Auswirkungen. Damit verbunden ist allerdings die Gefahr einer unzureichenden Niederschlagswasserbehandlung, wenn die Wartungsintervalle nicht beachtet werden.

Die Wirkung eines Tiefenfilters weisen unterschiedliche Systeme in Filterschächten auf. Hier werden substratgefüllte Patronen sowie ein- bis mehrlagige Filterschichten verwendet. Bei den üblichen Filterschichthöhen von wenigen Dezimetern ist zu klären, wie hoch das Rückhaltepotential im Filter in Abhängigkeit vom vorhandenen Porenraum ist und in welchem Umfang bei den vergleichsweise geringen Kontaktzeiten nennenswerte chemische Stoffumwandlungen stattfinden.

Umfassende Erfahrungen zur Entfernung von Wasserinhaltsstoffen durch Filtration sind aus der Wasserversorgung bekannt. Hier liegen allerdings unterschiedliche Randbedingungen vor, so dass die Systeme nicht auf die Regenwasserbehandlung übertragbar sind. Die Schnellsandfilter im Wasserwerk werden teilweise mehrmals pro Woche zurück gespült. Zur Rücklösung und Entfernung der zurückgehaltenen Stoffe wird das beladene Filtermaterial im Gegenstrom verwirbelt, das Filterbett fluidisiert, so dass adsorbierte Partikel freigesetzt werden. Das Konzentrat wird dann abgezogen.

Rückspülprozesse und Regenerationen des Filtermaterials sind bei den dezentralen Filtersystemen zur Regenwasserbehandlung schwierig. Entweder wird das Filtermaterial getauscht oder die Reinigungsmaßnahmen sind mit den verfügbaren Mitteln, die sich im Wesentlichen auf das Spülfahrzeug beschränken, durchführbar. Die Angaben zu den Überwachungs- und Betriebsintervallen der jeweiligen Hersteller weisen ein breites Spektrum auf.

Untersuchungen zur Filtration von Oberflächenabflüssen in einer zentralen Anlage wurden bereits von Brombach und Weiß (2007) durchgeführt. In der Anlage in Bad Mergentheim wurde das in einem Regenklärbecken vorbehandelte Abwasser mit einem Oberflächenfilter nachbehandelt. Als ergänzen-

de Reinigungsstufe zu einem Regenklärbecken wurde ein mechanischer Filter mit einem Textilgewebe mit 36 μm Maschenweite untersucht. Die installierte Anlage basierte in erster Linie auf dem Wirkprinzip der Kuchenfiltration, da bereits nach kurzer Standzeit der Filterwiderstand des Filterkuchens den des Filtergewebes deutlich überstieg. Die Abreinigung des über eine Pumpe mit dem Klärüberlauf beschickten Filters, erfolgte durch Rückspülung und Abbürsten. Der maximale Zufluss lag bei 8 l/s bei einer Filterfläche von 1,5 m^2 . Es stellte sich heraus, dass für diesen Anwendungsfall die Filterfeinheit zu grob war, weil bereits im RKB gröbere Fraktionen wirksam zurückgehalten wurden. Zudem hat sich die Oberflächenfiltration aufgrund der raschen Verlegung und der geringen Durchlässigkeit des Filterkuchens als ungeeignet erwiesen. Brombach und Weiß weisen darauf hin, dass eine Volumenfiltration für den Rückhalt der feinen Fraktionen im Bereich 6 bis 10 μm ggf. die bessere Alternative darstellt.

Die Untersuchungen der Pilotanlage in Hagen beschrieben Bihs et al. (2015). Die Filteranlage wurde an einem bereits bestehenden Regenklärbecken errichtet. Aus diesem wird die Filtereinheit mit einem kontinuierlichen Zulaufstrom von ca. 23 l/s mit einer Kreislumpumpe beschickt. Der Oberflächenabfluss wird zunächst durch einen Sandfang vorgereinigt und anschließend über ein Filtervlies mit einer Maschenweite von 100 μm geleitet. Unterhalb des Filtervlieses befindet sich ein Mineralfilter mit einer Schütthöhe von 40 cm. Aus der Mineralschüttung wird das gereinigte Oberflächenwasser mit Drainageleitungen abgezogen und kommt dann zunächst in das RKB und wird von dort dem Gewässer zugeführt. Wird der Filterwiderstand zu groß, wird der Zulauf gestoppt und das Vlies mit einer Hochdruckspülung (7 bar) gereinigt. Das Spülwasser wird hierbei von einer Zisterne bereitgestellt, die mit dem gereinigten Ablauf gefüllt ist. Der Filter hat eine Fläche von 7,57 m^2 .

3 Einzugsgebiet und konstruktive Gestaltung der Filteranlage

3.1 Einzugsgebiet und Zuflüsse

Die großtechnische Filteranlage ist im Einzugsgebiet „In der Fleute“ angeordnet. Dieses liegt im Nordosten Wuppertals an der Stadtgrenze zu Schwelm und wird im Wesentlichen umschlossen von der Autobahn A1, der Schwelmer Straße (L726) und der Windthorststraße (Bild 1).

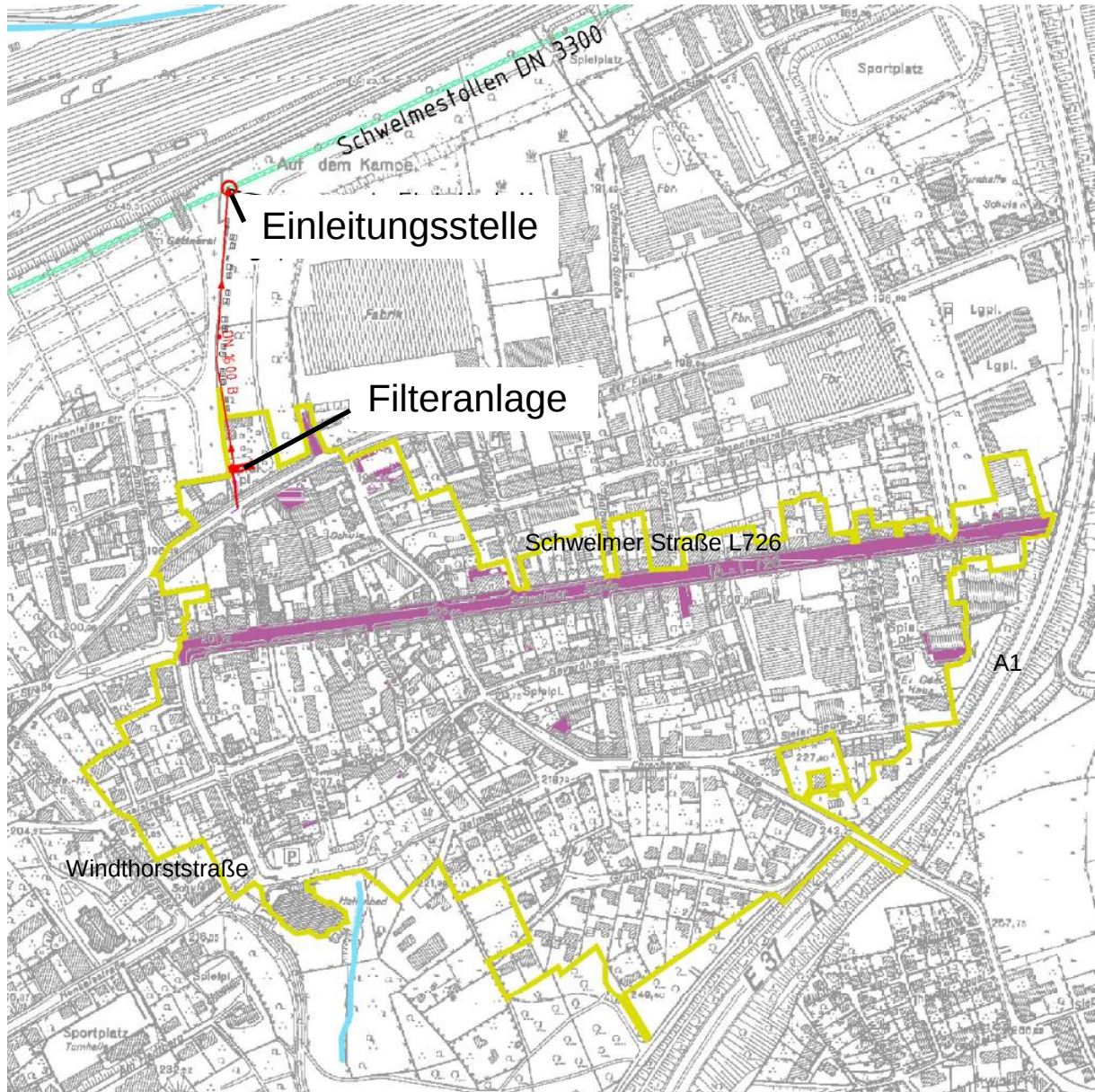


Bild 1: Einzugsgebiet der Großfilteranlage „In der Fleute“ in Wuppertal

Die Regenwasserbehandlung ist aufgrund der Vorgaben des Erlasses Anforderungen an die Niederschlagsentwässerung im Trennverfahren, vom 26.05.2004 (Trennerlass NRW), vor der Einleitung in die Schwelme erforderlich. Das Einzugsgebiet hat eine Gesamtgröße von 26,8 ha, wovon 17,3 ha (65 %) abflusswirksam sind. Die Aufteilung der Flächen in nutzungsspezifische Kategorien gemäß Trennerlass NRW enthält Tabelle 1.

Tabelle 1: Nutzungsspezifische Aufteilung der abflusswirksamen Flächen

Kategorisierung der Flächen und Abflüsse	Flächengröße
Kategorie I (unbelastet))	$A_{u,I} = 7,5 \text{ ha}$
Kategorie IIa (schwach belastet, noch nicht behandlungspflichtig)	$A_{u,IIa} = 5,8 \text{ ha}$
Kategorie IIb (schwach belastet, behandlungspflichtig)	$A_{u,IIb} = 3,1 \text{ ha}$
Kategorie III (stark belastet)	$A_{u,III} = 0,9 \text{ ha}$
Summe befestigte Fläche	$A_{u,ges} = 17,3 \text{ ha}$

Bild 2 zeigt exemplarische Flächen des Einzugsgebietes. Das Einzugsgebiet ist vergleichsweise dicht besiedelt und somit liegen auch zu einem hohen Anteil befestigte Flächen vor.

**Bild 2: Flächenbeispiele im Einzugsgebiet des Filterbeckens „In der Fleute“**

Der Fremdwasserabfluss wurde aufgrund der Messdaten für den Winter 2010/2011 an der Messstelle „Kleingarten“ mit i. M. 2 l/s abgeschätzt. Es sind aber auch Zeiten mit höherem Fremdwasserabfluss bekannt. Der kontinuierliche Fremdwasserabfluss und der behandlungspflichtige Niederschlagsabfluss führen zu einem behandlungspflichtigen Gesamtabfluss von $Q_{krit} = 127,1 \text{ l/s}$.

3.2 Konstruktion der Filteranlage

Zur kontinuierlichen Niederschlagswasserfilterung wurde ein rechteckiges Betonbecken als Großfilteranlage ausgerüstet. Das Bauwerk ist im Hauptschluss des Regenwasserkanals angeordnet. Ursprünglich war ein Regenklärbecken zur Abflussbehandlung konzipiert worden. Im Rahmen eines Sondervorschlages erfolgte alternativ die Ausführung eines technischen Filters.

Vor dem eigentlichen Filter dient eine Vorkammer zur Sedimentation von Grobstoffen. Ziel ist es, bereits einen möglichst großen Anteil der Feststofffracht im Sedimentationsraum zurück zu halten und den Filter in erster Linie für den Rückhalt von Feinstpartikeln zu nutzen. Die Reinigung des zufließenden Niederschlagswassers erfolgt in drei unabhängig voneinander angeordneten parallelen Filterstraßen. Durch Schieber ist es möglich einzelne Filterstraßen z. B. zu Reinigungszwecken außer Betrieb zu nehmen. Die Filteranlage ist in den nachfolgenden Abbildungen (Bild 3 bis Bild 5) dargestellt.

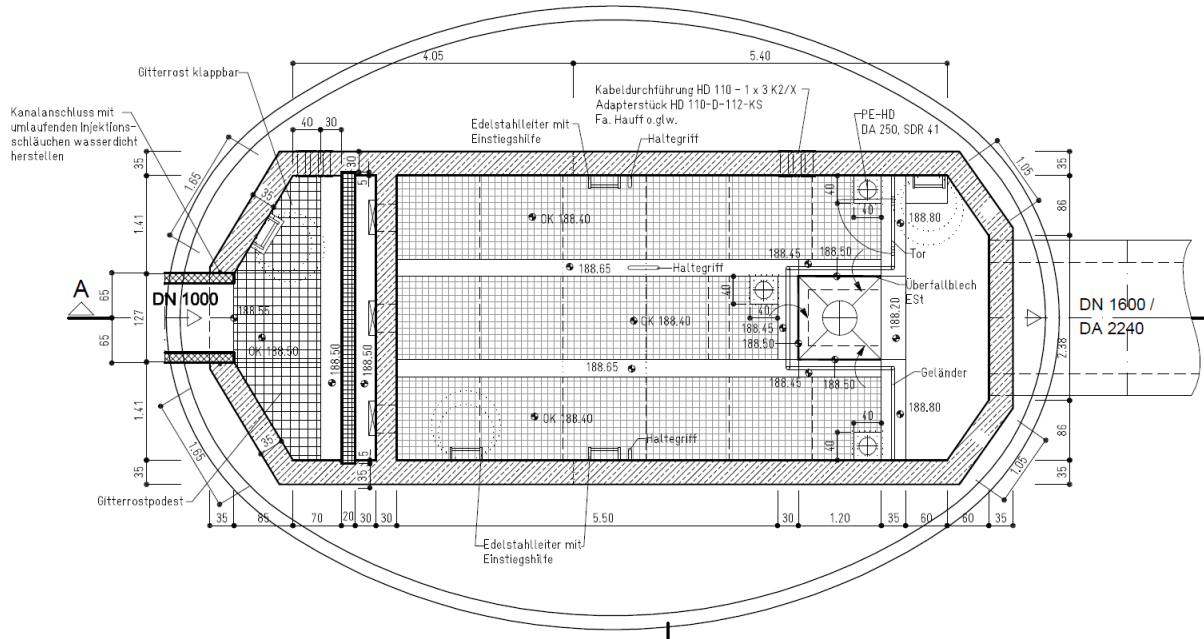


Bild 3: Grundriss Großfilteranlage „In der Fleute“ in Wuppertal

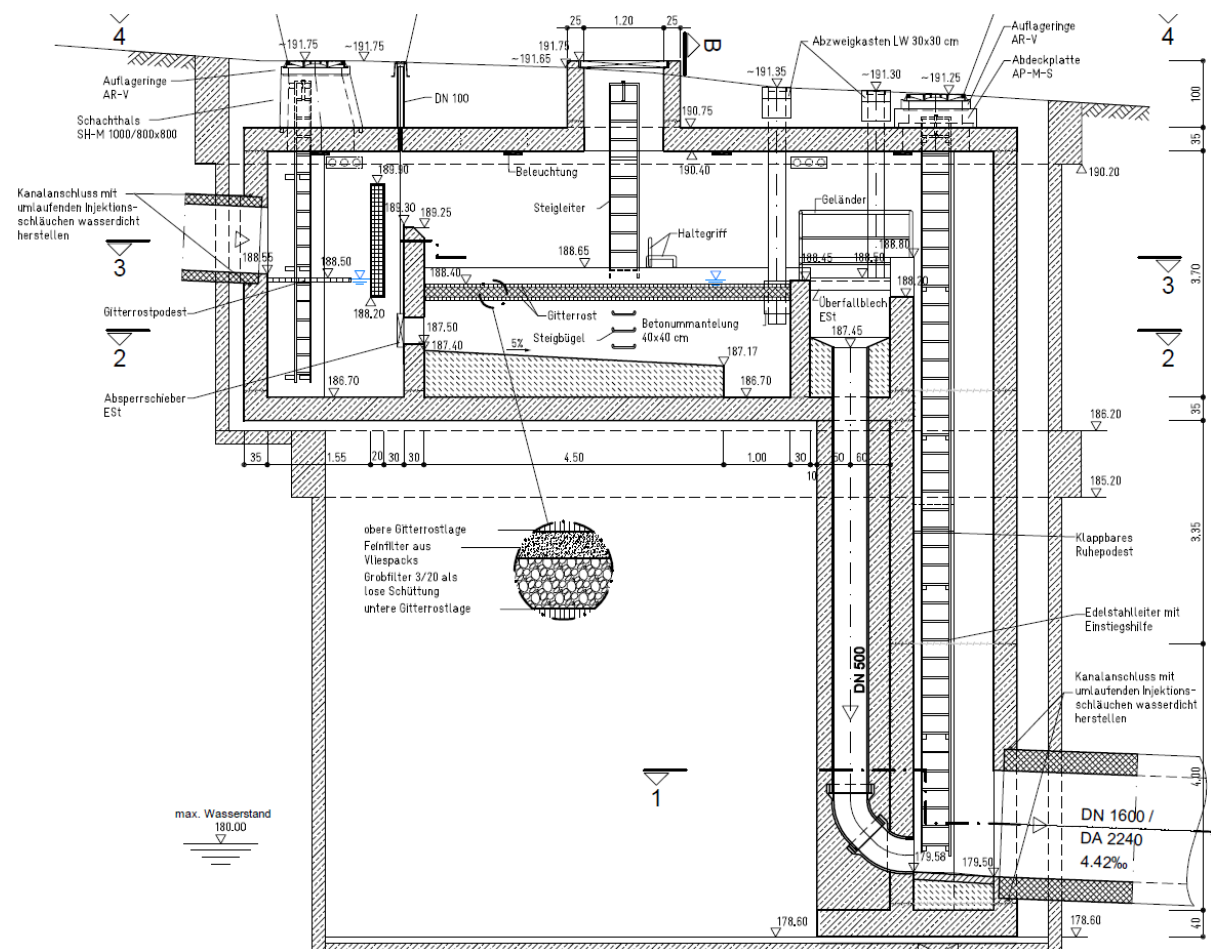


Bild 4: Längsschnitt Großfilteranlage „In der Fleute“ in Wuppertal



Bild 5: Großfilteranlage „In der Fleute“ in Wuppertal Blick Zulauf (links) und Blick Ablauf (rechts)

Bei Niederschlagszuflüssen steigt der Wasserstand in der Zulaufkammer des Filters an, und das Wasser wird aufgrund des sich ausbildenden hydraulischen Gradienten durch die Filterschicht gedrückt. Der Filter ist dreilagig aufgebaut und zwischen zwei Gitterrostelementen fixiert. Der Filter ist bis zur Höhe der Ablaufwehrschwellen (188,55 müNN) ständig mit Wasser gefüllt.

4 Messtechnik und Analytik

4.1 Kontinuierliche Messungen

4.1.1 Betriebsüberwachung durch Füllstandsmessungen im Zu- und Ablauf

Die Überwachung des Systemverhaltens der Filteranlage erfolgt vor allem durch kontinuierliche Füllstandsmessungen. Dazu ist eine Drucksonde (Fa. Vega, Messbereich 0 bis 2 m) in der Zulaufkammer in Fließrichtung links neben dem ankommenden Kanal installiert (Bild 6). Hierdurch können das Einstau- und Entlastungsverhalten der Anlage dokumentiert werden. Diese Sonden erfordern nur einen vergleichsweise geringen Betriebsaufwand.



Bild 6: Füllstandsmessung im Zulauf der Filteranlage „In der Fleute“

Zusätzlich sind jeweils am Ende einer jeden Filterstraße neben den Ablaufschwellen ebenfalls Drucksonden (Fa. Vega, Messbereich 0 bis 1 m) installiert. Die Bezeichnung der Messstellen erfolgte je Straße mit Straße „links“, Straße „mitte“ und Straße „rechts“ in Fließrichtung (Bild 7). Hierdurch kann über den Ansatz einer Wehrformel der Volumenstrom abgeschätzt werden, da ansonsten aufgrund der hydraulischen Randbedingungen (u. a. aufgrund des Rückstaus) im Zulauf keine Durchflussmessung installiert werden konnte.



Bild 7: Füllstandsmessung im Ablaufbereich der Filteranlage „In der Fleute“

Die Daten werden seit dem 02.06.2014 in regelmäßigen Abständen mittels Datenfernübertragung auf den Messdatenserver der Dr. Pecher AG übertragen. Somit ist es möglich, über einen Internetzugang

jederzeit das Betriebsverhalten der dezentralen Behandlungsanlage zu beobachten (Bild 8). Das System dient gleichzeitig als Messdatenspeicher. Darüber hinaus können bei Grenzwertüberschreitung (z. B. im Entlastungsfall) Meldungen per SMS oder E-Mail an den Betreiber versendet werden.

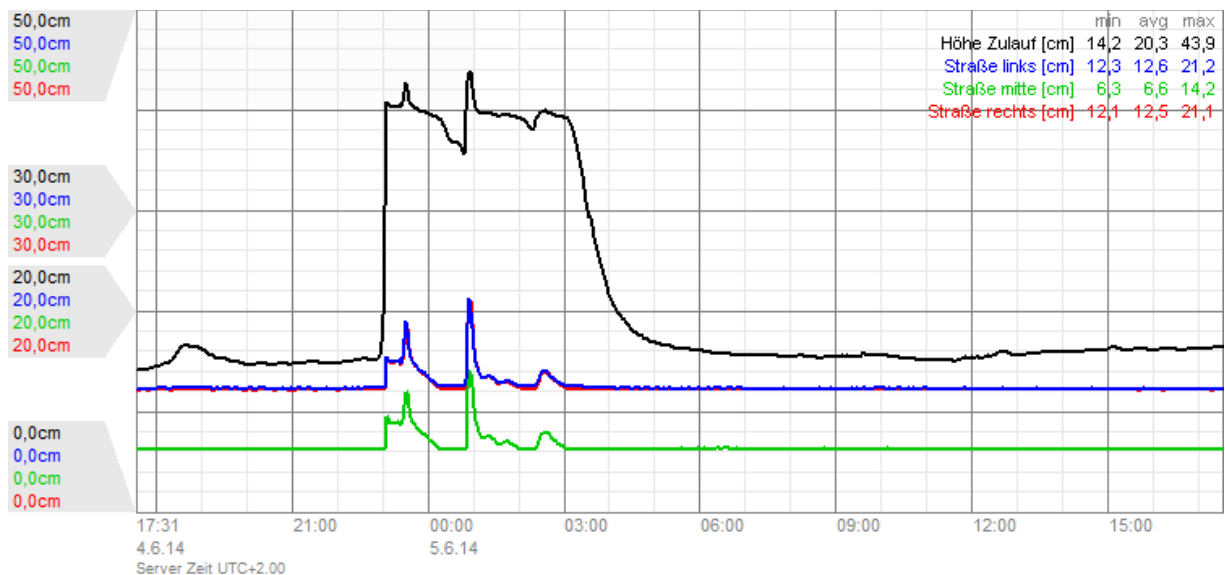


Bild 8: Beispielhafte Darstellung der Füllstände im Zu- und Ablauf der drei Filterstraßen (Messdatenserver)

Die Füllstandsmessungen liefern kontinuierliche Informationen zum Einstauverhalten des Filters und damit indirekt zu seiner Durchlässigkeit. Eine zunehmende Verzögerung der Füllstandsabnahme im Zulaufbereich ist ein Beleg für die nachlassende Durchlässigkeit des Filters. Der Filter wird weder zu früh (noch durchlässig) noch zu spät (bereits kolmatiert) ausgewechselt. Da die Dynamik der Stoffakkumulations- und der Stoffabtragprozesse in dem angeschlossenen Einzugsgebiet viel zu hoch ist, als dass hier allgemeingültige Vorhersagen möglich sind, sind auf der Basis der aktuellen Füllstandsdaten optimale Betriebsintervalle gewährleistet. Entsprechende Systeme setzt die Dr. Pecher AG seit einigen Jahren u. a. zur Betriebserfassung und Betriebsdokumentation von Filterschachtsystemen erfolgreich ein.

4.1.2 Photometermessungen im Zu- und Ablauf

Eine wesentliche Bedeutung für die Gewässerbelastung durch Oberflächenabflüsse hat die Feinfraktion abfiltrierbarer Stoffe mit einem Korndurchmesser unter $63\ \mu\text{m}$ (AFS₆₃). Erfahrungsgemäß unterliegt die AFS-Konzentration in Oberflächenabflüssen erheblichen Spannweiten und einer hohen Dynamik (Grüning, 2002). Eine unmittelbare messtechnische Erfassung dieses Parameters ist nicht möglich. Allerdings liegen inzwischen umfangreiche Messerfahrungen mit der Erfassung von Stoffäquivalenzen mit Photometersonden vor. Photometersonden liefern ein Parameteräquivalent durch Aufnahme eines Messspektrums im UV/Vis-Bereich (Sturmwöhrer und Matsché, 1999) u. a. für die Parameter CSBeq und AFSeq. Übliche Indikatorparameter, wie z. B. CSB, AFS, SAK oder Stickstoff, lassen sich mit diesem Messkonzept sicher nachweisen (u. a. Grüning 2005; Grüning und Hoppe, 2007). Erfahrungen mit einem breiten Spektrum möglicher Schadstoffe (z. B. PAK, MKW etc.) liegen bisher allerdings nur in eingeschränktem Umfang vor.

Die Überwachung der Filterwirkung des hier untersuchten Filters erfolgt mit der Photometer-Tauchsonde der Firma s::can (Wien). Für den Einsatz im Regenwasser eignet sich das Gerät mit einer Messspaltweite von 5 mm. Die Messung im Medium erfolgt durch eine geregelte Xenon-Lampe über

einen Spektralbereich zwischen 200 und 750 nm. Die Reinigung des Messfensters mittels Luftdruck eignet sich besonders für den Einsatz im Abwasser. Die Reinigungsintervalle (Dauer eines Reinigungsintervalls und zeitlicher Abstand zwischen den einzelnen Intervallen) sowie die Stärke des Luftdrucks müssen messstellenspezifisch im Rahmen der Inbetriebnahme und Testphase gewählt und an mögliche Änderungen der Abwasserzusammensetzung (z. B. bei Anschluss neuer Gebiete oder Nutzungsänderungen) angepasst werden. Die Sonde ist im Werk vorjustiert. Im Rahmen der Betriebsbegleitung der Großfilteranlage wurde die Kalibrierung „Kläranlagenablauf“ gewählt.

Als repräsentative Messstelle zur Erfassung der Gesamtzulaufkonzentrationen ist eine Photometersonde auf dem Gitterrost in der Zulaufkammer unmittelbar hinter dem Zulaufkanal installiert (Bild 9).



Bild 9: Installationsort Photometersonde Zulauf Großfilteranlage

Am Ende des Filterbeckens wurde für die Zeit der Untersuchungen die Öffnung zum abstürzenden Ablaufkanal mit einer kreisrunden Platte abgedichtet. Hierdurch wird ein kastenförmiger Raum gebildet in dem sich das Wasser sammelt und durchmischt, bevor es über die vorgesehene Notüberlaufschwelle in den weiterführenden Kanal stürzt. Eine zweite Photometersonde zur Erfassung der Konzentrationen des Gesamtablaufs hängt knapp unterhalb der Entlastungsschwelle (Bild 10).



Bild 10: Anordnung der Photometersonde im Ablaufbereich

Durch die Anordnung der Photometersonden im Zu- und Ablauf des Filterbeckens ist es möglich kontinuierlich die AFS_{eq} -Konzentration zu erfassen und dadurch verlässliche Aussagen über die tatsächliche Reinigungsleistung des Systems treffen zu können.

Das Auslesen der Messdaten und der Betrieb der Sonde ist über eine Schnittstelle zu einem Laptop oder durch einen Bedienrechner „con::cube“ der Fa. s::can möglich (Bild 11). Als aktuelle Messwerte können die Adsorption (z. B. SAK254) oder die dazu korrelierten Werte (z. B. AFSeq und CSBeq) angezeigt und gespeichert werden. Zusätzlich wurden die vier Füllstandssonden an den Bedienrechner angeschlossen, der u. a. auch das Analogsignal für die Datenfernübertragung ausgibt.



Bild 11: Bedienrechner (Fa. s::can) und Datenfernübertragungseinheit im Schaltschrank auf dem Betriebsgelände des Filters

In Bild 12 sind beispielgebend die kontinuierlich erfassten und überwachten Messdaten dargestellt. Neben dem Füllstand im Zulaufbereich wurden die Füllstände in den einzelnen Filterstraßen sowie die Äquivalenzwerte für AFS (AFS_{äq}) im Zu- und Abfluss aufgezeichnet.

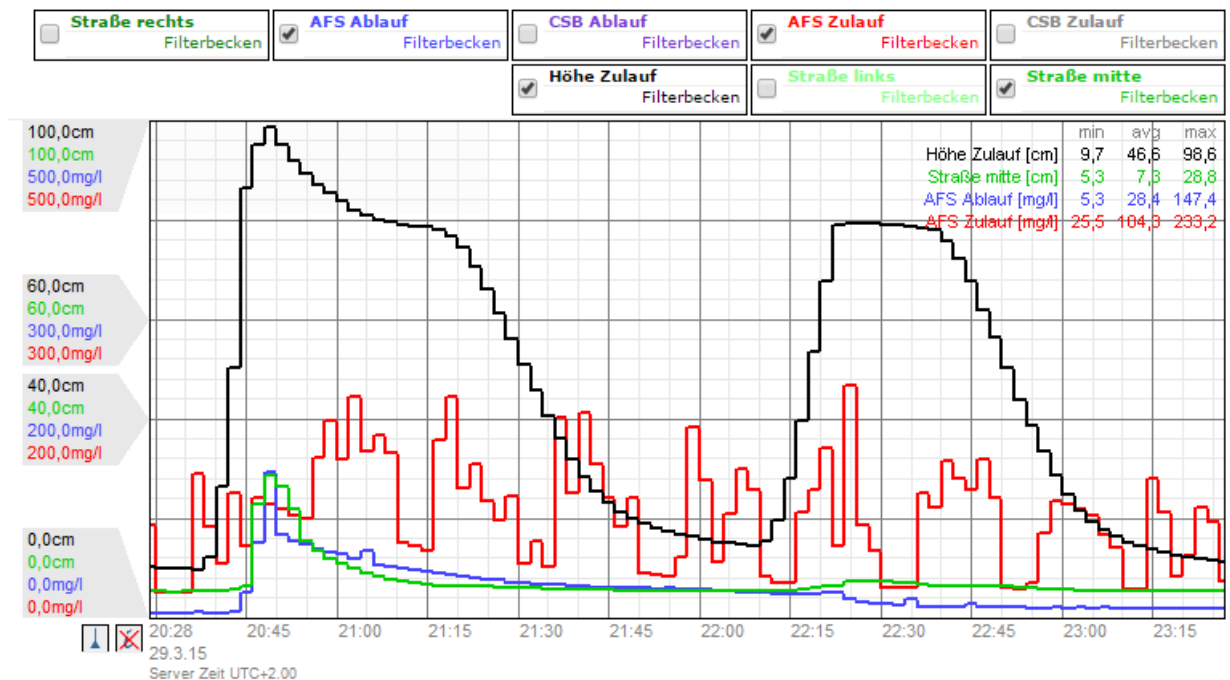


Bild 12: Kontinuierliche Messdatenerfassung im Zu- und Ablaufbereich (Darstellung Messdatenserver)

4.2 Probenahme und Analytik

4.2.1 Probenehmer Zu- und Ablauf

Zusätzlich zur kontinuierlichen Messwertüberwachung mittels der Photometersonden erfolgt im Zulauf und Ablauf des Filterbeckens eine ereignisabhängige Probennahme. Hierzu wurden zwei Standgeräte (Fa. Bühler) installiert (Bild 13). Die Proben werden konstant auf 4° C gekühlt. Die ereignisabhängige Probennahme erfolgt in eine der 12 Glasflaschen (2,1 Liter) nach einer Grenzwertüberschreitung über die Füllstandsmessung der mittleren Filterstraße. Hierzu wird über die scan monitools ein vom füllstandabhängiges 4 bis 20 mA Signal an die Probenehmer ausgegeben. Dabei entsprechen 4 mA einem Füllstand von 7 cm vor der Tauchwand des Zulaufbauwerkes und 20 mA einem Füllstand von 80 cm. Werden diese 80 cm überschritten wird kein Signal mehr übertragen, da in diesem Fall das Wasser bereits über die Filterfläche abschlägt und somit die Probennahme im Ablauf keine Aussage mehr über die eigentliche Filterleistung macht.

Das Probenvolumen einer Einzelmessung beträgt aufgrund der eingeschränkten Programmiermöglichkeiten der Probenehmer konstant 150 ml. Zwischen den einzelnen Probenahmen während eines Ereignisses, liegen durch Ansaugen und Rückspülen des Wassers in den relativ langen Schlauchleitungen beim höchsten Füllstand rund 90 Sekunden. Über einen Impulsteiler wird die Zeit zwischen den Probenahmen bei kleineren Füllständen bzw. kleineren Analogsignalen dementsprechend erhöht (Füllstands- bzw. Volumenproportionalität). Ein automatischer Flaschenwechsel ist nur nach einer definierten Zeit möglich. Hier wurden 24 Stunden ausgewählt, um so eine möglichst optimale Kombination aus Ereignisschärfe und betrieblichem Aufwand zur Probeentnahme und Neustart des Messzyklus zu erreichen. Dies bedeutet allerdings auch, dass bei Vollfüllung der Flaschen der Probennahmebetrieb bis zum Flaschenwechsel nach 24 Stunden eingestellt wird und somit langandauernde stärkere Regenereignisse nicht komplett erfasst werden können.



Bild 13: Probenehmer (Fa. Bühler) auf dem Betriebsgelände der Filteranlage

Aufgrund der eingeschränkten Programmiermöglichkeiten der Probenehmer (u. a. Flaschenwechsel nur nach bestimmten Zeitintervallen möglich) wurden diese am 21.10.2015 gegen zwei Probenehmer der Firma Endress & Hauser (LiquiPort 2000 ex) ersetzt. Danach standen acht Glasflaschen mit einem Probenvolumen von jeweils 1,8 Liter zur Verfügung.

Die Ansteuerung erfolgt über eine separate SPS. Diese verarbeitet den als Analogwert aus dem con::cube ausgegebenen Füllstand der mittleren Filterstraße, um die jeweilige Probennahme und den Flaschenwechsel beim Probenehmer auszulösen.

Aufgrund der begrenzten verfügbaren Finanzmittel wurden zu Beginn ältere Leihgeräte der Universität Bochum eingesetzt. Daraus ergaben sich zu Beginn der Messphase erhebliche Probleme bei der Einstellung der Geräte. So wurden über mehrere Messzyklen unterschiedliche Probemengen im Zu- und Ablauf gezogen, sowie unterschiedliche Flaschen befüllt. Darüber hinaus kam es in einem der Geräte während der Messdauer zu einem Ausfall des Netzteils sowie einem Ausfall der Kühlung. Aus diesem Grund konnten nur 6 Regenereignisse im Labor beprobt werden, bei denen sowohl beide Probennehmer einwandfrei funktioniert haben, als auch der Filter nicht abgeschlagen hat.

4.2.2 Parameteranalytik

Die wesentlichen Inhaltsstoffe mit schädigender Wirkung in aquatischen Ökosystemen sind neben den Feststoffen vor allem Schwermetalle und Kohlenwasserstoffe. Hinzu kommen weiter Xenobiotika, die in aktuellen Forschungsprojekten untersucht werden bzw. in Zukunft weitergehend zu untersuchen sind. Dazu zählen gelöste Stoffe und Spurenstoffe, die beispielsweise als Additive in Bauchemikalien enthalten sind (Rouault, 2015). Im Rahmen der hier dokumentierten Projektphase lag der Schwerpunkt auf der grundsätzlichen Systemwirkung in Kombination mit betrieblichen Aspekten. Insofern beschränkt sich die weitergehende Analyse auf folgende Parameter:

- ▶ **Abfiltrierbare Stoffe (AFS):** Ergänzenden Überprüfung der Ergebnisse der kontinuierlichen Parametermessung sowie zur stoffspezifischen Korrelation mit Schwermetallen und Kohlenwasserstoffen
- ▶ **Chemischer Sauerstoffbedarf (CSB):** Standardparameter zur Bewertung der Abflussverunreinigung und ggf. zur Korrelationsanalyse mit den Äquivalenzmessungen der Spektrometer-sonde.
- ▶ **Biochemischer Sauerstoffbedarf (BSB₅):** Vor dem Hintergrund der Fehleinleitungsproblematik soll der BSB einen Hinweis auf den Anteil leicht abbaubarer Kohlenstoffverbindungen geben.
- ▶ **Schwermetalle:** In erster Linie werden hier Kupfer, Cadmium, Quecksilber, Blei und Zink analysiert. Bei der Analyse werden sowohl die Gesamtanteile als auch die Anteile der gelösten Schwermetalle untersucht.

Abhängig vom verfügbaren Probenvolumen erfolgt ebenfalls eine Analyse der

- ▶ **Polyzyklisch aromatische Kohlenwasserstoffe:** Summenwert

Die Analyse wurde vom Bergischen Wasser- und Umweltlabor (Wuppertal) durchgeführt.

5 Wirkung der Filteranlage und Betriebserfahrungen

5.1 Einflüsse auf den Betrieb und Projektverlauf

Die Untersuchungen an der Pilotanlage unterteilen sich in die beiden wesentlichen Arbeitspakete „Betriebsbegleitung“ und „Betriebsoptimierungen“. Zur genauen Untersuchung der Prozesse im Filter selbst sowie zur Beschreibung der Einflüsse des Stoffrückhaltevermögens sind weitere Untersuchungen erforderlich. Voruntersuchungen zur Wirksamkeit sind hier dennoch für einige Regenereignisse durchgeführt worden und exemplarisch dargestellt. Hierbei ist zu berücksichtigen, dass die angegebenen Wirksamkeiten, welche mit den Ergebnissen der kontinuierlichen Photometer-Messung ermittelt wurden lediglich die Konzentrationen vergleichen. Eine Betrachtung der zurückgehaltenen Fracht war mit den gegebenen Messwerten nicht möglich. In Kapitel 6 wird zusätzlich die Wirksamkeit verschiedener Filteraufbauten durch Laborversuche quantifiziert.

Ein Vorteil des technischen Regenwasserfilters ist die Flexibilität bei der Wahl und dem Aufbau des Filtermaterials. Es besteht die Möglichkeit, sowohl das Filtermaterial als auch den Filteraufbau an unterschiedliche Anforderungen wie Durchlässigkeit, Standzeit und Wirkung anzupassen. Hierbei ist jedoch zu berücksichtigen, dass eine maximale Wirksamkeit zwar technisch vergleichsweise einfach möglich ist, jedoch aus wirtschaftlicher und betrieblicher Sicht nicht zielführend sein kann. Bei dem untersuchten TRF Fleute wird ein gestufter Aufbau im Aufstromverfahren passiert (Bild 14). In der grobkörnigen untersten Lage sollen vor allem suspendierte Grobstoffe zurückgehalten werden, die den Filter rasch zusetzen können (z. B. Zigarettenstummel und Blätter). In der obersten Lage wird reaktives feinkörniges Material eingesetzt, das neben einer physikalischen Wirkung zusätzlich chemische Wirkmechanismen aufweist. Der Gesamtaufbau des Filters hat eine Höhe von ca. 0,20 m. Aufgrund der Filterelemente mit relativ geringer Höhe, liegen die Reaktionszeiten bei kritischen Regenwasserzuflüssen im Filter im Minutenbereich. Die Höhe des Filteraufbaus ist im Regenwasserfilter begrenzt, da der Durchfluss im Aufstrom durch den hydrostatischen Druckunterschied erfolgt, der sich durch die unterschiedlichen Wasserspiegellagen im Zu- und Ablaufbereich einstellt.



Bild 14: Exemplarischer Filteraufbau der mittleren Filterstraße

Durch den Rückhalt der Feststoffe im Filter nimmt mit zunehmender Betriebsdauer der hydraulische Widerstand des Filters zu. Zielgröße der Dimensionierung ist eine planmäßige Filterstandzeit von einem Jahr, in der die Durchleitung des Bemessungsabflusses $Q_{krit} = 127,1$ l/s gewährleistet ist. Bei größeren Zuflüssen steigt der Wasserstand in der Zulaufkammer des Filters aufgrund des hydraulischen Filterwiderstands dann so weit an, dass es zur Entlastung über die Überlaufschwelle kommt. Der Entlastungsabfluss wird dann über die gesamte Filterfläche geleitet. Dies betrifft aber planmäßig nur den nicht zu behandelnden Regenwasserzufluss größer als Q_{krit} . Die k_f -Werte der untersuchten Materialaufbauten liegen zum Zeitpunkt der Inbetriebnahme in einem Bereich zwischen $1 \cdot 10^{-1}$ m/s und $1 \cdot 10^{-2}$ m/s, je nach untersuchtem Filteraufbau. Der Filter selbst hat bei diesem System eine Drosselwirkung. Somit werden gerade in der Anfangszeit aufgrund der höheren Filterdurchlässigkeit in erheblichem Umfang Zuflüsse behandelt, die deutlich über Q_{krit} liegen.

Wesentlichen Einfluss auf den Betrieb des Filters hat die Verunreinigung des Zuflusses. Der Filter ist für Regenwasserzuflüsse mit eingeschränkten organischen Verunreinigungen ausgelegt. Im Verlauf der ersten Monate nach Inbetriebnahme des Filters stellte sich heraus, dass im Einzugsgebiet durch Fehlanlüsse sowohl organische Belastungen als auch Verunreinigungen durch Hygieneartikel vorhanden waren. Diese Situation, die sich bei dezentralen Anlagen bislang nicht in vergleichbarem Umfang zeigte und erheblichen Einfluss auf die Prozesse im Filter hatte, führte zu einem geänderten Projektverlauf. Vor diesem Hintergrund und zur Verbesserung der Wirksamkeit wurde der Filteraufbau in sequentiellen Betriebsphasen angepasst.

5.2 Bedingungen und Ergebnisse während der Betriebsphase I

Die Betriebsphase I umfasst den Zeitraum vom **15.05.2014 bis zum 09.07.2015**. Aufbau und Material des Filters entsprach dem Standardfilteraufbau für dezentrale Anlagen der Pecher Technik GmbH. Es handelte sich um einen dreilagigen Filteraufbau entsprechend dem System FiltaPex gemäß LANUV-Liste. Dieser Filter wird bislang an über 50 Filterschachtstandorten erfolgreich betrieben. Abweichend vom Aufbau der dezentralen Anlagen wurden jedoch die unteren beiden mineralischen Schichten als lose Schüttung anstatt mit netzumhüllten Packs ausgeführt, die oberste Lage bestand aus Geovlies-Packs, die mit einem adsorbierenden Substrat gefüllt waren. Durch die physikalisch-chemischen Prozesse im Filter werden ein Großteil der partikulären Stoffe im Niederschlagsabfluss zurückgehalten und gelöste Schmutzstoffe (z. B. Schwermetalle) durch das Filtermaterial gebunden. Der Aufbau des Filters war während der Betriebsphase I für alle drei Filterstraßen gleich:

Straße 1	Straße 2	Straße 3
4 cm Geovlies-Packs		
6 cm Porenbeton (Körnung: 6 bis 10 mm)		
6 cm Porenbeton (Körnung: 10 bis 20 mm)		

Bild 15 und Bild 16 zeigen den Einbau der Filterschicht am 15.05.2014. Grundlegende Herausforderungen beim Einbau des Materials sind die Vermeidung von Umläufigkeiten, die Gewährleistung, dass insbesondere das feinere Granulat der oberen Schichten nicht durchrieselt und dass kein Filtermaterial ausgetragen wird. Der Filteraufbau erfolgt dazu im „Sandwich-Prinzip“. Abschließend wird ein auftrittssicherer Rost fest verschraubt. Der k_f -Wert des Filters lag bei diesem Materialaufbau bei ca. $1 \cdot 10^{-2}$ m/s im Neuzustand.



Bild 15: Einbau Filtermaterial unterste Lage am 15.05.2014



Bild 16: Einbau Filtermaterial mittlere (links) und obere Lage (rechts) am 15.05.2014

Nach Ablauf der Betriebszeit mussten die Geovlies-Packs händisch entnommen werden, die unteren beiden Schichten konnten vollständig mit dem Spülfahrzeug abgesaugt werden.

Die Inbetriebnahme des Filterbeckens erfolgte am 15.05.2014. Der dreistufige Filter (Betriebsphase I) wurde durch die Fa. Hochtief AG eingebaut (Kapitel 3.2). Die Messtechnik (Kapitel 4) wurde durch WSW Energie und Wasser AG installiert und konnte ab dem 02.06.2014 genutzt werden. Nach etwas über einem Jahr wurde der Filter am 07.07.2015 ausgebaut und das Becken gereinigt. Bild 17 zeigt die Ganglinie des Füllstands im Zulauf zum Filterbecken für diesen Betriebszeitraum. Die Höhe des Füllstands vor dem Filter in Abhängigkeit vom Zulaufvolumenstrom lässt Rückschlüsse auf die Durchlässigkeit des Filters zu. Ab einem Füllstand von 39 cm (bis 30.09.2015) bzw. 78,6 cm (ab dem 30.09.2014 erfolgte eine Anpassung des Messbereichs) wurde ein Teilstrom des zufließenden Wassers über die Entlastungsschwelle abgeschlagen. Dies erfolgte erstmalig am 04.06.2014 also rd. drei Wochen nach der Inbetriebnahme. Nach diesem Zeitpunkt war ein kontinuierlicher Anstieg des Wasserspiegels auch bei Trockenwetter (u. a. aufgrund des zunehmenden Fremdwasserzuflusses) zu beobachten. Ab dem 15.10.2014 stellt sich allein durch den Fremdwasserzufluss ein fast kontinuierlicher Einstau bis zur Entlastungsschwelle ein. Im Rahmen der Wartungstermine vor Ort wurden zahlreiche Hinweise für Fehleinleitungen festgestellt (Ablagerungen und Geruch, Bild 18 und Bild 19). Vermutlich hat der hohe Anteil organischer Inhaltsstoffe zu einer biologischen Kolmation des Filters geführt und die Durchlässigkeit stark reduziert.

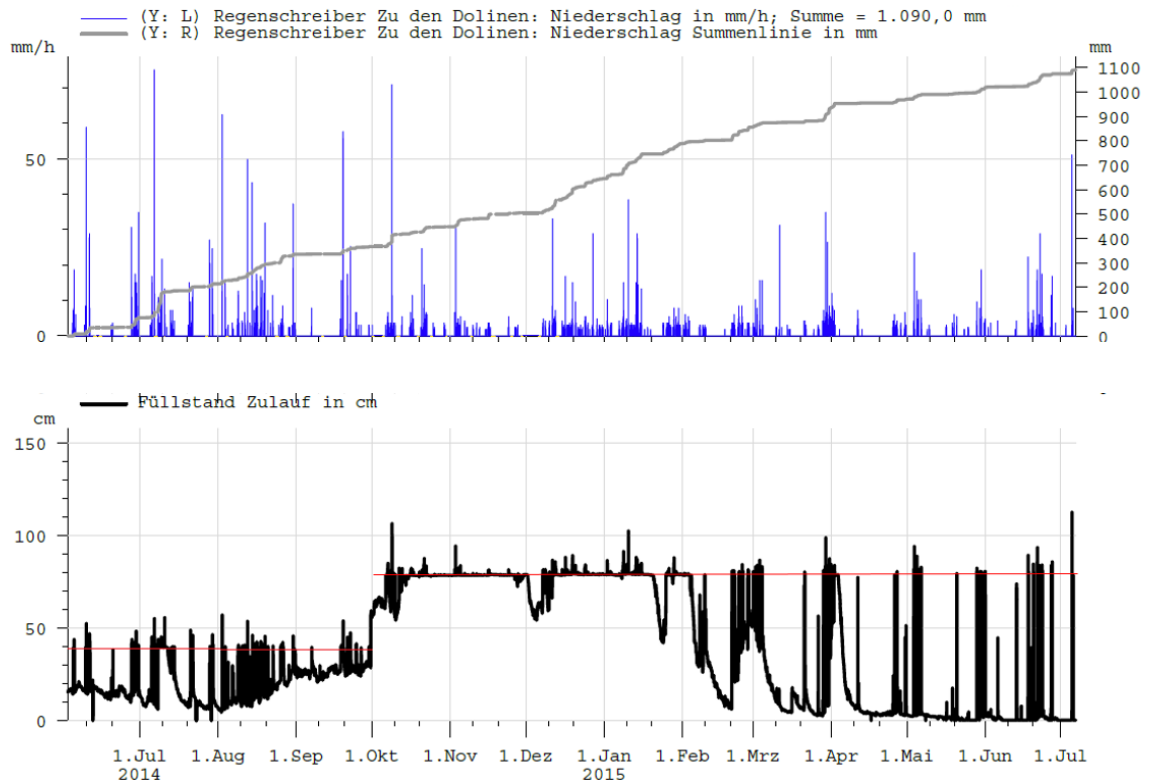


Bild 17: Niederschlag (oben) und im Zulaufbereich des Filterbeckens gemessene Füllstandsganglinie (unten) im Zeitraum von Juni 2014 bis Juli 2015

Im Rahmen der Untersuchungen durch den Betrieb der WSW AG wurden zwei Fehleinleiter ermittelt. Es handelte sich um einen Gastronomiebetrieb und ein Mehrfamilienhaus mit einer Apotheke im Erdgeschoss. Der Umschluss des Gastronomiebetriebes erfolgte im Juni 2014 und das Mehrfamilienhaus wurde im Dezember 2014 an das Schmutzwasserkanalnetz angeschlossen. Die visuellen Kontrollen belegen seitdem einen deutlichen Rückgang von Schmutzwasserinhaltsstoffen. Eine Garantie, dass keine Fehleinleiter mehr vorliegen besteht dennoch nicht.



Bild 18: Hygieneartikel (linkes Foto vom 25.06.2014) und Biofilmbildung im Einlaufbereich (rechtes Foto vom 03.07.2014)



Bild 19: Hygieneartikel in der Filterstraße (linkes Foto vom 31.07.2014) und entfernte Ablagerungen (rechtes Foto vom 14.08.2014)

Auch wenn der Einfluss des Schmutzwasserzuflusses durch Fehleinleitungen im Rahmen des Pilotvorhabens nicht eindeutig zu quantifizieren war, zeigte sich nach der Beseitigung der Fehllanschlüsse eine erstaunliche Entwicklung. Trotz anhaltender Fremdwasserzuflüsse sank ab Januar/Februar 2015 der Wasserspiegel nach Regenende wieder deutlich ab. Die Gründe für diese Entwicklung sind nicht eindeutig nachzuweisen. Mit hoher Wahrscheinlichkeit haben die hohen organischen Abwasserinhaltsstoffe der Fehleinleitungen eine Biofilmbildung im Filter hervorgerufen. Nach Beseitigung der Fehllanschlüsse, bei gleichzeitiger Abnahme der Temperatur im Januar, bildete sich der Biofilm zurück und die Durchlässigkeit des Filters stellte sich wieder ein.

Insgesamt wurde im Rahmen der Wartungen festgestellt, dass das Filterbecken mit einer Vielzahl von unterschiedlichen Frachteinträgen beaufschlagt wird. Eine Auswahl zeigen Bild 20 und Bild 21.



Bild 20: Zulaufsituation am 14.08.2014 (linkes Foto) und am 18.08.2014 (rechtes Foto)



Bild 21: Zulaufsituation am 08.09.2014 (linkes Foto) und am 23.09.2014 (rechtes Foto)

Aufgrund der Fehleinleitungen und den daraus vermuteten Einflüssen auf den Betrieb des Filterbeckens wurde im Rahmen der ersten Betriebsphase auf eine detaillierte quantitative Auswertung der Messungen verzichtet. Zudem wurde die grundsätzliche Reinigungswirkung mit dem Filteraufbau der ersten Betriebsphase bei Schachtsystemen mehrfach untersucht und nachgewiesen.

Ein Ziel dieses Pilotprojektes, ist vor allem die Optimierung des betrieblichen Aufwands für diese Art der Großfilteranlagen. Aus diesem Grund wurde am 07.07.2015 der Filter ausgebaut (Bild 22 und Bild 23) und der Schlamm aus der Sedimentationskammer (Bild 24) sowie den drei Straßen (Bild 25) entfernt. Es wurden ca. 4 m³ Schlamm (1,5 m³ Sedimentationsraum im Zulaufbereich und 2,5 m³ unter den Filterstraßen) abgesaugt.



Bild 22: Ausbau des stark verunreinigten Filtermaterials am 07.07.2015



Bild 23: Detailansicht des verunreinigten Filtermaterials beim Ausbau am 07.07.2015

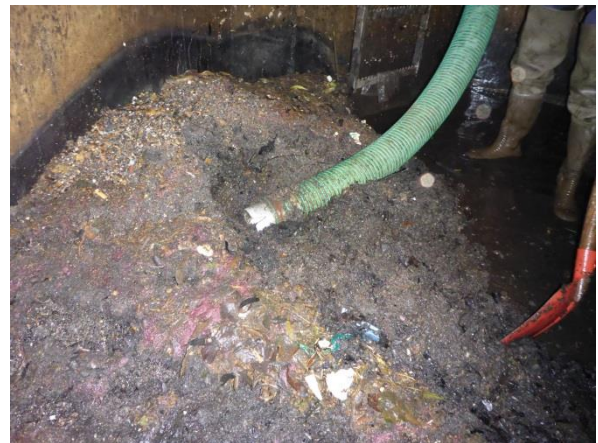


Bild 24: Schlammablagerungen im Sedimentationsraum im Zulaufbereich



Bild 25: Schlammablagerungen im Sedimentationsraum der Filterstraßen

5.3 Bedingungen und Ergebnisse während der Betriebsphase II

5.3.1 System- und Betriebsbedingungen

Da ein wesentlicher Schwerpunkt des Untersuchungsvorhabens auf den betrieblichen Aspekten einer technischen Großfilteranlagen lag, wurde für die Betriebsphase II ein neuer Filteraufbau gewählt. Diese Phase begann am 09.07.2015 nach dem Einbau neuer Substrate und einer abschließenden Filtermatte und endete am 13.05.2016. Ein Grund für die Konzeption des neuen Filteraufbaus war der maßgebliche Einfluss durch die ermittelten Fehleinleitungen. Darüber hinaus sollten Alternativen für die obere Lage aus Vliespacks untersucht werden. Durch Voruntersuchungen in einer Laboranlage der Fachhochschule Münster wurde der Filteraufbau auch hinsichtlich des Feinstoffrückhalts optimiert. Die genaue Beschreibung der Vorgehensweise und der Ergebnisse erfolgt in Kapitel 6. Für den Praxistest wurde ein vierschichtiger Filter für alle drei Filterstraßen gewählt:

Straße 1	Straße 2	Straße 3
5 cm Filtermatte		
3 cm Blähton (8 bis 10 mm)		
4 cm Calcium-Silikat (6 bis 10 mm)		
4 cm Calcium-Silikat (10 bis 20 mm)		

Die beiden unteren Lagen sind auf dem unteren Gitterrost mit einer Höhe von je 4 cm als lose Mineralschüttung mit unterschiedlichen Korngrößen ausgebildet. Darüber wurde eine 4 cm hohe Schicht aus gebrochenem Tonmineral aufgebracht. Als weitere Maßnahme wurde die oberste Lage als Filtermatte ausgeführt, welche einen Austrag des Materials verhindert und durch die obere Gitterrostlage fixiert wird (Bild 26 und Bild 27). Hierdurch sollte der Aufwand beim Ein- und Ausbau reduziert werden. Der k_f -Wert des Filters liegt bei diesem Materialaufbau im Neuzustand bei ca. $9,7 \cdot 10^{-2}$ m/s. Im Vergleich zur Filterausrüstung in der ersten Betriebsphase wies der Filter also eine deutlich höhere Wasserdurchlässigkeit auf.



Bild 26: Einbau der untersten beiden Filterschichten am 09.07.2015 Versuchsphase II



Bild 27: Einbau oberste Filterschicht und Filtermatte am 09.07.2015

Der Einbau des veränderten Filters erfolgte am 07.07.2015. Bei der Entwicklung des Filters wurde nicht die Materialkombination mit dem größten Stoffrückhalt unter Laborbedingungen gewählt, sondern ein Filteraufbau, der den hohen hydraulischen und stofflichen Anforderungen der Regenwasserbehandlung standhält und den betrieblichen Anforderungen entspricht. Die mechanische Beanspruchung der Messtechnik und der gesamten Anlage verdeutlichen Bild 28 bis Bild 29. Neben dem „natürlichen“ Oberflächenabtrag stellen die bereits erwähnten und zwischenzeitlich beseitigten Fehleinleitungen, aber auch Bauschutt, Holzbalken etc. hohe Anforderungen an die Behandlungsanlage. Mit Fehleinleitungen in Trennsystemen ist grundsätzlich zu rechnen. Es besteht die Möglichkeit, einen Filteraufbau zu konzipieren, der auch bei Fehleinleitungen ausreichend durchlässig bleibt. Allerdings wird dadurch der Rückhalt von feinen Partikeln deutlich geringer.



Bild 28: Zulaufsituation am 28.07.2015 (linkes Foto) und am 09.11.2015 (rechtes Foto)



Bild 29: Zulaufsituation 16.11.2015 (linkes Foto) und 04.12.2015 (rechtes Foto)

5.3.2 Systembelastung im Zeitraum von Juli bis November 2015

Für den Zeitraum vom 07.07.2015 bis zum 23.11.2015 (Betriebsphase II) wurden die Systembelastung und das Betriebsverhalten der Anlage durch die Auswertung folgender Kriterien analysiert:

- ▶ Niederschlag
- ▶ Anzahl der Ereignisse mit Ein- und Überstau
- ▶ Durchflussbilanzierung
- ▶ Entlastungsverhalten und behandelte Anteile
- ▶ mittlere Feststoffkonzentration

Niederschlag

Die Auswertung des Niederschlags basiert auf den Daten des rd. 800 m Luftlinie weiter nördlich gelegenen Regenschreibers „Zu den Dolinen“ der WSW AG. Im Auswertezeitraum wurden insgesamt 475,2 mm Niederschlag registriert (Bild 30). Die Summe liegt im Bereich der mittleren Niederschlagssumme der letzten 10 Jahre (490 mm für den Vergleichszeitraum, Wuppertal-Buchenhofen). Insgesamt traten 56 Regenereignisse mit einer Niederschlagssumme > 1 mm auf (Tabelle 2). Die Abgrenzung der einzelnen Ereignisse erfolgte hierbei auf Grundlage des Arbeitsblattes DWA- A118. Aufgrund der Größe des Einzugsgebietes wurde der zeitliche Mindestabstand von vier Stunden gewählt.

Tabelle 2: Regenereignisse im Zeitraum vom 7. Juli bis zum 23. November 2015

Monat	Regensumme „Zu den Dolinen“ in mm	Anzahl der Ereignisse > 1 mm	Durchschnittliche Regensumme in mm*
Juli	92,4	12	112
August	125,8	13	130
September	112,5	15	67
Oktober	49,0	6	81
November	95,5	10	100
Summe	475,2	56	490

* Datenbasis 12/2005 - 12/2015, Station Wuppertal-Buchenhofen (www.wetterdienst.de)

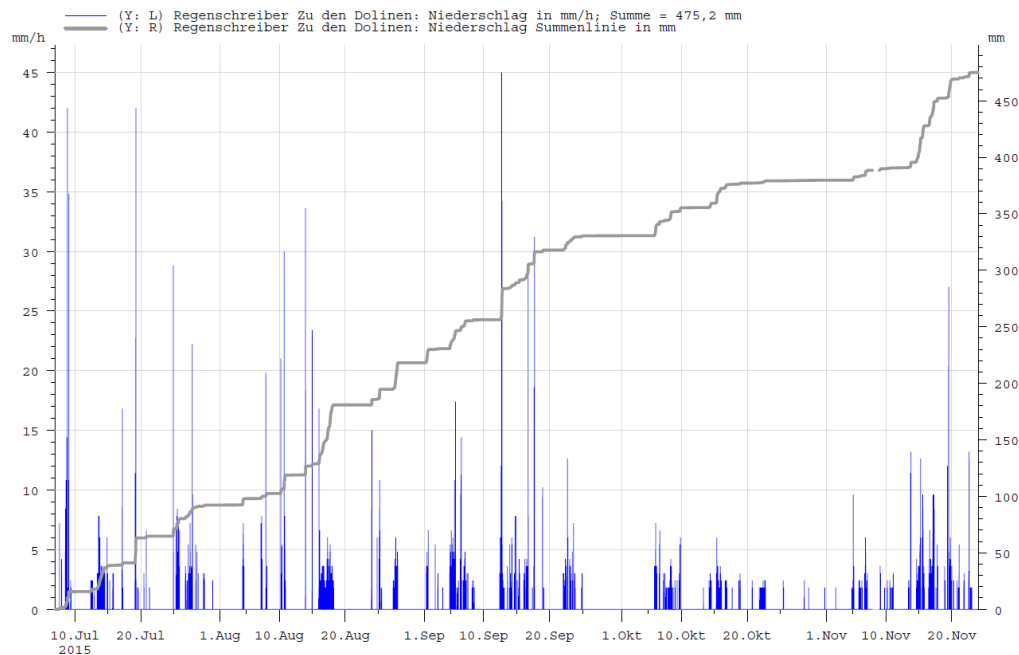


Bild 30: Daten des Niederschlagsschreibers „Zu den Dolinen“ in Wuppertal 7. Juli bis zum 23. November 2015

Durchflussbilanzierung

Aus den Füllstandmessungen wurden über eine Wehrberechnung nach Poleni der Abfluss der drei Filterstraßen und damit das insgesamt durch das Bauwerk geflossene Volumen abgeschätzt. Die Berechnung erfolgte über die Standardformel nach Poleni für ein idealisiertes scharfkantiges Profil. Die Berechnung des Abflusses enthält aufgrund der Anordnung der Messwehre und der Anströmung Unsicherheiten. Eine Durchflussmessung im Zulauf brachte aufgrund des Rückstaus und des großen Durchmessers allerdings keine besseren Ergebnisse. Im Zeitraum vom 07.07.2015 bis zum 23.11.2015 sind insgesamt 64.225 m³ durch das Bauwerk geflossen. Dieses Volumen beinhaltet den behandelten und den unbehandelten Anteil sowie den Fremdwasseranteil (Tabelle 3).

Tabelle 3: Zugeflossenes Volumen im Zeitraum vom 7. Juli bis zum 23. November 2015

Monat	Volumen in m ³
Juli	8.120
August	11.938
September	13.449
Oktober	13.995
November	16.723
Summe gesamt	64.225

Ereignisse mit Ein- und Überstau

Der Nullpunkt der Füllstandsmessung im Zulauf bezogen auf die Höhe der Wehrschwelle lag bei 0,05 m. Für die Auswertung der Einstauereignisse wurde ein Grenzwert von 0,02 m (bzw. 0,07 m Füllstand der Höhenstandsmessung) festgelegt. Es ergeben sich an 56 Tagen insgesamt 88 Einstau-

ereignisse mit einer Gesamtdauer von rd. 189 Stunden (Tabelle 4). Die Auswertung erfolgte in Anlehnung an das Abgrenzungskriterium für Niederschlagsereignisse gemäß DWA-A118. Erst bei einer Unterschreitung der Zeit zwischen zwei Grenzwertüberschreitungen für den Einstau von vier Stunden wird ein neues Einstauereignis gezählt.

Tabelle 4: Anzahl der Einstauereignisse (Füllstand > 2 cm) im Zeitraum von Juli bis November 2015

Monat	Anzahl der Einstauereignisse	Anzahl der Tage mit Einstau	Anzahl der Regenereignisse	Einstaudauer in Stunden
Juli	13	9	12	16,02
August	20	12	13	53,50
September	23	16	15	55,67
Oktober	11	8	6	19,57
November	21	11	10	44,47
Summe	88	56	56	189,23

Die Höhe des Wehres im Zulaufbereich beträgt 78,6 cm bezogen auf den Nullpunkt der Füllstandsmessung im Zulauf. Übersteigt der Wasserstand diese Höhe, kommt es zu einem Abschlag und das Regenwasser wird zum Teil unbehandelt über die Filterstraßen zum Ablauf geleitet. Bild 31 zeigt eine Übersicht der Füllstandsganglinie im Zulauf korrespondierend zum gefallenem Niederschlag. Über den Ansatz einer Wehrformel (Poleni, Länge der Schwelle 4,10 m, Überfallbeiwert von 0,64) kann das durch die Filteranlage geleitete Volumen abgeschätzt werden. Im ausgewerteten Zeitraum geschah dies bei 35 von 56 Regenereignissen mit einer Gesamtdauer von rd. 16 Stunden (Tabelle 5).

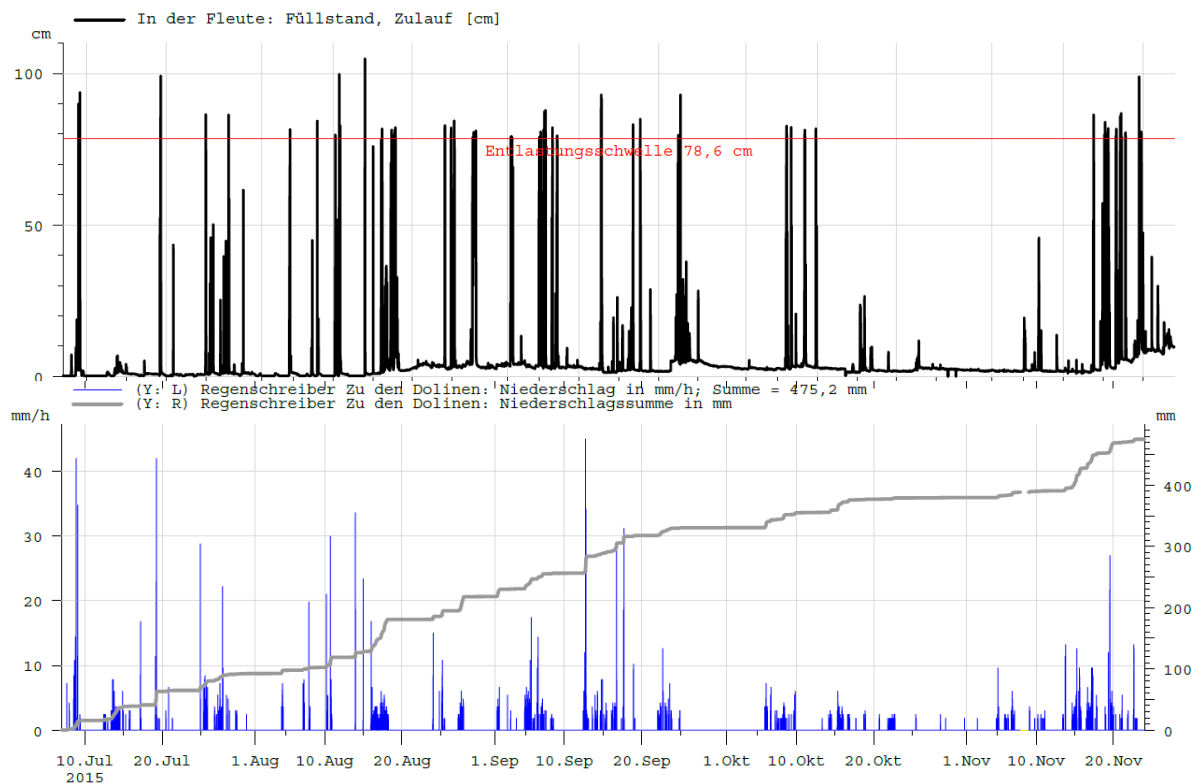


Bild 31: Schwellenwertüberschreitungen im Zulauf und Niederschlagsereignisse

Ab dem 18. November 2015 zeigte sich durch den Anstieg des Fremdwasserzuflusses eine kontinuierliche Erhöhung des Wasserspiegels im Zulauf.

Tabelle 5: Anzahl Entlastungsereignisse (Füllstand > 78,6 cm) im Zeitraum von Juli bis November 2015

Monat	Anzahl der Entlastungen	Volumen der Entlastungen* in m³	Entladungsdauer in Stunden
Juli	6	1.062	1,53
August	10	1.719	7,46
September	8	790	2,21
Oktober	3	132	1,42
November	8	818	3,95
Summe	35	4.521*	16,57

**Volumina enthalten auch die Fremdwasserabflüsse bei Trockenwetter*

Behandeltes Volumen und Entlastung

Wie bereits im Abschnitt „Durchflussbilanzierung“ beschrieben, sind im Zeitraum vom 07.07.2015 bis zum 23.11.2015 insgesamt 64.225 m³ über das Ablaufwehr abgeleitet worden. Davon wurden 93,0 % (59.704 m³) durch den Filter geleitet und behandelt. Lediglich 7,0 % (4.521 m³) sind über die Schwelle im Zulauf abgeschlagen und unbehandelt weitergeleitet worden. Die Bilanzierung der Volumenanteile veranschaulichen Tabelle 6 und Bild 32. In Bild 33 ist die Geometrie des Bauwerkes zur Veranschaulichung der jeweiligen Volumenströme dargestellt.

Tabelle 6: Bilanzierung des zugeflossenen und des behandelten Volumens in der Zeit vom 7. Juli bis zum 23. November 2015

Monat	Volumen in m³		
	Gesamt Zulauf	Abschlag Zulaufbereich	Behandelt
Juli	8.120	1.062	7.058
August	11.938	1.719	10.219
September	13.449	790	12.659
Oktober	13.995	132	13.863
November	16.723	818	15.905
Summe gesamt	64.225	4.521	59.704

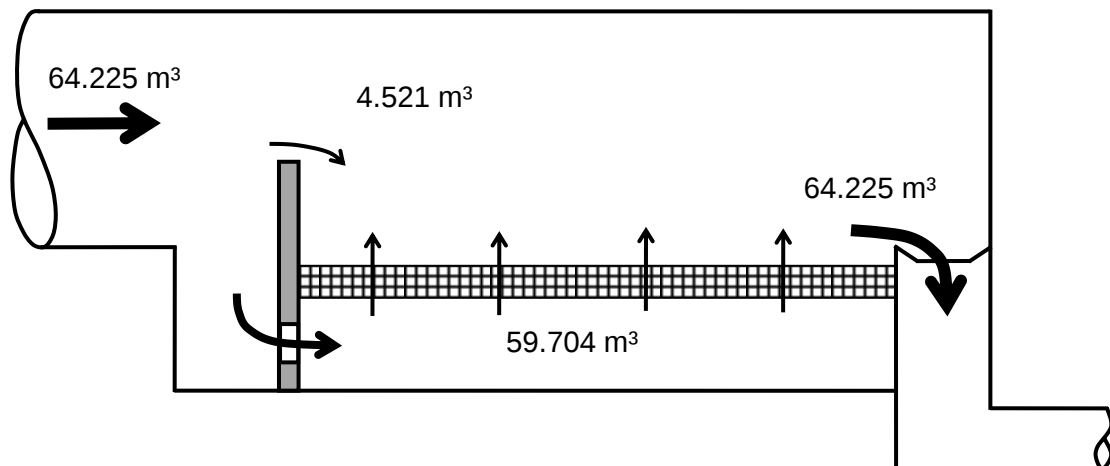


Bild 32: Darstellung der jeweiligen Volumenanteile

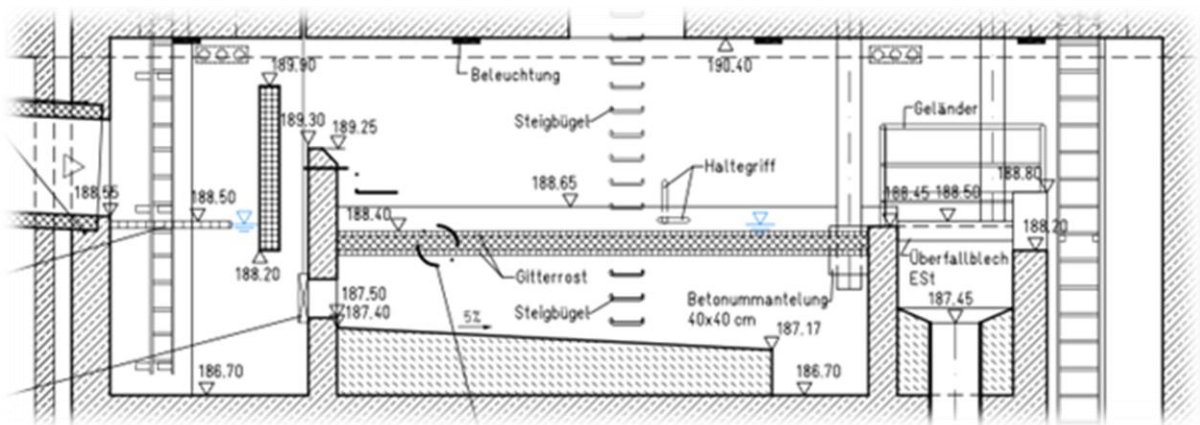


Bild 33: Geometrie des Filterbauwerks

Wie in Tabelle 5 angegeben, kam es im Zeitraum vom 07.07.2015 bis zum 23.11.2015 in 35 Fällen zu einem Abschlag über der Wehrschwelle. Aus der Durchflussmessung im Ablaufbereich hinter den Filterstraßen wurden insgesamt 20 Ereignisse mit Überschreitung von Q_{krit} ermittelt (Bild 34). Beim Vergleich dieser Zahlen ist zu berücksichtigen, dass eine Überschreitung von Q_{krit} deutlich häufiger vorkam. Durch die Messung im Ablaufbereich bleiben die Retentionswirkung im Zulaufkanal (DN 1000) und die Reduktion der Spitzenzuflüsse durch die Retention im Bauwerk (Pufferwirkung) leider unberücksichtigt. Für weitere Untersuchungen ist eine Durchflussmessung im Zulaufbereich des Bauwerks vorzusehen, damit ein eindeutiger Zusammenhang zwischen der Überschreitung des kritischen Regenwasserzuflusses und dem Entlastungsverhalten hergestellt werden kann. Die konstruktive Gestaltung des Zulaufbereiches lässt eine nachträgliche Durchflussmessung nur mit erheblichem finanziellem Aufwand zu.

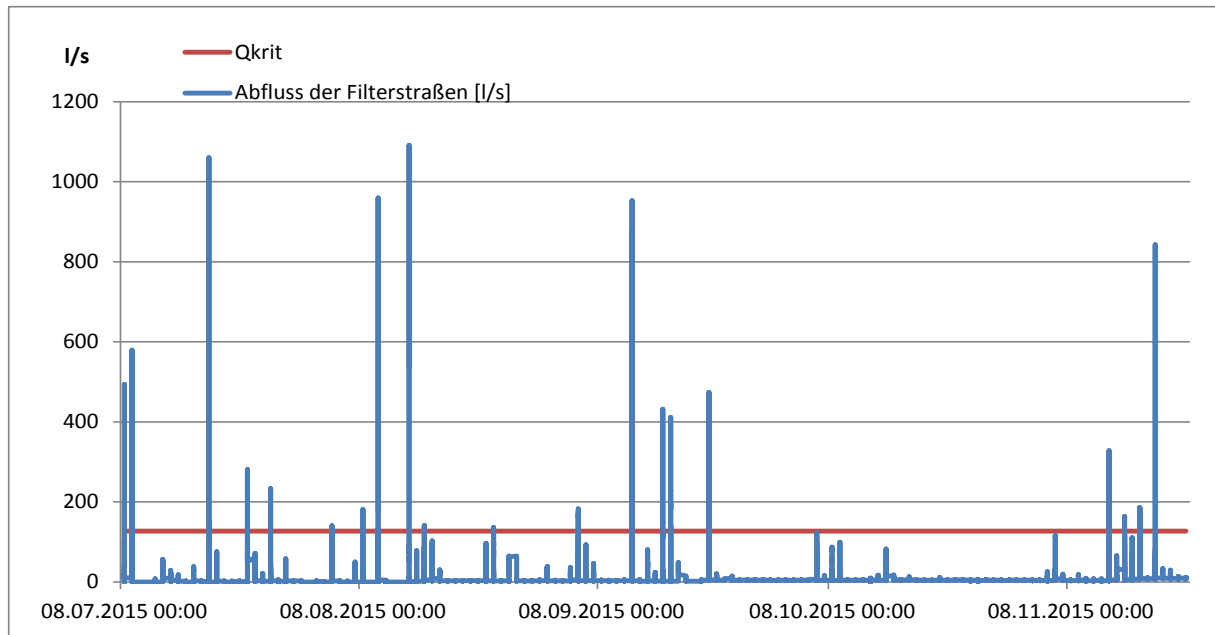


Bild 34: Überschreitung des behandlungspflichtigen Abflusses Q_{krit} von 127,1 l/s

Mittlere AFS_{aq} Konzentration bei Regenereignissen ohne Fremdwasser und Überstau

Die mittlere AFS_{aq} -Konzentration im Zulauf ohne Fremdwasseranteil und ohne Entlastungsereignisse lag bei 14,5 mg/l (Tabelle 7). Mit der Ablaufsonde wurde eine mittlere Konzentration von 10,3 mg/l gemessen. Die Auswertung erfolgte für den Füllstandsbereich im Zulauf von > 7 cm (Grenzwert für Einstaubbeginn) und $< 78,6$ cm (Grenzwert für Entlastung). Die Konzentrationen wurden während der Ereignisse minütlich ermittelt. Aus allen Minutenwerten wurde dann ein Monatsmittelwert gebildet. Neben den Unsicherheiten, die eine photometrische Messung von AFS_{aq} -Konzentrationen mit sich bringt, sei an dieser Stelle ausdrücklich darauf hingewiesen, dass diese Daten **nicht zur Bilanzierung** herangezogen werden können. Die Konzentrationen sind nicht durchflussgewichtet und geben daher auch keinen Aufschluss über die Gesamtwirksamkeit der Anlage. Zur Bilanzierung der Frachten wäre eine exakte Volumenstrommessung erforderlich. Zudem sind die gemessenen Konzentrationen sehr gering, was möglicherweise mit den hohen Nachlaufzeiten des Systems zusammenhängen kann. Die angefallenen Schlammengen deuten darauf hin, dass die mittlere AFS-Konzentration des Zuflusses deutlich höher liegen muss (diese Vermutung deckt sich mit den Ergebnissen der im Labor untersuchten Proben, vgl. Kapitel 5.3.3).

Tabelle 7: Mittlere AFS_{aq} -Konzentration im Zu- und Ablauf (fremdwasserbereinigt und ohne Entlastungsereignisse)

2015	Zulauf: Mittlere AFS_{aq} -Konzentration in mg/l	Ablauf: Mittlere AFS_{aq} -Konzentration in mg/l	Reduzierung in %
Juli	(90,7*)	(11,8*)	(87,0*)
August	(14,3*)	(8,3*)	(42,0*)
September	14,1	10,0	29,1
Oktober	17,6	13,1	25,6
November	11,8	7,9	33,1
Gesamt	14,5 (17,2)*	10,3 (10,2)*	29,3 (43,4)*

* Fehlmessungen Zulaufkonzentration aufgrund nicht eingetauchter Sonde (Umbau am 20.08.2015)

Es gibt keine konkreten Angaben über den Fremdwasserzufluss zum Filter. In den Vorplanungen wurde von einem geschätzten Volumenstrom von 2 l/s ausgegangen. Dies haben die Auswertungen für die Monate Juli bis November 2015 bestätigt. Allerdings lag dieser Zeitraum in dem Jahresabschnitt, der erfahrungsgemäß wenig bis gar nicht durch Fremdwasser beeinflusst wird. Von einem höheren Fremdwasserzufluss im Winter ist auszugehen.

Die Monate Juli und August 2015 wurden bei dieser Auswertung nicht berücksichtigt, da während dieses Zeitraumes das Messfenster der Photometersonde im Zulauf aufgrund des in den Sommermonaten fehlenden Fremdwasserzuflusses zeitweise nur von Luft umgeben war und unplausible Messwerte erzeugt wurden. Darüber hinaus wiesen beide Photometersonden in unregelmäßigen Abständen voneinander unabhängige Einzelpeaks bis zum Messbereichsende auf. Da es sich bei den Einzelwerten mit Maximalausschlag um Ausreißer handelt, wurden diese entfernt.

Die gemessene Zulaufkonzentration liegt sowohl für die Maximalwerte als auch für die mittlere Konzentration unterhalb der angegebenen Werte in der Literatur. Ursache hierfür könnte die „Anlaufzeit“ des Systems aufgrund des vorhandenen Wasserkörpers und der damit verbundene schnelle Füllstandsanstieg im Zulauf und die Verdünnung durch nachfließenden „sauberen“ Oberflächenabfluss und nicht zuletzt zeitweise auch das Fremdwasser sein. Weiterhin ergaben aktuelle Untersuchungen zu mittleren AFS-Konzentrationen größerer Einzugsgebiete ebenfalls vergleichsweise geringe Konzentrationen (Fuchs und Eyckmanns-Wolters, 2016). Die Ursachen dafür sind noch nicht umfassend erklärbar.

Mittlere AFS_{aq}-Konzentration bei Regenereignissen mit Fremdwasser und Überstau

Tabelle 8 fasst die Auswertung der AFS_{aq}-Konzentrationen unter Berücksichtigung von Fremdwasser und Entlastungsereignissen zusammen. Die mittlere AFS_{aq}-Konzentration im Zulauf für die Monate September bis November 2015 lag mit 8,3 mg/l im Zulauf und 5,7 mg/l im Ablauf etwas niedriger.

Tabelle 8: Mittlere AFS_{aq}-Konzentration im Zu- und Ablauf (inkl. Fremdwasser und Entlastungsereignisse)

2015	Zulauf: Mittlere AFS _{aq} -Konzentration in mg/l	Ablauf: Mittlere AFS _{aq} -Konzentration in mg/l	Reduzierung in %
Juli	(135 [*])	(8,1 [*])	(94,0 [*])
August	(38,9 [*])	(6,0 [*])	(84,6 [*])
September	7,9	4,5	43,0
Oktober	7,8	4,4	43,6
November	9,1	5,3	41,8
Gesamt	8,3 (36,1)[*]	4,7 (5,7)[*]	42,8 (61,4)[*]

^{*} Fehlmessungen Zulaufkonzentration aufgrund nicht eingetauchter Sonde, Umbau am 20.08.2015

Das Niederschlagsaufkommen und die AFS_{aq}-Konzentrationen aus Zu- und Ablauf aus der Messdatenauswertung zeigt Bild 35. Ein Zusammenhang zwischen Regenintensität und AFS-Konzentration war nicht herzustellen. Trotz der geringen mittleren Zulaufkonzentrationen (vgl. oben) konnten im Laufe eines Regenereignisses häufig AFS_{aq}-Spitzen im Zulauf von bis zu 300 mg/l gemessen werden. Im Ablauf stellen sich diese dann deutlich reduziert dar. In Einzelfällen konnten hier noch Spitzen von 200 mg/l AFS_{aq} gemessen werden.

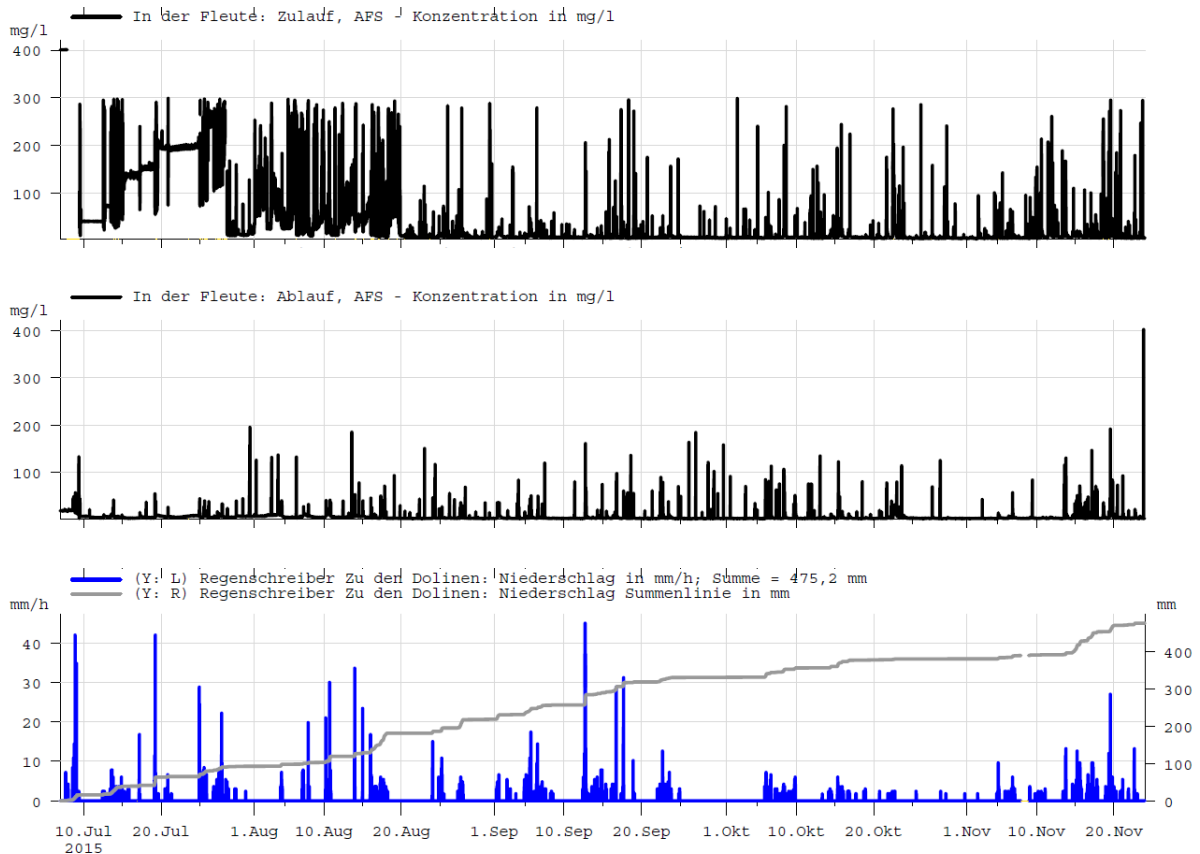


Bild 35: AFS_{aq}-Konzentration im Zu- und Ablauf sowie Niederschlag im Zeitraum vom 7. Juli bis zum 23. November 2015

5.3.3 Auswertung der Rückhaltewirkung für beprobte Einzelereignisse mit besonderer Betrachtung der Schwermetalle

Die kontinuierlichen Messungen mit den Photometersonden belegen, dass es kein repräsentatives Einzelereignis gibt. Wie die Werte in Tabelle 8 zeigen, sind die AFS_{aq}-Konzentrationen bereits im Zufluss phasenweise gering. Ein Ereignis, das die Reinigungswirkung des Filters darstellt, ist in Bild 36 dargestellt. Die mittlere AFS_{aq}-Konzentration der beprobten Ereignisse führt zu folgendem Ergebnis:

- ▶ Zulauf: i. M. 41,3 mg/l (Maximalwert von 58 mg/l und Minimalwert von 34 mg/l)
- ▶ Ablauf: i. M. 12,5 mg/l (Maximalwert 27 mg/l und Minimalwert 3 mg/l).

Die in Kapitel 4.2.1 beschriebenen Schwierigkeiten mit den Probenahmegeräten haben den Umfang der beprobten Ereignisse eingeschränkt. Zwei beprobte Ereignisse, die das Systemverhalten und die Zuflusscharakteristik repräsentieren, werden hier exemplarisch dargestellt. Bei diesen Ereignissen wurden, die Parameter AFS, CSB, BSB₅ und unterschiedliche Schwermetalle analysiert. Die Niederschlagsdaten wurden mit einem einzugsgebietsnahen Niederschlagsmessgerät erfasst. Aufgrund der Entfernung und der Größe des Einzugsgebietes sind dabei Abweichungen durch ortsvariable Niederschläge nicht auszuschließen.

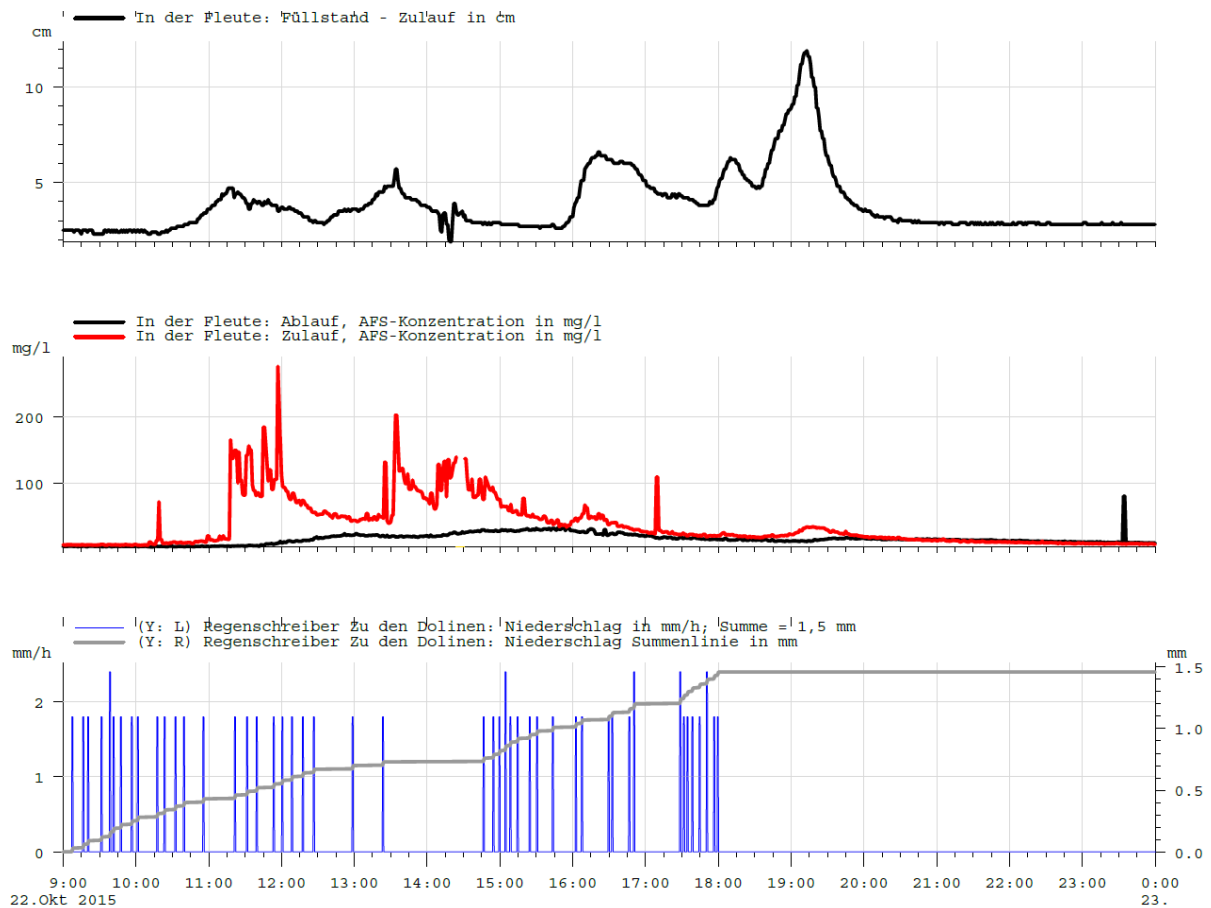


Bild 36: Beispiel eines Einzelereignisses am 22.10.2015 mit Darstellung der AFS_{aq}-Konzentrationen im Zu- und Ablauf (oben) und dem Füllstand im Zulaufbereich (mitte) sowie dem Niederschlag (unten)

Bei dem Ereignis vom 29.07.2015 wurden lediglich 0,6 mm Niederschlag über einen Zeitraum von knapp 30 Minuten gemessen (Bild 37). Erfahrungsgemäß führt ein Niederschlag dieser Größenordnung nicht zu einem nennenswerten Abfluss. Hier lagen wahrscheinlich Abweichungen zwischen den gemessenen und dem über dem Gebiet wirklich gefallenen Niederschlag vor. Die Filteranlage staute auf maximal 65 cm ein. Es kam zu keinem Abschlag (Schwellenhöhe 80 cm).

Die kontinuierlichen Messdaten zeigen eine deutliche Reduktion der AFS_{aq}-Konzentrationen, die allerdings während des Ereignisses zumeist unter 50 mg/l lagen. Zu Beginn und zum Ende der Einstausituation wurden kurzzeitige Spitzenwerte von 160 mg/l und 60 mg/l gemessen. Auch bei den relativ geringen Werten ist während des Ereignisses eine deutliche Reduzierung der AFS_{aq}-Konzentration zu erkennen. Lediglich um 17:10 Uhr kam es kurzzeitig zu einem starken Anstieg der AFS_{aq}-Konzentration im Ablauf. Allerdings handelt es sich hierbei um einen kurzzeitigen maximalen Ausschlag in einer Größenordnung, die deutlich über dem Spektrum der Messwerte lag. Dieser Zweiminutenwert entspricht einem Messintervall, so dass mit hoher Wahrscheinlichkeit ein Partikel vor dem Messfenster diesen Ausschlag hervorgerufen hat.

Die kontinuierlichen Daten der Parametermessung stimmen verhältnismäßig gut mit den Analyseergebnissen überein. Der auf der Basis der Analyseergebnisse ermittelte Stoffrückhalt liegt bei 76,5 %.

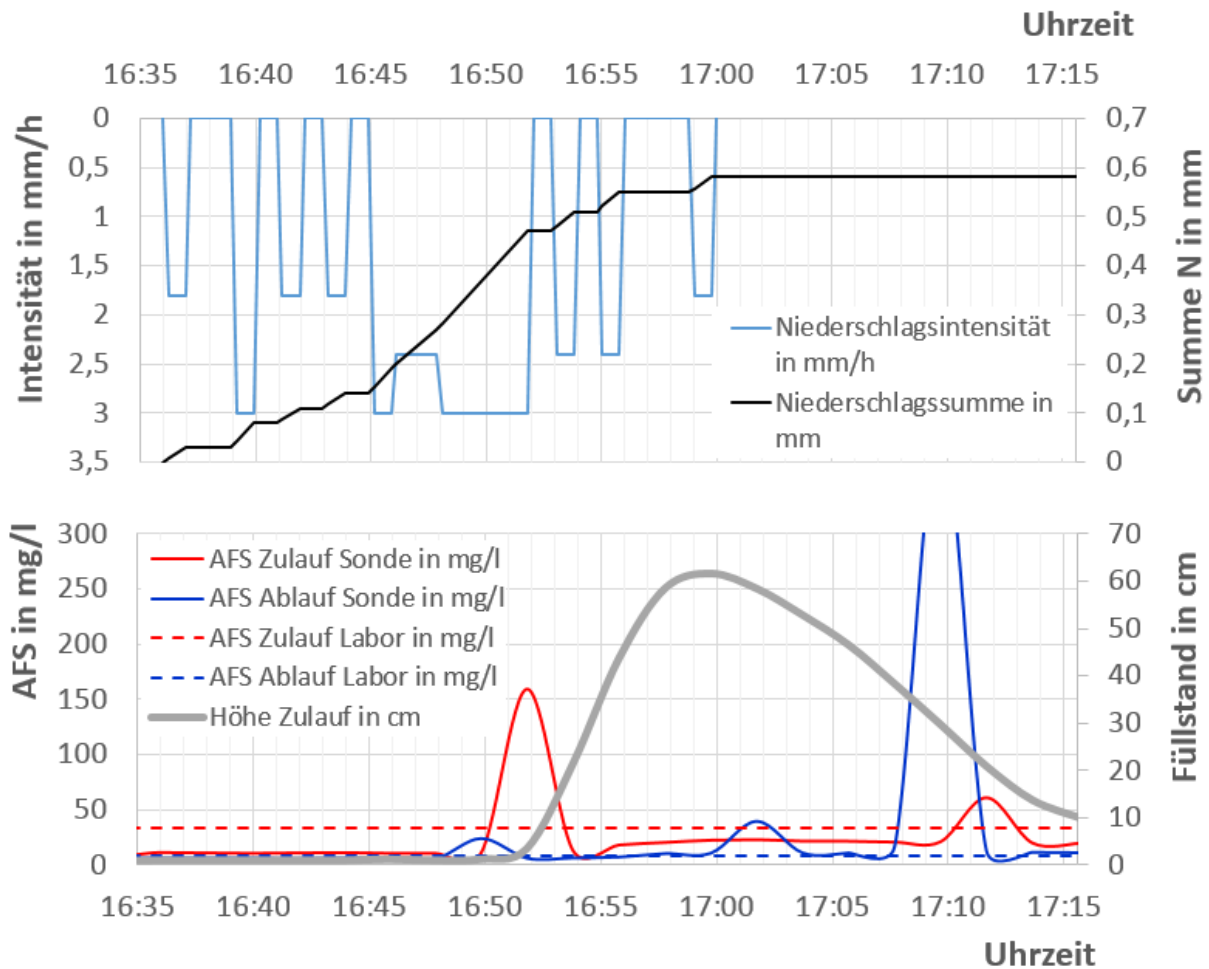


Bild 37: Messergebnisse für ein Regenereignis mit Probenahme am 29.07.2015 (bei dem Peak der Ablaufkonzentration um ca. 17:10 handelt es sich um einen Messfehler)

Auch die Schwermetallgehalte für Zu- und Ablauf wurden bei diesem Ereignis beprobt. Die Ergebnisse aus der Laboranalyse sind in Tabelle 9 dargestellt. Wie in der Tabelle zu erkennen, wurden alle beprobten Schwermetalle deutlich reduziert. Die exakte Quantifizierung ist jedoch eingeschränkt, da die Konzentrationen im Zu- und Ablauf teilweise unterhalb der Bestimmungsgrenze lagen.

Beim Regenereignis am 04.08.2015 handelte es sich um zwei aufeinanderfolgende Ereignisse mit einer 30 minütigen Unterbrechung (Bild 38) und einer Gesamtniederschlagshöhe von etwa 5 mm. Die Probenahme wurde allerdings ohne Unterbrechung durchgeführt. Während der ersten Eintauphase stieg der Füllstand auf knapp 70 cm an. Der Zufluss wurde also komplett behandelt. In der zweiten Eintauphase kam es über einen Zeitraum von 4 Minuten (14:18 Uhr bis 14:22 Uhr) zu einem geringen Abschlag bei maximalem Füllstand von 82 cm. Um 14:10 wurde eine maximale Niederschlagsintensität von 7,2 mm/h gemessen. Dies entspräche bei gleichmäßiger Überregnung des Einzugsgebietes (ohne Berücksichtigung von Niederschlagsverlusten) einem Zufluss von 340 l/s. Der behandlungspflichtige Zufluss wäre dabei um mehr als das Zweieinhalbfache überschritten.

Um 14:30 wurde im Zulauf des Filters kurzzeitig eine AFS_{aq}-Konzentration von 180 mg/l gemessen, die sich mit entsprechender Verzögerung von vier Minuten deutlich reduziert mit 30 mg/l im Ablauf registriert wurde. Der aus den Laborwerten errechnete AFS-Rückhalt während des gesamten Ereignis-

nisses beträgt 66,7 %. Auch hier stimmen die kontinuierlichen Daten der Parametermessung verhältnismäßig gut mit den Analyseergebnissen überein.

Tabelle 9: Schwermetallkonzentrationen im Zu- und Ablauf sowie Reduzierung der Schwermetallkonzentrationen (Ereignis am 29.07.2015)

Parameter	Konzentration im Zulauf in mg/l	Konzentration im Ablauf in mg/l	Reduzierung der Konzentration in %
Gesamt (partikulärer + gelöster Anteil)			
Blei	0,0427	0,0075	82,4
Cadmium	< 0,001	< 0,001	n. B.
Chrom	0,0066	0,001	84,8
Kupfer	0,0882	0,0299	66,1
Nickel	0,0036	< 0,002	mindestens 44,4
Zink	0,304	0,0787	74,1
Gelöster Anteil			
Blei	0,0029	< 0,002	mindestens 31,0
Cadmium	< 0,001	< 0,001	n. b.
Nickel	< 0,002	< 0,002	n. b.
Zink	0,109	0,0445	59,2
Chrom	0,0017	0,001	41,2
Kupfer	0,0263	0,0204	22,4

n. b.: nicht bestimmbar, Konzentrationen in Zu- und Ablauf unterhalb der Nachweisgrenze

Für das Ereignis vom 04.08.2015 wurde ebenfalls eine Analyse der einzelnen Schwermetalle im Labor durchgeführt. In Tabelle 10 sind die Ergebnisse der Laboranalyse dargestellt. Auch bei diesem Ereignis war die Reduktion der Schwermetallkonzentrationen vergleichsweise hoch. Bedingt durch Konzentrationen unterhalb der Bestimmungsgrenze war die Reduktion nicht für alle Parameter exakt quantifizierbar. Die Ergebnisse der beiden dargestellten Einzelereignisse liegen in der Größenordnung der in Tabelle 12 dargestellten Ergebnisse aller beprobten Ereignisse.

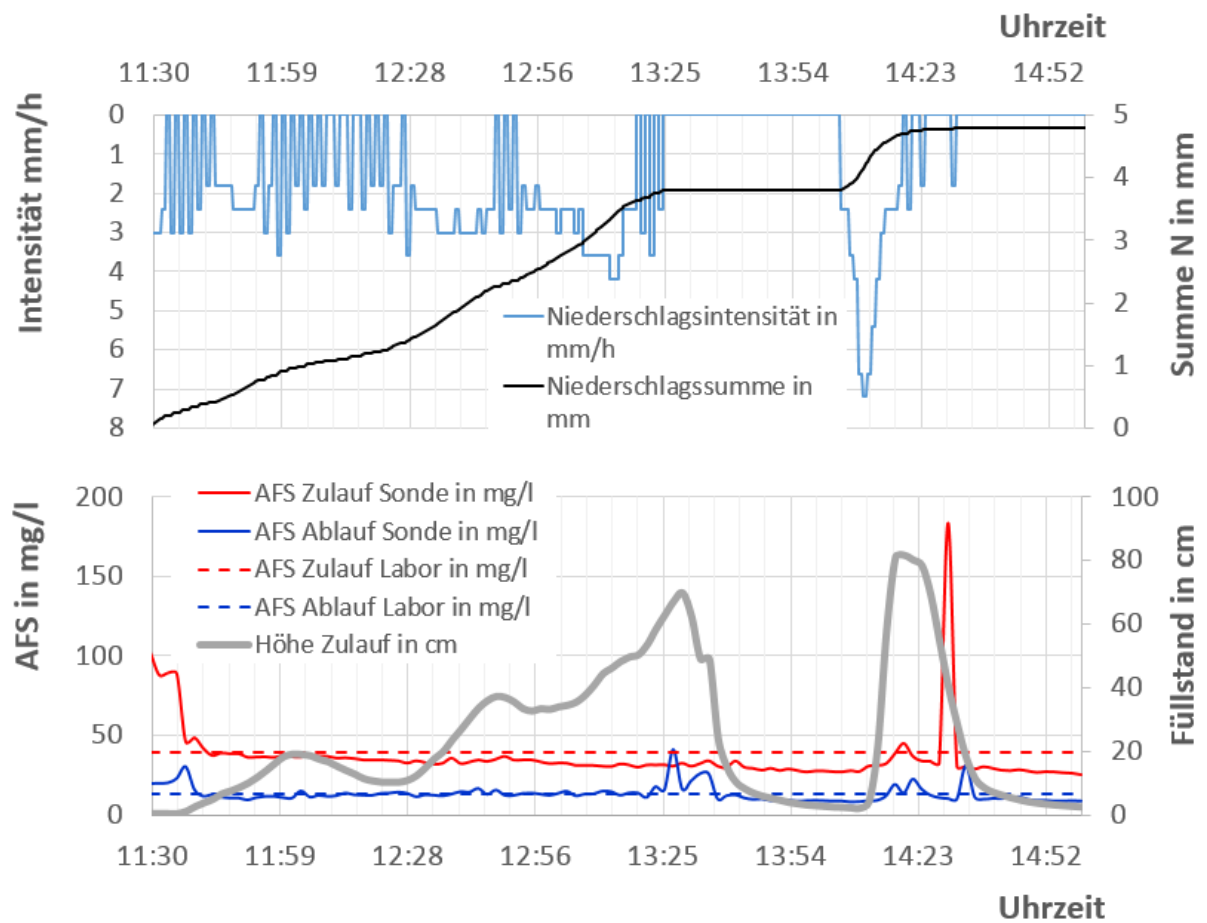


Bild 38: Ergebnisse der Messungen mit Photometersonden für ein Regenereignis mit ergänzender Probenahme am 04.08.2015

Tabelle 10: Mittlere Schwermetallkonzentrationen im Zu- und Ablauf und Reduzierung der Schwermetalle bei einem Regenereignis am 04.08.2015

Parameter	Konzentration im Zulauf in mg/l	Konzentration im Ablauf in mg/l	Reduzierung der Konzentration in %
Gesamt (partikulärer + gelöster Anteil)			
Blei	0,0603	0,0086	85,7
Cadmium	< 0,001	< 0,001	n. b.
Chrom	0,0056	< 0,001	Mindestens 82,1
Kupfer	0,198	0,0493	75,1
Nickel	0,0035	< 0,002	Mindestens 42,9
Zink	0,496	0,134	73,0
Gelöster Anteil			
Blei	0,0066	0,0026	60,6
Cadmium	< 0,001	< 0,001	n. b.
Nickel	0,0027	< 0,002	Mindestens 25,9
Zink	0,235	0,0807	65,7
Chrom	0,0037	< 0,001	Mindestens 73,0
Kupfer	0,0558	0,0434	22,2

n. b.: nicht bestimmbar, Konzentrationen in Zu- und Ablauf unterhalb der Nachweisgrenze

Tabelle 11 enthält die Spannweite der Konzentrationen im Zulauf aus insgesamt sechs Proben. Die Konzentrationen der einzelnen Proben unterliegen einer hohen Schwankungsbreite.

Tabelle 11: Gemessene Spannweite der Konzentration und Zusammensetzung der Schwermetalle im Zulauf

Schwermetalle	Mittlere Konzentration in mg/l	Schwankungsbreite in mg/l	Mittlerer partikulärer Anteil in %	Mittlerer gelöster Anteil in %
Blei (Pb)	0,042	0,0274 - 0,0603	94,4	5,6
Cadmium (Cd)	< 0,001	< 0,001 - 0,0015	66,7*	33,3
Chrom (Cr)	0,005	0,0029 - 0,0066	75,2	24,8
Kupfer (Cu)	0,111	0,0566 - 0,198	70,3	29,7
Nickel (Ni)	0,004	0,002 - 0,0065	71,2	28,8
Zink (Zn)	0,327	0,234 - 0,496	42,1	57,9

** Nur ein Ereignis mit Konzentrationen über der Bestimmungsgrenze*

Bei den untersuchten Proben zeigt sich, dass ein erheblicher Anteil der Schwermetalle im Niederschlagswasser gelöst ist. Bezogen auf die Gesamtmasse liegen fast 50 % der Schwermetalle in gelöster Form vor. Diese Ergebnisse werden von Huth et al. (1995) bestätigt, die bei Dachabflüssen folgende Anteile gelöster Schwermetalle ermittelten:

- ▶ Kupfer (Cu) 52,2 %
- ▶ Cadmium (Cd) 61,1 %
- ▶ Blei (Pb) 10,3 %
- ▶ Zink (Zn) 55,4 %

Ein Großteil der partikulären Schwermetalle adsorbiert an feinen Partikeln mit einem Durchmesser unter 63 µm. Schmitt et al. (2013) haben den Rückhalt von Regenklärbecken untersucht und hierbei auch die einzelnen Partikelfractionen betrachtet. Dabei wurde für Partikel unter 63 µm ein frachtgewichteter mittlerer Rückhalt von 26 % festgestellt. Bei rein mechanischen Regenwasserbehandlungsanlagen muss davon ausgegangen werden, dass der gelöste Anteil gar nicht entfernt werden kann. Auch der partikulär gebundene Anteil wird nur teilweise entfernt. Um zuverlässig über 50 % der Schwermetalle aus dem Regenwasser abtrennen zu können, sind weitergehende Behandlungsmechanismen (z. B. Filtration) also unumgänglich.

Bei der Großfilteranlage „TRF Fleute“ wird nicht nur der partikulär gebundene Anteil der Schwermetalle behandelt, sondern zusätzlich ist es möglich, gelöste Schwermetalle zu reduzieren. In Tabelle 12 sind die Ergebnisse aus insgesamt sechs Messungen zusammengefasst. Dabei handelt es sich derzeit nur um einen qualitativen Vergleich von Zu- und Ablauf. Um die Wirksamkeit präzise quantifizieren zu können, sind weitere Laboruntersuchungen mit realem Regenwasser erforderlich. Systembedingt traten teils kontroverse Messergebnisse auf, daher wurde zur Darstellung der Ergebnisse der Median gewählt.

Tabelle 12: Aus sechs beprobten Einzelereignissen ermittelte Reduktion von Schwermetallen (Darstellung als Median)

Schwermetall	Gesamtreduktion in % (Median)	Reduktion des partikulären Anteils in % (Median)	Reduktion des gelösten Anteils in % (Median)
Blei	55,0	68,8	45,9
Cadmium	n. b.	n. b.	n. b.
Chrom	55,1	51,1	57,1
Kupfer	45,9	65,0	- 26,2
Nickel	43,7	44,4	25,9
Zink	50,2	43,4	65,4

n. b.: Konzentration unterhalb der Bestimmungsgrenze

Die Ergebnisse zeigen, dass der Schwermetallrückhalt durch technische Filtration auch außerhalb des Labors funktioniert. Auffällig ist, dass der Anteil des gelösten Kupfers entgegen aller anderen Parameter erhöht auftritt. Dies könnte grundsätzlich mit unterschiedlichen Wasserzusammensetzungen (pH-

Wert, Metall-Ionen-Konzentration etc.) zusammenhängen, die zur Rücklösung von Kupferionen führen. Auch hierzu sind noch weitergehende Versuche notwendig, um den tatsächlichen Rückhalt zuverlässig quantifizieren zu können. Eine absolut fehlerfreie Beprobung von Zu- und Ablauf eines dauer-gestauten Systems war mit den gegebenen Geräten nicht durchführbar. Es ist nicht auszuschließen, dass die eingeschränkte Gerätequalität der Probennehmer zu dem gemessenen negativen Kupferrückhalt beigetragen hat.

Die Ökotoxizität von Schwermetallen hängt nicht nur von der Konzentration und Fracht ab, die in die Gewässer eingeleitet wird. Gerade die gelösten Schwermetalle wirken toxisch. Die Art, in der die Schwermetalle vorliegen, ist ebenfalls von hoher Bedeutung. In erster Linie sind es die freien Metall-Ionen und deren Aquo-Komplexe, von denen eine ökotoxikologische Wirkung ausgeht. Diese besitzen eine höhere Bioverfügbarkeit und interagieren mit Zellrezeptoren. Zwar werden auch Metallionen wie Al^{3+} , Cu^{2+} und Cd^{2+} in Form von Komplexen in geringen Maßen aufgenommen, die Bedeutung dieser Komplexe ist jedoch in Bezug auf die Toxizität eher gering (Fent, 2013).

Eine gezielte Untersuchung zum Rückhalt von gelösten Schwermetallen und zur weiteren Optimierung des Filtermaterials wurde in einer Laboranlage der Fachhochschule Münster durchgeführt und ist in Kapitel 6.6 dargestellt.

5.4 Bedingungen und Ergebnisse während der Betriebsphase III

Die Ergebnisse der Laboranalysen der Betriebsphase II zeigten, dass erhebliche Anteile der Schwermetalle im Zulauf der Anlage gelöst vorlagen. Der Vergleich der Proben aus Zu- und Ablauf belegt, dass der Filteraufbau dieser Betriebsphase zwar zu einer deutlichen Reduzierung der Schwermetalle führte, jedoch in Bezug auf Kupfer nur eingeschränkt wirkte (Tabelle 12). Daher wurde im Rahmen von Laboruntersuchungen (Kapitel 6.6) untersucht, mit welchen Substraten ein nennenswerter Schwermetallrückhalt möglich ist.

Der Filteraufbau der Betriebsphase III resultiert aus den Ergebnissen dieser Untersuchungen und den Erfahrungen aus den Betriebsphasen I und II. Da jedoch durch Laboruntersuchungen das Systemverhalten bei realen Oberflächenabflüssen nur eingeschränkt abgebildet werden kann, wurden in zwei Filterstraßen verschiedene Materialkombinationen eingebaut. Ziel war auch hier, das Optimum zwischen Reinigungsleistung und Betriebsstabilität.

Am 13.05.2016 wurden die Straßen 1 und 3 neu ausgerüstet. Anstelle des vorherigen Adsorptionsmaterials Calcium-Silikat (vgl. Betriebsphase II) wurde für die Betriebsphase III als Stüttschicht 4 cm Zeolith 1 (Körnung 8 bis 16 mm) und als zweite Schicht 4 cm Zeolith 2 (Körnung 8 bis 10 mm) eingebracht (Bild 39). Zum Rückhalt feinstpartikulärer Stoffe wurden 5 cm Blähton aufgeschüttet. Um den Austrag der Substrate zu verhindern und um den Rückhalt partikulärer Stoffe zu verbessern, wurde zuoberst eine Lage aus 5 cm hohen Filtermatten mit einer Porengröße von 20 ppi eingebracht.



Bild 39: Schichtaufbau mit Zeolith 1 (8-16 mm) und Zeolith 2 (8-10 mm)

Witterungsbedingt konnte der Einbau der Straße 2 erst am 19.05.2016 erfolgen. Bei der Ausrüstung dieser Filterstraße lag der Fokus auf einem maximalen Stoffrückhalt. Die unterste Lage bestand aus einer 4 cm hohen Stüttschicht aus Zeolith 1 (Körnung 8 bis 16 mm). Darüber wurden eine 5 cm hohe Schicht aus Blähton (Körnung 2 bis 10 mm) und darüber eine 4 cm hohe Substratschicht aus graunuliertem Eisenhydroxid (GEH) (Körnung 2 bis 4 mm) eingebaut. Abschließend wurden die Substratschichten mit Filtermatten und einer Lage Filtervlies (Straße 2) abgedeckt. Folgender Filteraufbau in den jeweiligen Filterstraßen wurde gewählt:

Straße 1	Straße 2	Straße 3
5cm Filtermatte	5cm Filtermatte	5cm Filtermatte
	Filtervlies	
5 cm Blähton (2 bis 10 mm)	4cm GEH (2 bis 4 mm)	5 cm Blähton (2 bis 10 mm)
4 cm Zeolith (8 bis 10 mm)	5 cm Blähton (2 bis 10 mm)	4 cm Zeolith (8 bis 10 mm)
4 cm Zeolith (8 bis 16 mm)	4 cm Zeolith 1 (8 bis 16 mm)	4 cm Zeolith (8 bis 16 mm)

Um die Gefahr von Randumläufigkeiten auszuschließen, wurden die Filtermatten in der dritten Betriebsphase um die Gitterroste der Auftriebssicherung herumgeführt (Bild 40). Dadurch wurde im Randbereich die fünf Zentimeter dicke Filtermatte auf etwa einen Zentimeter zusammengepresst.

Die Inbetriebnahme des Filters erfolgte am 13.05.2016. Das erste Regenereignis nach der Inbetriebnahme fand am 15.05.2016 statt. Nach diesem Ereignis war ein stetiger Anstieg des Füllstandes im Zulauf des Bauwerks zu beobachten (Bild 41). Die Absenkung der Füllstände durch hydrostatischen Druckausgleich im Filter fand allerdings nur verzögert statt. Es ist davon auszugehen, dass vor allem durch die neu eingebaute Filterstraße 2 der Füllstand in der Anfangsphase wieder normale Werte annahm. Innerhalb weniger Tage war jedoch eine kontinuierliche Steigerung des Füllstandes infolge des dauerhaften Fremdwasserzuflusses zu beobachten. So konnte nach einigen Regenereignissen der Füllstand zunächst relativ schnell wieder auf unter 20 cm abfallen. Nach etwa einem Monat Betriebszeit, hatten jedoch auch die hohen Füllstände kaum noch Einfluss auf die Filtrationsgeschwindigkeit. Im Juni fiel der Füllstand kaum noch unter 30 cm und lag im Durchschnitt bei 57,3 cm. Da aufgrund der bestehenden Betriebserfahrungen und des rechnerisch möglichen Frachtaufkommens

nicht von einer Kolmation des Filters auszugehen war, erfolgte eine Inspektion des Bauwerkes und der Filterschichten. Dabei stellte sich heraus, dass die Filtermatten beim Festziehen der Auftriebssicherung zu stark komprimiert wurden. Dies führte zu einer nachlassenden Durchlässigkeit.



Bild 40: Filtermatten im Randbereich der Filterstraßen

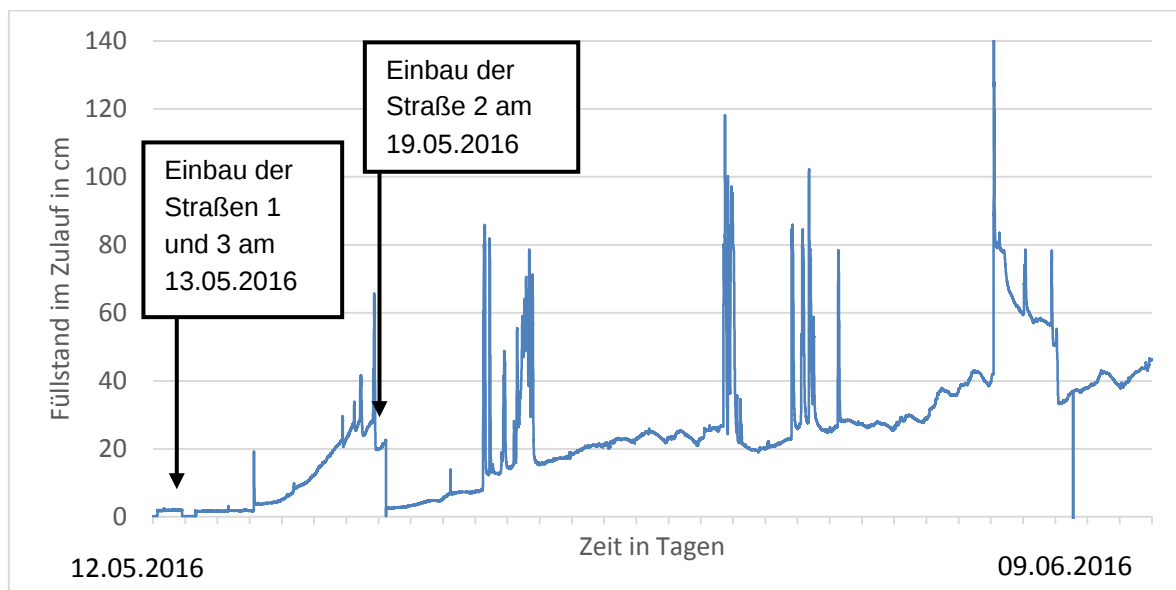


Bild 41: Kontinuierlicher Anstieg des Füllstands im Zulauf nach dem Einbau am 13.05.2016 bzw. 19.05.2016 (13.05.2016 – 11.06.2016)

Die Verminderung der Kompression der Filtermatten, führte zu einem verbesserten hydrostatischen Druckausgleich, so dass der Füllstandsabfall nach einem Regenereignis wieder unmittelbar eintrat (Bild 42). Allerdings stellte sich der ursprüngliche Zustand, wie unmittelbar nach einem Filterwechsel üblich, nicht wieder ein. Möglicherweise haben sich durch die häufigeren Abschlagsereignisse verstärkt Schmutzstoffe auf dem Filter abgelagert. Da der Filter unter diesen Umständen keine repräsentative Wirkung zeigte wurde auf eine kostenintensive Beprobung des Zu- und Ablaufes in der Betriebsphase III verzichtet.

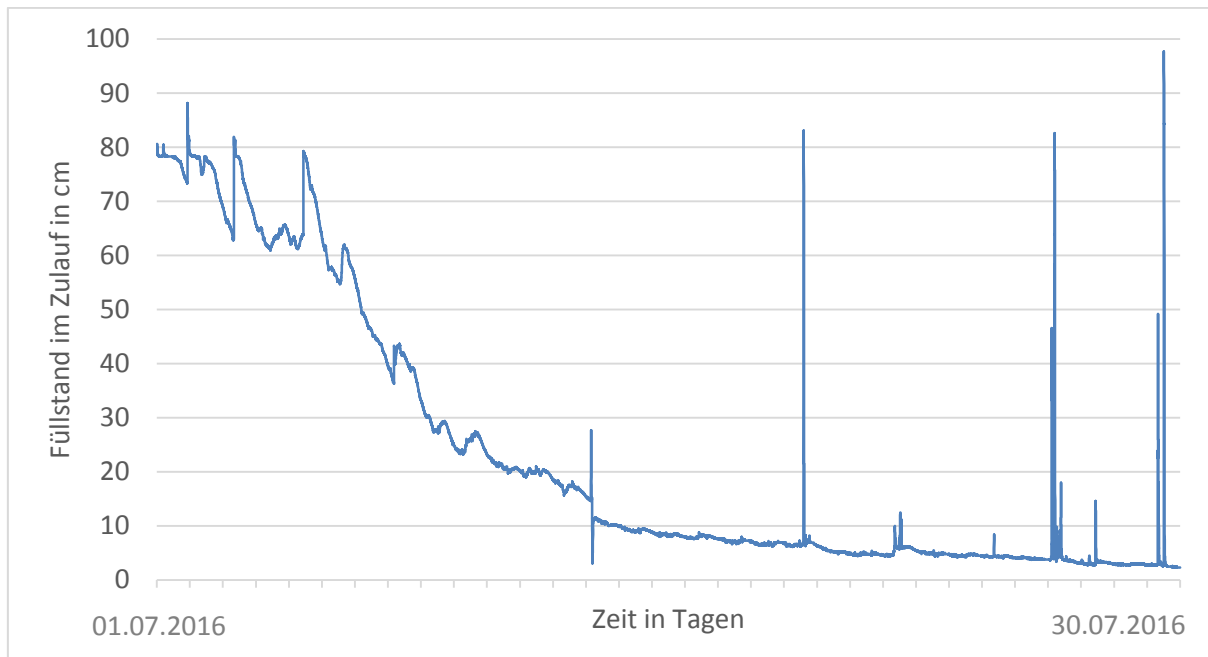


Bild 42: Wiederherstellen der Durchlässigkeit der Filteranlage durch Lösen der Auftriebssicherung

5.5 Bedingungen und Ergebnisse während der Betriebsphase IV

Mit dem Wechsel der Filtersubstrate und der Reinigung der Anlage in der Zeit vom 22.11.16 bis zum 24.11.2016 begann die Betriebsphase IV. Gegenüber dem Aufbau in Betriebsphase III wurden die Filtermatten, die bisher zum Einsatz kamen, gegen strukturell andersartige Filtermatten mit einer deutlich höheren Durchlässigkeit getauscht (Bild 43). Hierdurch wurde das Risiko einer Abnahme der Durchlässigkeit durch komprimierte Filtermatten reduziert.

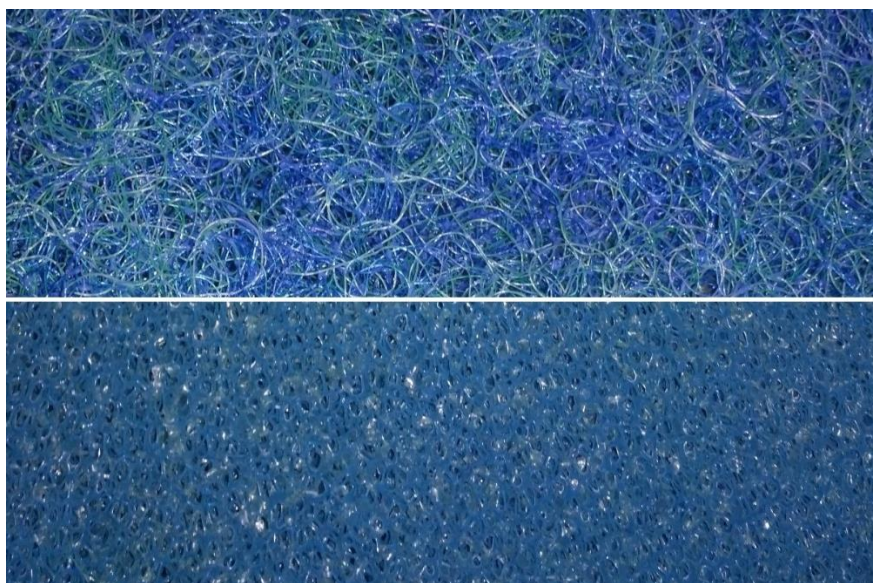


Bild 43: Die durchlässige neue Filtermatte (oben) und die undurchlässigere alte Filtermatte (unten)

Als Substrate wurden in die beiden äußeren Straßen Zeolith (Körnung 8 bis 10 mm) und Blähton (Körnung 2 bis 10 mm) eingebracht. In der mittleren Filterstraße wurde das Filtervlies entfernt und gegen neue Filtermatten getauscht. Die Gesamthöhe des Filteraufbaus wurde auf 16 cm reduziert, um das Anbringen der Auftriebssicherung zu erleichtern. Folgender Filteraufbau wurde in den jeweiligen Filterstraßen gewählt:

Straße 1	Straße 2	Straße 3
3,8 cm Filtermatte	3,8 cm Filtermatte	3,8 cm Filtermatte
	4cm GEH (2-4 mm)	
6 cm Blähton (2-10 mm)	5 cm Blähton (2-10 mm)	6 cm Blähton (2-10 mm)
6 cm Zeolith (8-10 mm)	4 cm Zeolith 1 (8-10 mm)	6 cm Zeolith (8-10 mm)

Die Auswertung der Messdaten der Betriebsphase IV zeigte, dass noch immer oder auch erneut Fehleinleitungen im Einzugsgebiet auftraten. Die Verläufe bei Trockenwetterzufluss wiesen allerdings nicht den Tagesgang eines klassischen Wohnhauses auf. In Bild 44 ist exemplarisch der Verlauf der AFS_{aq} -Werte bei einer Fehleinleitung dargestellt. Obwohl kein Niederschlag auftrat, kam es zu einem deutlichen Anstieg der gemessenen AFS_{aq} -Konzentration im Zulauf. Mit etwa zwei Stunden Verzögerung konnte dieser Anstieg, deutlich gedämpft, auch im Ablauf gemessen werden.

Diese sehr charakteristische Kurve konnte außerdem auch am 01.12.16, am 05.12.16 und am 16.12.16 beobachtet werden. Die Zeitdifferenz bis zum Wiederfinden der Konzentrationsspitze des Zulaufs im Abfluss variierte dabei deutlich, was auf den unterschiedlichen Fremdwasserzufluss an den jeweiligen Tagen zurückzuführen ist.

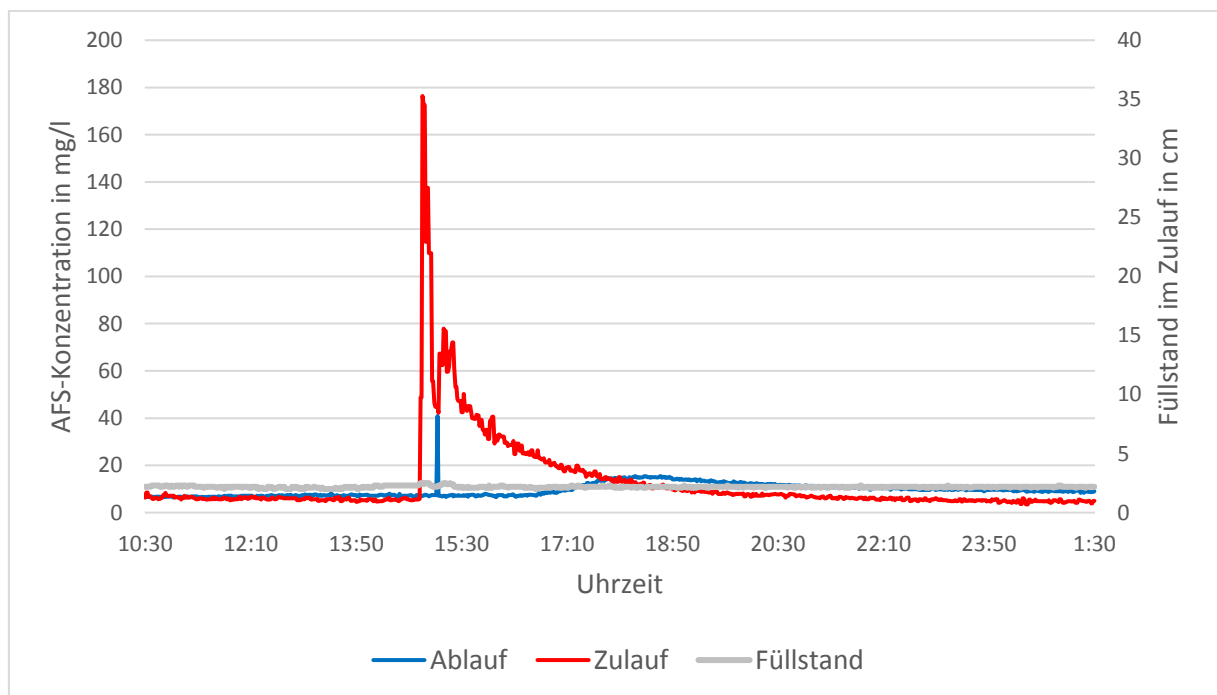


Bild 44: Darstellung der AFS_{aq} -Werte (13.12.16) die auf eine mögliche Fehleinleitung im Einzugsgebiet Fleute hinweisen

An den AFS_{aq}-Verläufen lässt sich die starke zeitliche Verzögerung der AFS-Spitze durch die Speicherwirkung im System gut erkennen. In dem Zeitraum, der in Bild 44 dargestellt ist, dauerte es etwa zwei Stunden, bis eine erhöhte AFS-Konzentration auch im Ablauf erkennbar wird. Bei Regenereignissen konnte diese systembedingte Verzögerung ebenfalls beobachtet werden. Aufgrund der höheren Zuflüsse traten die Verzögerungen aufgrund der kürzeren Verweilzeiten weniger ausgeprägt auf. Dennoch zeigt dieser Sachverhalt, dass bei klassischer Probenahme zwei völlig unterschiedliche Abflusssituationen beprobt und verglichen werden. Dies erklärt auch die teilweise kontroversen Ergebnisse der zuvor beprobten Ereignisse. Auch bei einer zeitlichen Verzögerung der Probenahme im Ablauf besteht das Problem, dass der kausale Zusammenhang zwischen Zu- und Ablaufkonzentration nicht erfasst wird. Die Beprobung mit klassischen Probenahmegeräten eignet sich hier nur bedingt. Eine valide Bilanzierung mit kleinvolumiger Probenahme ist bei durgestauten Systemen nicht möglich. In der Betriebsphase IV wurde darauf verzichtet. Die prinzipielle Wirksamkeit des Filters war jedoch mit Hilfe der Onlinemesstechnik nachzuvollziehen. Zwei exemplarische Ereignisse werden hier beschrieben.

In Bild 45 ist ein Regenereignis vom 07.02.2017 dargestellt. Im Zulauf konnte in der Spitze eine AFS_{aq}-Konzentration von etwa 35 mg/l gemessen werden. Diese wurde mit einer Verzögerung von ca. 25 min im Ablauf mit etwa 15 mg/l gemessen.

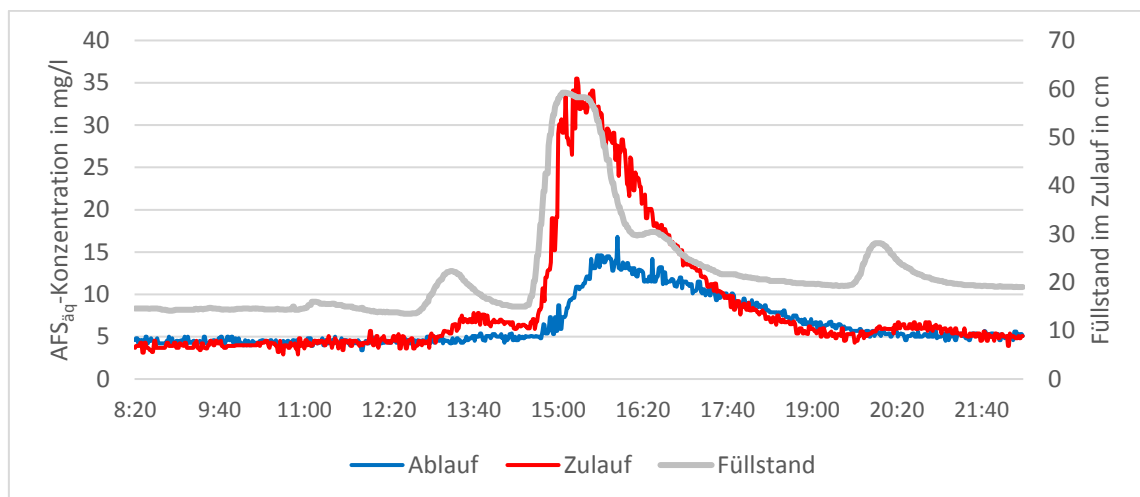


Bild 45: AFS_{aq}-Konzentrationen im Zu- und Ablauf des Filters "In der Fleute" am 07.02.2017

Bild 46 stellt ein Regenereignis vom 19.02.2017 dar. Gegenüber dem Ereignis vom 07.02.2017 hatte dieses einen deutlich geringeren Zufluss. Dies zeigt der geringe Einstau im Zulauf von nur 35 cm (gegenüber etwa 70 cm). Der geringere Zufluss wirkte sich ebenfalls auf die Verzögerung der AFS-Spitzen aus. Die zeitliche Verzögerung beträgt in diesem Beispiel etwa 90 min. In der Spitze konnte eine AFS_{aq}-Konzentration von 25 mg/l gemessen werden. Im Ablauf wurde nur noch Konzentrationen von 12 mg/l bzw. 10 mg/l gemessen.

Die Wirkung von Regenwasserbehandlungsanlagen hängt von zahlreichen Faktoren ab. Hierzu zählen unter anderem die Wasserzusammensetzung und die Partikelgrößenverteilung. Es ist davon auszugehen, dass der prozentuale Wirkungsgrad einer Anlage zur Regenwasserbehandlung bei vergleichbar geringen Zuflusskonzentrationen ebenfalls geringer ausfällt, zumal bei geringen AFS-Konzentrationen auch gleichzeitig mit einem höheren Feinanteil zu rechnen ist. Ablaufkonzentrationen in den hier dargestellten Konzentrationsbereichen von ca. 10 mg/l sind kaum noch weitergehend zu reduzieren.

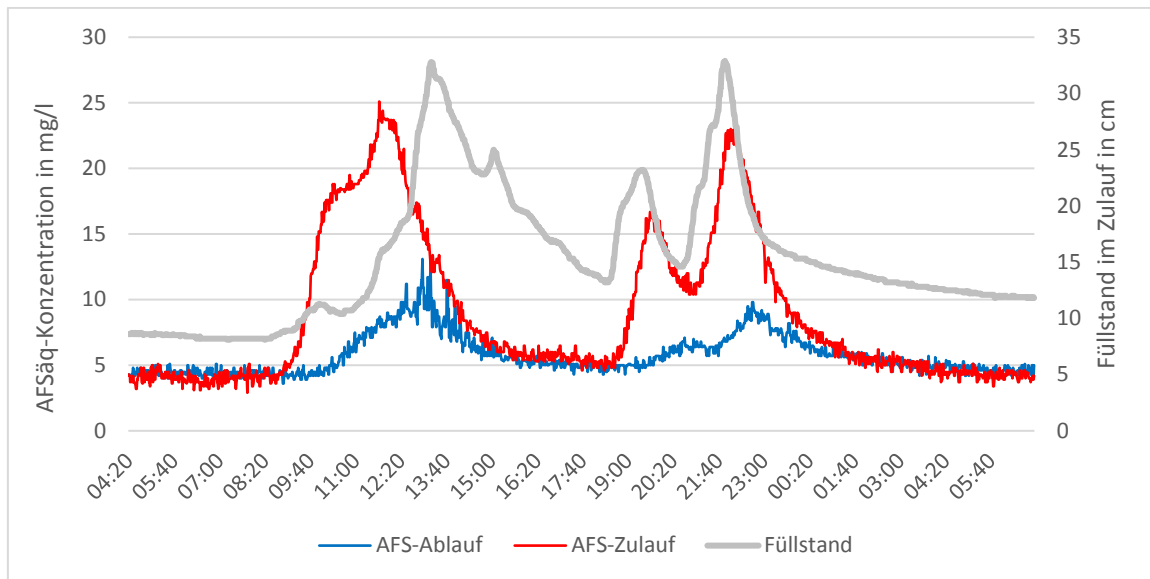


Bild 46: AFSäq-Konzentrationen im Zu- und Ablauf der Filteranlage "In der Fleute" am 19.02.2017

6 Laboruntersuchungen zur Optimierung des Filtermaterials

6.1 Untersuchte Fragestellungen

Eine mathematische Beschreibung der Filtrationsprozesse und eine Ableitung der Wirksamkeit von Filtersystemen sind bislang nur eingeschränkt möglich (Grüning und Schmitz, 2017). Die bestehenden Modellansätze weisen Vereinfachungen und damit verbundene Unsicherheiten auf. Insofern muss die Wirkung des Filtermaterials durch Laborversuche und Untersuchungen im großtechnischen Einsatz erfolgen. Folgendes Aufgabenspektrum muss ein Filter zur Regenwasserbehandlung erfüllen:

- ▶ Rückhalt der feinpartikulären Stoffe (AFS₆₃)
- ▶ Rückhalt maßgeblicher Inhaltsstoffe von Oberflächenabflüssen, die zu einem nennenswerten Anteil an der feinen Stofffraktion adsorbiert sind (partikulär gebundene Schadstoffe wie Schwermetalle und Kohlenwasserstoffe)
- ▶ Rückhalt gelöster Stoffe, wie gelöste Schwermetalle und auch von Stoffen, die bislang kaum Gegenstand der Betrachtung sind (z. B. Biozide)
- ▶ Langfristiges stabiles Betriebsverhalten bei niederschlagsbedingt dynamischen Bedingungen und zeitweise hochgradig verunreinigten Zuflüssen

Zentrale Frage dabei ist, ob der Porenraum des Filters, die rechnerische Fracht an Feststoffen über den Zeitraum möglicher Betriebsintervalle aufnehmen kann. Außerdem ist die Frage zu klären, ob trotz der vergleichsweise kurzen Kontaktzeit ein Wechsel der ggf. im niedrigen pH-Wert-Bereich gelösten Schwermetalle in die partikuläre Form möglich ist.

6.2 Untersuchungskonzept und Beschreibung der Laboranlage zur Ermittlung des Feinstoffrückhalts

Neben den großtechnischen Untersuchungen erfolgten an der Fachhochschule Münster zusätzliche Untersuchungen des bislang bewährten Filteraufbaus, der während der Betriebsphase I verwendet wurde sowie eine Optimierung des Filteraufbaus. Ziele der Untersuchungen in der Laboranlage waren:

- ▶ Ermittlung der Wirkung unterschiedlicher Filteraufbauten
- ▶ Optimierung der Filteraufbauten im Hinblick auf die Wirkung und den erforderlichen Wartungsaufwand
- ▶ Entwicklung von Testverfahren zur Bestimmung der Filterwirkung

Vordringliche Aufgabe des Filters ist der Rückhalt der Feinfraktion (AFS₆₃). Grobstoffe sollen möglichst bereits im Sedimentationsraum und an der untersten Filterschicht (Grenzschicht der flüssigen Phase zum Filter) zurückgehalten werden. Vor diesem Hintergrund wurde untersucht, welche maximale Rückhaltewirkung des Filters für AFS₆₃ erreicht werden kann.

Die Untersuchungen erfolgten mit einem 30 · 30 cm großen Filtermodell (Grundfläche) aus Acrylglas, das zu diesem Zweck konzipiert wurde (Bild 47). In dem Filtermodell war ein Filteraufbau wie in der großtechnischen Anlage möglich. Die Durchströmung erfolgt ebenfalls von unten nach oben. Die Untersuchung der Filterwirkung erfolgte durch Trübungsmessungen und Partikelzählung. Aus einem Vorlagebehälter wurde der zu filtrierende Zufluss in die Anlage gepumpt.

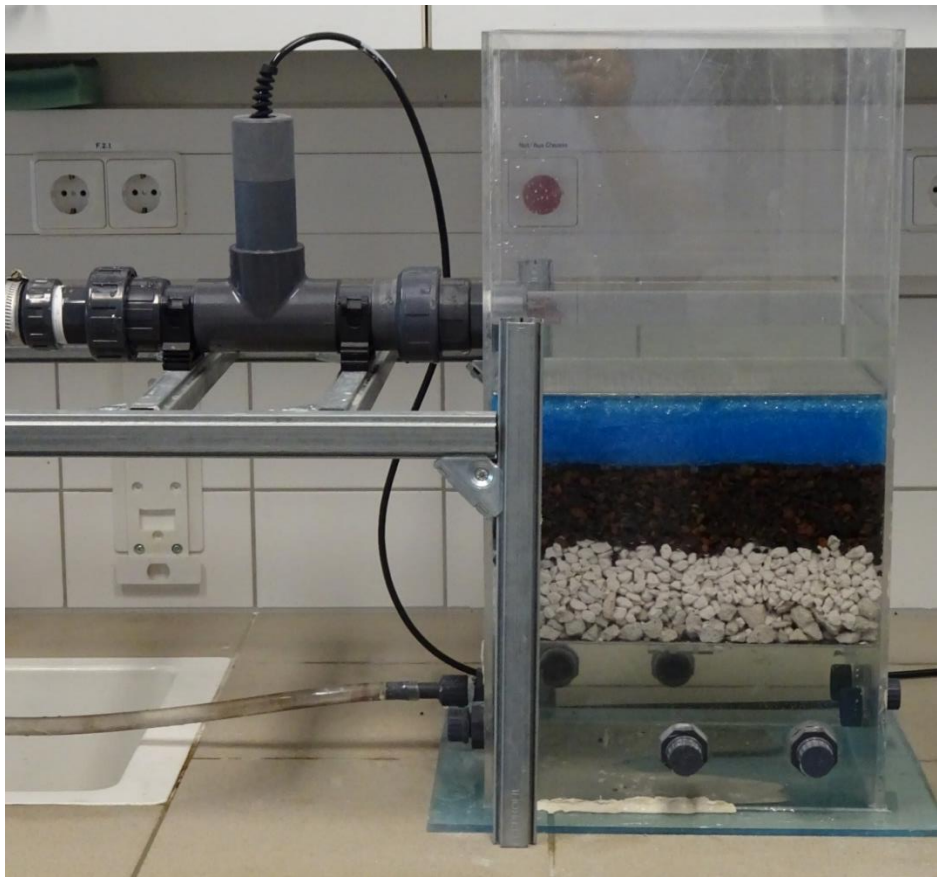


Bild 47: Modellfilter im Labor für Urbanhydrologie und Wasserversorgung

6.3 Untersuchungen im Labormaßstab mit dem Gesteinsmehl Millisil

Ein maßgebliches Kriterium der Filterwirksamkeit ist der Rückhalt der Feinstfraktion der partikulären Stoffe (AFS₆₃). Das Deutsche Institut für Bautechnik (DIBt) verwendet zu Zulassungszwecken Millisil W4 der Quarzwerke GmbH (Stoffdaten in Tabelle 13). Dieses Quarzmehl hat sich auch in anderen Forschungsversuchen bereits als Prüfmedium etabliert. Vor diesem Hintergrund erfolgten die bisherigen Untersuchungen zur Rückhaltewirkung des Filters mit Millisil W4.

Tabelle 13: Stoffdaten des Quarzmehles Millisil W4

Obere Korngröße d _{95%} in µm	190
Mittlere Korngröße d _{50%} in µm	65
Schüttdichte in g/cm ³	1,3
Dichte in g/cm ³	2,65
pH-Wert	7
Hauptbestandteil	SiO ₂ (mit 99 Gew.-%)

Die Filterbeschickung erfolgte mit Leitungswasser, in das Millisil zudosiert wurde. Zur Bestimmung der AFS-Konzentration wurde im Ablauf eine Trübungssonde der Firma Jumo (ecoLine NTU) eingesetzt. Das Messprinzip basiert auf einer Infrarotlichtmessung nach dem 90°-Streulichtprinzip bei einer Wellenlänge von 880 nm. Die Geräte decken einen Messbereich von 0 bis 4 000 FNU ab. Um mit der Trübungsmessung die Millisilkonzentration bestimmen zu können, wurde eine Kalibrierkurve erstellt (Bild 48). Hierzu wurden 31 Proben mit einer Millisilkonzentration von 0 bis 3 000 mg/l in 100-mg-Schritten angesetzt und gemessen. Mit Hilfe einer linearen Funktion erfolgte eine Annäherung an die gemessene Kurve. Die lineare Funktion wurde in einem Datenlogger (Jumo Aquis touch p) hinterlegt, wodurch die gemessenen Trübungswerte direkt als Millisilkonzentration ausgegeben werden konnten. Zur Durchflussmessung wurden FHK-LCD Flow Sensors der Firma Digimesa eingesetzt. Diese Geräte decken einen Messbereich von 3 bis 30 l/min ab.

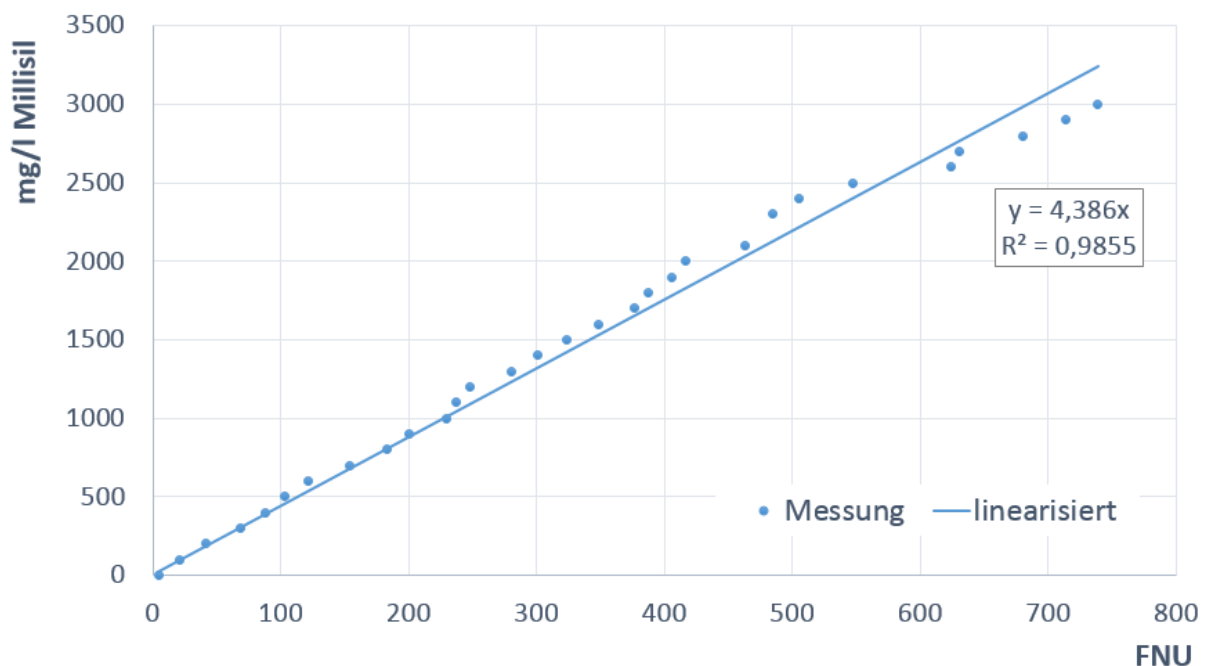


Bild 48: Kalibrierkurve der Trübungssonde (Jumo ecoLine NTU) zur AFS-Messung in der Laboranlage

Zur isolierten Bewertung der Wirkung des Filtermaterials wurde versucht, die Sedimentation unterhalb des eigentlichen Filters zu vermeiden. Hierzu wurden mehrere Zulaufleitungen mit geringem Durchmesser (12 mm) angebracht, um so eine möglichst turbulente Strömung unterhalb des Filtermaterials zu gewährleisten.

Um nur die reine Filterleistung ohne Sedimentation betrachten zu können, wurde in dem Vorlagebehälter für jeden Versuch die gleiche Konzentration an Millisil eingesetzt. Die Anlage wurde mit 0,146 l/s Leitungswasser und 0,005 l/s des Millisil-Wasser-Gemisches aus einem Vorlagebehälter über eine Schlauchpumpe beschickt. Aufgrund des Gegendrucks des Leitungswassers wurde die Fördermenge der Schlauchpumpe allerdings auf 0,0036 l/s reduziert. In dem Vorlagebehälter wurden 700 g Millisil mit 30 l Wasser vermischt und kontinuierlich gerührt. Daraus ergibt sich eine rechnerische Millisil-Konzentration von 555,4 mg/l im Zulauf des Filters. Zur Berücksichtigung der Sedimentationsvorgänge in der Anlage wurden mehrmals Versuche ohne Filtermaterial durchgeführt. Der Vergleich der Wirkung der untersuchten Filter erfolgte mit der gemittelten Ablaufkonzentration (Bild 49). Bei den Versuchen ohne Filtermaterial ergab sich eine mittlere Ablaufkonzentration von 441 mg/l. Bei

einer Zulaufkonzentration von 555,4 mg/l entspricht dies einer Reduktion der Millisilkonzentration von 114 mg/l bzw. 20 % nur durch Sedimentation, obwohl in der Laboranlage möglichst turbulente Zuflussbedingungen vorlagen.

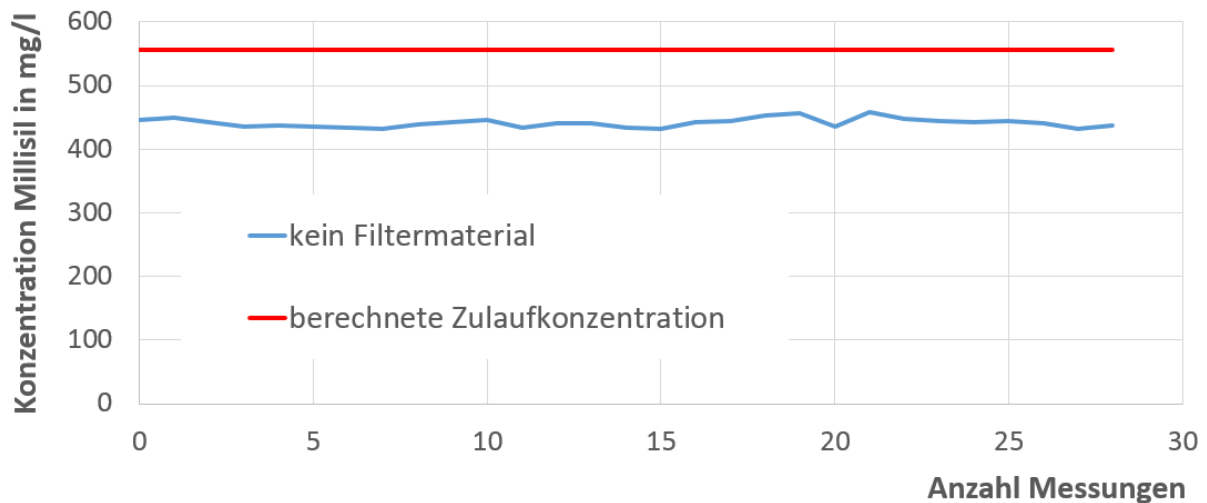


Bild 49: Ergebnis der Untersuchungen zum Rückhalt von Millisil in der Versuchsanlage ausschließlich durch Sedimentation

Die Versuche haben gezeigt, dass die Eignung von Millisil zur Beurteilung von Regenwasserbehandlungsanlagen nur eingeschränkt ist. Aufgrund der hohen Dichte, setzt sich Millisil rasch ab. Auch bei gezielt herbeigeführter Turbulenz im Zuleitungssystem zum Filter kommt es bereits zu nennenswerten Absetzprozessen. Insofern ist nachvollziehbar, dass reine Sedimentationsanlagen zur dezentralen Regenwasserbehandlung bei der Prüfung mit Millisil nennenswerte Rückhaltwirkungen aufweisen.

Vergleichende Untersuchungen zum Stoffrückhalt in einem Regenklärbecken und in einem Filterschacht (System FiltaPex) führten Grüning et al. (2010) durch. Der mittlere Feststoffrückhalt unter Praxisbedingungen für mehrere Regenereignisse lag für das Regenklärbecken bei 27 % und für den Filterschacht bei rund 70 %. Der Vergleich dieser Ergebnisse belegt, dass bei Untersuchungen mit Millisil die Rückhaltewirkung unrealistisch hoch ist. Hinzu kommt, dass der Anteil an AFS₆₃, der in Millisil bei fast 50 % liegt und zudem vom stark schwankenden AFS₆₃-Anteil in Straßenkehricht deutlich abweichen kann. Diesen Sachverhalt belegen u. a. Auswertungen von Dierschke und Welker (2015).

6.4 Untersuchungen zur Rückhaltewirkung des Filtermaterials

6.4.1 Untersuchungen zur Anpassung und Optimierung des Filtermaterials

Erfahrungen mit der Eignung des Filtermaterials sind durch die inzwischen mehrjährigen Betriebszeiträume mit dezentralen Anlagen der Pecher Technik GmbH verfügbar. Allerdings unterscheiden sich Anwendungen in zentralen technischen Filtern teilweise von dezentralen Einsatzbedingungen. Unterschiede liegen u. a. im erhöhtem Risiko von Fehleinleitungen, die in begrenzten Einzugsgebieten dezentraler Anlagen tendenziell geringer sind, da hier häufig reine Straßen- oder Parkflächen angeschlossen sind. Außerdem wird der manuelle Einbau des Filtermaterials bei kleinen Anlagen eher akzeptiert. Das Filtermaterial muss zahlreiche Anforderungen erfüllen. In der Laboranlage wurde untersucht, ob unterschiedliche Werkstoffe und Aufbaukombinationen folgende Anforderungen genügen:

- ▶ Keine Auswaschung wassergefährdender Stoffe (Eluat) aus dem Material selbst
- ▶ Beeinflussung des pH-Wertes des vergleichsweise sauren Regenwassers zum Rückhalt gelöster Schwermetalle
- ▶ Hohe Adsorptionswirkung zum Rückhalt der Feinfraktion (AFS₆₃)
- ▶ Möglichst einfacher Einbau und Wechsel des Filtermaterials

Dazu wurde folgende Werkstoffe und Gewebe in unterschiedlichen Kombinationen, mit unterschiedlichen Schichtdicken, als ein- und mehrlagiger Aufbau untersucht:

- ▶ **Verschiedene Porenbetone:** Mehrlagiger Aufbau mit gestuften Korngrößen
- ▶ **Gebrochener Blähton:** Korngröße von 4 bis 10 mm
- ▶ **Blähschiefer:** Korngröße von 4 bis 8 mm
- ▶ **Filtermatten aus Kunststoff:** Matten mit 10 PPI (Pores per Inch) bis 30 PPI
- ▶ **Filtervlies:** Oberste Lage

Einige Materialien mussten trotz guter Rückhalteergebnisse aufgrund ihrer Eigenschaften ausgeschlossen werden. Hierzu zählen:

- ▶ zu geringe Dichte und dadurch Aufschwimmen des Filtermaterials
- ▶ geschlossene bzw. nicht durchflossene Poren und dadurch eine Verringerung der Adsorptionsfläche des Filtermaterials

Auch wenn die Eignung des Quarzmehls Millisil zur Beurteilung der Rückhaltewirkung von Regenwasserbehandlungssystemen eingeschränkt ist, wurde dieses Material für die weiteren Untersuchungen verwendet. Vorteil des Materials sind die gleichen Bedingungen durch identische Materialeigenschaften. Untersuchungen alternativer Prüfmedien müssten in weiteren Forschungsprojekten erfolgen.

In Bild 50 ist ein Vergleich des Millisil-Rückhaltes verschiedener getesteter Filtermaterialien dargestellt. Referenzwert für die Rückhaltewirkung ist die Millisilkonzentration im Ablauf, die durch reine Sedimentationswirkung, ohne Filter erreicht wurde. Die Zulaufkonzentration von 555,4 mg/l wurde auf der Basis des Zuflusses und der Millisilzugabe berechnet. Der Referenzwert „Ablaufkonzentration ohne Filter“ lag im Mittel bei 440 mg/l. Um Absetzeffekte zu minimieren, wurde der feststoffbelastete Zulauf an mehreren Stellen eingeleitet, um eine hohe Turbulenz im Zulaufbereich der Versuchsanlage zu gewährleisten. Hiermit sollte bezweckt werden, dass ausschließlich die Wirkung der einzelnen Filtermaterialien auf den Rückhalt von Millisil bewertet werden kann. Ein Rückschluss auf den Gesamtwirkungsgrad der Filteranlage „In der Fleute“ ist hiermit jedoch nicht möglich, da hier eine Sedimentation unterhalb des Filtermaterials von AFS baulich bedingt und gewünscht ist.

Zur Optimierung des Filters wurden sowohl das Filtermaterial und die Anordnung der Filterschichten in einer Laboranlage vorab untersucht. Dazu wurde der Filter mit einer rechnerischen Feststoff-Zulaufkonzentration von 555 mg/l beaufschlagt.

Da bei der letztendlichen Auswahl des Filtermaterials für die Großfilteranlage aber neben dem reinen Feststoffrückhalt zusätzlich noch weitere Merkmale, wie der Betriebsaufwand beim Einbau und Wechsel des Filtermaterials und der Rückhalt von gelösten Schwermetallen relevant war, wurde nicht das Material mit der ermittelten besten Rückhalteleistung ausgewählt, sondern eine Materialkombination, die den Gesamtanforderungen weitgehend entsprach.

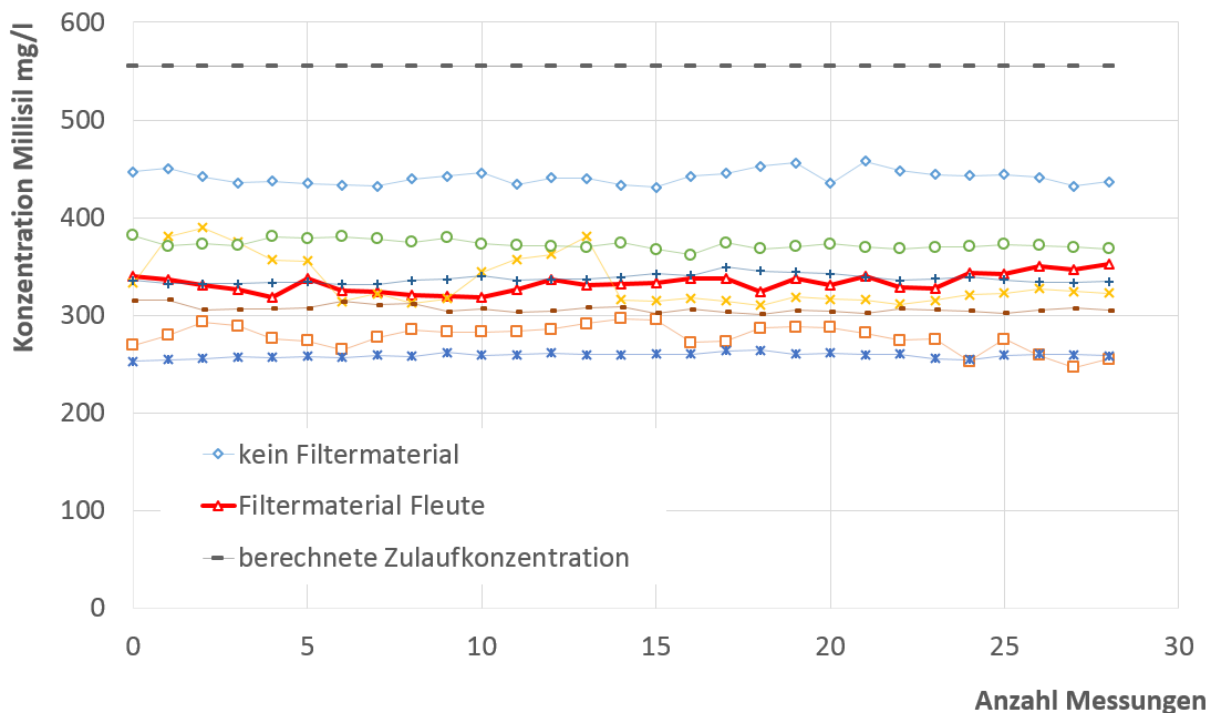


Bild 50: Vergleichende Gegenüberstellung der Feststoff-Ablaufkonzentration bei verschiedenen Filtern im Vergleich zur Konzentration ohne Filter

6.4.2 Maßnahmen zur Optimierung des Filteraufbaus

Um den Betriebsaufwand zu reduzieren, sollten alle Filterschichten als lose Schüttung aufgebracht werden. Dadurch ist gewährleistet, dass beim Materialaustausch das erschöpfte Filtermaterial vom Saugfahrzeug aufgenommen werden kann. Mit den körnigen Schüttungen der unteren Lagen ist dies problemlos möglich. Bislang wurden die Füllkörper manuell ausgelegt und nach Ende der Filterstandzeit auch manuell aufgenommen. Für die Aufnahme mit dem Saugfahrzeug wurden folgende Modifikationen im Labor untersucht:

- ▶ Füllung des Adsorptionsmaterials in kugelförmige Füllkörper mit einem Durchmesser von max. 5 cm
- ▶ Vermeidung des Durchrieselns des feinen Materials durch Aufbringen einer textilen Faser
- ▶ Gestufter Aufbau der Filtersubstrate mit Filtermatte als oberste Schicht

Auf dem unteren Gitterrost wurde zur Vermeidung des Durchrieselns ein feineres Gittergewebe aufgebracht. Wichtig ist die Vermeidung von Umläufigkeiten, speziell im Randbereich. Hierzu wurden während der Betriebsphase I Laborversuche mit einer abschließenden Vlieslage mit einer Fixierung im Randbereich durchgeführt. Die Untersuchung mit kugelförmigen Füllkörpern führte zu dem Ergebnis, dass Randumläufigkeiten damit nicht vollständig zu vermeiden sind. Schließlich wurde der gestufte Filteraufbau mit abschließender Filtermatte gewählt, da dies die besten Ergebnisse unter Berücksichtigung der beiden Ziele „Stoffrückhalt“ und „Reduzierung des Betriebsaufwandes“ geliefert hat. Dieser Aufbau wurde für Betriebsphase II eingebaut (5.3 Bedingungen und Ergebnisse während der Betriebsphase II).

6.5 Untersuchung der Rückhaltekapazität des Filteraufbaus

Ein maßgebliches Kriterium zur Bewertung des Filters ist die Aufnahmekapazität an feinstpartikulären Feststoffen. Dazu wurde der Filteraufbau (Betriebsphase II) über einen mehrstündigen Zeitraum mit einem Millisil-Wasser-Gemisch mit Q_{krit} beaufschlagt. Die Messungen mit Filter führten in der Anfangsphase zu einem Rückhalt an Feinstpartikeln von über 31 %. Bei kontinuierlicher Beaufschlagung nahm die Ablaufkonzentration sukzessive zu, bis nach 10 Stunden kaum noch eine Rückhaltewirkung messbar war. Allerdings kolmatierte der Filter durch die Beaufschlagung mit Feinstpartikeln nicht. Dementsprechend hat sich im Verlauf des Versuchs auch keine messbare Abnahme des k_f -Wertes, der bei $9,7 \cdot 10^{-2}$ m/s lag, eingestellt. Bei Millisil W4 umfasst das Spektrum der Partikelgröße bis 400 μm , mit einem d_{95} von 190 μm und einem d_{50} von 63 μm . Die Schüttdichte von Millisil beträgt 1,3 g/cm³. Insgesamt wurde ein Volumen von 1,3 l im Filter aufgenommen. Mit einer Gesamtporosität der Filterschüttung von 65,36 % beträgt der gesamte Retentionsraum der Laboranlage 10 l. Dieser Retentionsraum wurde lediglich zu 13 % ausgeschöpft.

Diese Beobachtung stimmt mit der Wirkung einer klassischen Tiefenfiltration überein. Bei der Tiefenfiltration erfolgt der Rückhalt überwiegend mechanisch und adsorptiv im Inneren eines Filtermediums. Hierbei wird ein beträchtlicher Anteil von Feststoffpartikeln zurückgehalten, der aufgrund seiner geometrischen Größenverhältnisse eigentlich durch das Filtermedium hindurch gelangen könnte (Gasper, 2004). Die Korngrößen des Filtermaterials der Laboranlage lagen zwischen 2 bis 20 mm. Daraus resultieren Porenräume zwischen dem Filterkorn, die wesentlich größer sind als die Partikelgrößen des Millisils, welche in einem Bereich von unter 2 bis 400 μm liegen. Unter Berücksichtigung der Rückhaltemechanismen bei der Tiefenfiltration, ist davon auszugehen, dass der Rückhalt von Millisil nur geringfügig mechanisch, sondern überwiegend adsorptiv erfolgte und nach der Beladung der Substratoberflächen kein Rückhalt mehr stattfindet. Ein Indiz hierfür ist die unveränderte Durchlässigkeit des Filters bei nachlassendem Stoffrückhalt.

Diese Ergebnisse mit synthetischer Beladung durch Millisil sind nicht auf Filterbelastungen mit realen Oberflächenabflüssen übertragbar. Hier liegt ein breites Spektrum an anorganischen und organischen Stoffen vor. Bei bisherigen Untersuchungen der Durchlässigkeit von Filtern in dezentralen Anlagen sind Änderungen des k_f -Wertes vom Systemzustand der Inbetriebnahme bis zum erforderlichen Filterwechsel in Größenordnungen von einer Zehnerpotenz und weiter bis zur vollständigen Kolmation ermittelt worden.

Wie die Untersuchungen zeigen, ist Millisil nur eingeschränkt geeignet, um den Rückhalt von Regenwasserbehandlungsanlagen zu testen. Wie groß der Rückhalt feinstpartikulärer Substanzen bei Betrieb mit Regenwasser tatsächlich ist, ist noch zu prüfen. Ebenso sollte in weiteren Untersuchungen geprüft werden, welche Mechanismen dazu führen, dass die Kapazität bei Betrieb mit Regenwasser so viel größer ist. Möglicherweise bewirken die Agglomerationsneigung von Partikeln oder auch die Ansiedlung von Mikroorganismen diese Effekte. Vor diesem Hintergrund ist eine zuverlässige Aussage der Standzeit des Filteraufbaus schwer zu treffen. Die Standzeit wird maßgeblich von Umfang und Art der stofflichen Belastung der Oberflächen beeinflusst.

6.6 Untersuchung zum Rückhalt gelöster Schwermetalle

Ein maßgeblicher Anteil der Schadstoffe im Oberflächenabfluss ist an feinstpartikuläre Stoffe adsorbiert. In Abhängigkeit von der Wasserzusammensetzung und der Art und Nutzung der Flächen im Einzugsgebiet, können Schwermetalle jedoch auch zu großen Teilen gelöst im Abfluss vorliegen (vgl. Kapitel 5.3.3, Tabelle 11). Um auch gelöste Schwermetallanteile aus dem Oberflächenabfluss entfernen zu können, sind chemisch-physikalisch wirksame Filtermaterialien notwendig. Zur weiteren Optimierung des Filteraufbaus wurden fünf verschiedene Substrate hinsichtlich ihrer Adsorptionsfähigkeit in einer

Laboranlage untersucht. Hierzu wurde ein neuer Versuchsstand entwickelt, mit welchem zwei verschiedene Filtermaterialien parallel in zwei Filtersäulen untersucht werden können. Der Testaufbau wurde angelehnt an die Prüfungen aus dem DIBt-Test für „Anlagen zur dezentralen Behandlung des Abwassers von Kfz-Verkehrsflächen zur anschließenden Versickerung in Boden und Grundwasser“. Für eine erste Abschätzung der Leistungsfähigkeit der Filtersubstrate wurde der Versuch mit einem Durchfluss entsprechend einer Regenspende von $6 \text{ l/s} \cdot \text{ha}$ durchgeführt. Die Berechnung erfolgte basierend auf einem Modellfilter, an welchen nur behandlungspflichtige Flächen angeschlossen sind ($0,37 \text{ ha}$ Anschlussfläche pro m^2 Filterfläche). Nicht behandlungspflichtige Flächen der Kategorien I und IIa, welche mit einem behandlungspflichtigen Zufluss von nur $5 \text{ l/s} \cdot \text{ha}$ in die Dimensionierung eingehen führen zu einer dauerhaften höheren hydraulischen Belastung von Regenwasserbehandlungsanlagen, da diese voll Abflusswirksam sind. Der Behandlungspflichtige Abfluss wird durch die hohen Kategorie I und IIa Flächenanteile sehr viel schneller erreicht und führt im Einzugsgebiet des TRF Fleute dazu, das bereits bei einer Überregnung des gesamten Einzugsgebietes mit $7,34 \text{ l/s} \cdot \text{ha}$ das entsprechende Q_{krit} erreicht wird. In Bild 51 ist der Versuchsaufbau zur Untersuchung des Schwermetallrückhalts dargestellt.

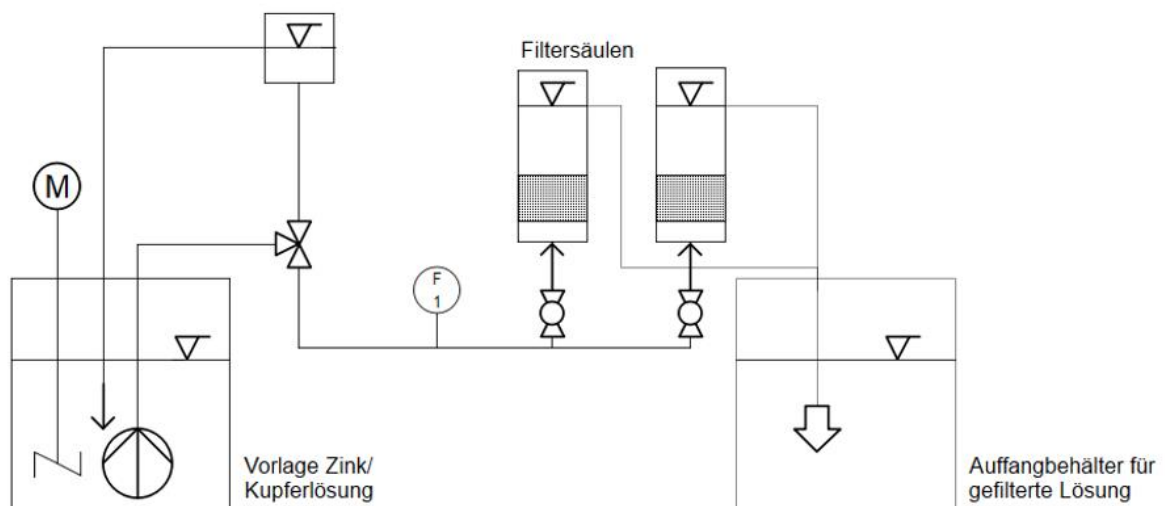


Bild 51: Schema des Säulen-Versuchsaufbaus zur Untersuchung des Schwermetallrückhalts

Für den Versuch wurde eine Lösung mit $2,04 \text{ mg/l}$ Zink und $0,51 \text{ mg/l}$ Kupfer hergestellt. Die Lösung wurde mittels Essigsäure auf einen pH-Wert von $5,03$ eingestellt. Folgende Filtersubstrate wurden untersucht:

- ▶ GEH (Körnung 2 bis 4 mm)
- ▶ Calcium-Silikat (Körnung 10 bis 20 mm)
- ▶ Blähton (Körnung 2 bis 10 mm)
- ▶ Zeolith 1 (Körnung 8 bis 10 mm) und Zeolith 2 (Körnung 8 bis 16 mm)

Die Schütthöhe in den Filtersäulen betrug jeweils 10 cm. Anschließend wurden die Säulen jeweils 20 min mit einem Volumenstrom von $1,13 \text{ l/min}$ beschickt. Mit der gewählten Regenspende von $6 \text{ l/s} \cdot \text{ha}$ ist ein Großteil der üblichen Regenspenden abgedeckt (mittlere Regenspende beträgt 3 bis $5 \text{ l/s} \cdot \text{ha}$ (DWA-M153, 2012)). Die Probennahme erfolgte nach Austausch des 1,5-fachen Säulenvo-

lumen mit insgesamt drei Einzelproben über die verbleibende Versuchszeit. Die Ergebnisse dieser Messreihe zeigt Bild 23.

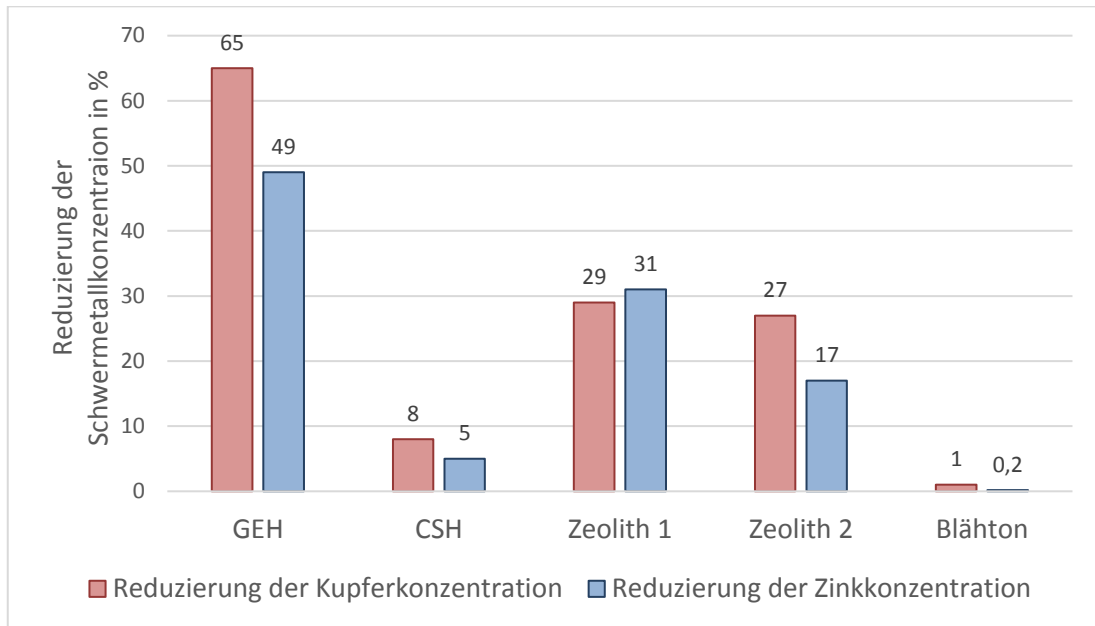


Bild 52: Reduzierung der Schwermetallkonzentration unterschiedlicher Filtersubstrate bei einer Regenspende von 6 l/s · ha

Bereits mit 10 cm Schütthöhe konnten für GEH und die beiden getesteten Zeolithe gute Schwermetalladsorptionen gemessen werden. Blähton ist für die Adsorption von Schwermetallen ungeeignet. Zu berücksichtigen ist allerdings auch, dass aufgrund der unterschiedlichen Körnung der einzelnen Substrate auch unterschiedliche Kontaktmöglichkeiten des durchfließenden Wassers mit den Filteroberflächen resultieren. Zur weiteren Optimierung des Filteraufbaus sollte im nächsten Schritt das Verhalten der Substrate bei Zuflüssen bis zu Q_{krit} untersucht werden. Außerdem ist bei künftigen Untersuchungen zu quantifizieren, welcher maximale Rückhalt möglich ist und welche Rückhaltekapazitäten bei Aufbau des Filters mit unterschiedlichen Substraten vorliegen.

7 Betriebliche Aspekte und Systemoptimierungen

7.1 Betriebserfahrungen

Im Verlauf der Untersuchungen haben sich zahlreiche konstruktive Optimierungsmöglichkeiten herausgestellt. Der Bau eines Filterbauwerks erfolgte im Rahmen der Ausschreibung als Sondervorschlag. Ein Filterbauwerk zur Regenwasserbehandlung in dieser Größenordnung wurde erstmalig geplant und betrieben, so dass auf keine Erfahrungswerte zurückgegriffen werden konnte. Bei einer Planung künftiger technischer Filteranlagen sollten unterschiedliche Kriterien berücksichtigt werden, die während der Betriebsbegleitung über eine Dauer von fast drei Jahren festgestellt wurden.

- ▶ Optimierung des Filters (Filtermaterial und Filteraufbau): Schichtdicken, Trennung der unterschiedlichen Filterschichten, Vermeidung von Umläufigkeiten, Vereinfachung des Filtereinkaufs und des Filterwechsels, Entsorgungsmöglichkeiten etc.
- ▶ Konstruktive Optimierung des Bauwerkes: Zugangsmöglichkeiten, Gestaltung des Arbeitsraums, Konstruktion der Auftriebssicherung, Gefälle des Schlammammelraumes etc.

Eine maßgebliche Voraussetzung für die dauerhafte Wirkung von Regenwasserbehandlungssystemen ist die Begrenzung des betrieblichen Aufwandes. Hier stehen neue Behandlungssysteme im Vergleich mit bestehenden Systemen. Die chemisch-physikalisch wirksame Filteranlage wird dabei mit klassischen Regenklärbecken (in erster Linie ohne Dauerstaubetrieb) und Retentionsbodenfilteranlagen verglichen.

Neben dem ständigen Kontakt zum Kanalbetrieb während der Einbauphase und den jeweiligen Kontrollmaßnahmen, erfolgte am 25. August 2015 eine Abstimmung mit der Kolonne des Kanalbetriebs, die für den Ein- und Ausbau des Filtermaterials sowie für den laufenden Betrieb zuständig ist. Dabei wurden vor allem folgende Optimierungsvorschläge diskutiert:

- ▶ Größere Öffnungen über dem Filter, um mit Kranfahrzeugen einen möglichst großen Bereich der Filterfläche zu erreichen
- ▶ Maßnahmen zur Verminderung der Staubemissionen beim Einbau des Filtermaterials
- ▶ Optimierungen der Arbeitsabläufe beim Ausbau des erschöpften Filtermaterials
- ▶ Fragen der Entsorgung

In der Abstimmung wurde herausgestellt, dass der Betriebsaufwand des Filters, bei einer Standzeit von einem Jahr, mit dem Aufwand für ein klassisches Regenklärbecken vergleichbar ist. Im Vergleich zu den betrieblichen Aufwendungen mit einem Retentionsbodenfilter sind die Betriebsaufgaben deutlich geringer. Es wurde beschlossen, bei der folgenden Ausrüstung auf die klassischen Vlies-Packs zu verzichten, sodass künftig das gesamte Filtersubstrat mit dem Saugfahrzeug entfernt werden kann. Hierdurch wird bereits eine Reduzierung des Betriebsaufwandes erreicht.

7.2 Konstruktive Systemoptimierung des Filterbauwerks

7.2.1 Gestaltung des Einlaufbereiches und Zuflussdrosselung

Aufgrund der Größe des Einzugsgebiets und dem teilweise steilen Kanalgefälle sammelt sich das zufließende Wasser nach Regenbeginn rasch im Zulauf des Filters und trifft dort auf einen ruhenden Wasserkörper. Dies führt bei fehlendem Retentionsvolumen (auch u. a. aufgrund des Fremdwasserzuflusses) zu einem raschen Anstieg des Füllstands im Zulauf des Filterbeckens und ggf. zu einer frühen Entlastung. Unmittelbar nach Inbetriebnahme einer neuen Filterschüttung ist der k_f -Wert vergleichsweise gering und damit die Durchlässigkeit hoch. Über einen mehrwöchigen Zeitraum passieren

aufgrund der anfangs geringen hydraulischen Widerstände höhere Volumenströme den Filter als der behandlungspflichtige Abfluss. Dieser muss schließlich auch zum Ende der Betriebsdauer noch behandelt werden. Die anfangs höhere Durchlässigkeit des Filters ist prinzipiell ein Vorteil, da so ein höherer Volumenstrom behandelt werden kann. Jedoch ist davon auszugehen, dass gerade in der Einfahrphase der Filter durch stärkere Regenereignisse mit einem höheren Anteil an Grobstoff beaufschlagt wird. Der größere Volumenstrom ist auch mit einer höheren Fließgeschwindigkeit und damit einer verschlechterten Sedimentationsleistung vor bzw. unter dem Filter verbunden. So wird der Filter möglicherweise mit Grobstoffen beladen, die auch durch Sedimentation abgetrennt werden könnten. Hierdurch reduziert sich die Reinigungsleistung bezogen auf das behandelte Volumen und auch die Standzeit des Filters. Eine Verlängerung der Standzeit wäre durch eine Zulaufdrosselung möglich.

7.2.2 Schlammammelraum und Filterstraßen

Bei einer vorgesehenen Filterstandzeit von bis zu einem Jahr kommt es zu einem erheblichen Schlamm- und Grobstoffanfall. Entweder sind hierfür kürzere Reinigungsintervalle erforderlich oder der Schlammammelraum ist entsprechend groß zu bemessen. Weiterhin sind nachfolgend beschriebene konstruktive Optimierungen vorzusehen.

Schlammammelraum: Die Größe des Schlammammelraumes, die Ausbildung der Tauchwand und die Möglichkeit zusätzlicher Feststoffrückhaltungsmaßnahmen (z. B. durch Lamellen) ist zu prüfen, um einen möglichst hohem Feststoffanteil mechanisch zurückzuhalten. Im Filter selbst sollten in erster Linie Feinstpartikel und gelöste Stoffe zurückgehalten werden.

Sohlgefälle Filterstraßen: Mit dem vorhandenen Sohlgefälle lagern sich die Sedimente nicht im Schlammfang zum Ende der jeweiligen Filterstraße ab (Bild 53). Ein selbstständiger Transport des Schlamms in den Schlammfang wird ohne Spülvorrichtung auch nicht möglich sein. Das vorhandene Gefälle sollte zumindest eine einfachere Reinigung ermöglichen. Das Planungskonzept sollte die Spülung des Sediments zum Schlammfang vorsehen, wo es dann ausgesaugt werden kann (zumindest für die letzte „Feinreinigung“).

Das Sediment verfestigt sich, so dass der Aufwand bei der Entleerung und Reinigung hoch ist. Für eine leichtere Reinigung der Filterstraßen sollte das Sohlgefälle erhöht und diese ggf. mit einer Spüleinrichtung versehen werden. Inwieweit das vorhandene Rohr von der Oberfläche bis in den Schlammfang noch erforderlich ist, wenn die Sedimentation im Zulauf optimiert wurde, ist zu prüfen. Ggf. kann das Volumen der Filterstraßen so dimensioniert werden, dass diese nur im Rahmen der turnusmäßigen Wartung (Filtertausch) gereinigt werden müssten. Dann könnte auf das Reinigungsrohr verzichtet werden. Das hätte zudem den Vorteil, dass die Filterschicht nicht unterbrochen wird.



Bild 53: Schlammablagerungen Filterstraße (Foto vom am 07.07.2015)

7.2.3 Ableitung des Entlastungsabflusses

Beim Wechsel des Filtersubstrats hat sich herausgestellt, dass der Gitterraum des obersten Gitterrostes mit verfestigtem Sediment gefüllt war. Kommt es in Folge von Starkregenereignissen zu einer Überschreitung der Leistungsfähigkeit des Filters, so wird der nicht behandelbare Anteil des Niederschlagswassers über die Filteroberfläche abgeleitet. Das entlastete Wasser enthält Feinstoffe und Grobstoffanteile. Es besteht die Vermutung, dass diese über der Filterfläche sedimentieren und die Zwischenräume des Gitterrostes zum Auftritt und zur Auftriebssicherung „verstopfen“ (Bild 54). Dies führt letztlich zu einer Reduzierung der hydraulischen Leistungsfähigkeit, da die Fließgeschwindigkeit hinter dem Filter nicht mehr ausreicht, um das Sediment aus dem Gitter wieder zu entfernen. Hierdurch reduziert sich die Standzeit des Filters. Um diesen Einfluss zu reduzieren, könnten die Stege der Gitterroste so flach wie möglich gestaltet werden.



Bild 54: Sediment oberhalb des Filters nach Regenereignis (Foto vom 08.09.2014)

Weiterhin wird im Falle eines Abschlags der Wasserstand über der Filterfläche erhöht. Dies zieht eine Anhebung des Filterwiderstands und damit die Reduzierung der hydraulischen Leistungsfähigkeit nach sich. Zur Vermeidung der Sedimentation auf der Filterfläche sollte der Abschlag bei Starkregenereignissen ggf. über einen Bypass am Filter vorbei geleitet werden.

7.2.4 Bauwerksgestaltung und Filteraufbau

Technischen Filter zur Regenwasserbehandlung in zentraler Größenordnung (TRF) sind neu. Somit konnte bei der Bauwerkskonzeption nicht auf vergleichbare Erfahrungen zurückgegriffen werden. Technische Regelwerke gibt es bislang nicht. Mehrjährige Betriebserfahrungen mit der Filtration von Regenwasser sind lediglich für kompakte Anlagen im dezentralen Maßstab vorhanden. Im Fokus des ersten Untersuchungsschrittes steht:

- a) eine möglichst arbeitsfreundliche Bauwerksgestaltung, zur Entlastung der personalintensiven und körperlich anspruchsvollen Tätigkeit bei der Reinigung des Bauwerkes,
- b) ein Filteraufbau, der eine mehrmonatige Betriebsphase ermöglicht.

Arbeitsraum und Zugänglichkeit: Die aktuell realisierte Arbeitsraumhöhe über dem Filter reicht bei den meisten Mitarbeitern nicht aus, um mit aufgesetztem Helm auf den trocken verlaufenden Betonschwellen aufrecht stehen zu können. Weiterhin sind Öffnungen in ausreichender Größe vorzusehen, damit sämtliche Bereiche mit dem Saugschlauch erreicht werden können und der Einbau des Filtermaterials erleichtert wird.

Lichtverhältnisse: In den Sommermonaten wurde zeitweise eine Algenbildung auf dem Gitterrost festgestellt (Bild 55). Algenbildungen sind grundsätzlich nicht negativ, da dadurch auch eine biologische Reinigung erreicht wird. Die beobachtete Algenbildung lag zudem in der Phase der kontinuierlichen Schmutzwasser-Fehleinleitungen. Da aber nicht ausgeschlossen werden kann, dass durch Algenbildung die Durchlässigkeit des Filters abnimmt, sollten Filteranlagen so gestaltet werden, dass der Einfall von Tageslicht vermieden wird. Dies ginge dann allerdings wieder zu Lasten der Zugänglichkeit und der Betriebsfreundlichkeit. Für zukünftige Anlagen ist daher ein entsprechender Kompromiss zu finden. Gerade die Akzeptanz des Betriebspersonals ist entscheidend für die Wirksamkeit einer Anlage.

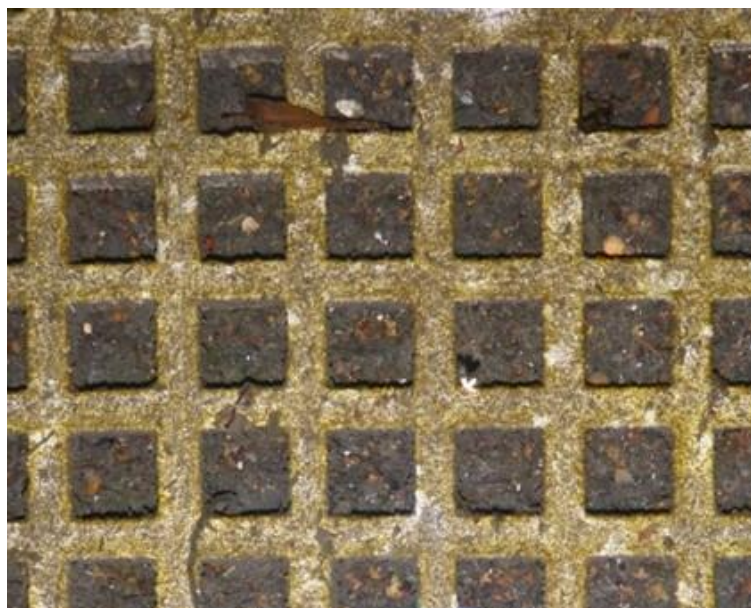


Bild 55: Algenbildung auf dem Gitterrost der mittleren Filterstraße (Foto vom 31.07.2014)

Der Filteraufbau selbst ist grundlegender Bestandteil der Untersuchungen. Hier werden lediglich konstruktive Maßnahmen zur Systemoptimierung beschrieben.

Gitterroste: Wie in Kapitel 7.2.3 bereits beschrieben, sind die Stege der Gitterroste verhältnismäßig breit. Dadurch vermindert sich die Öffnung und dadurch kommt es zu einer Reduktion der Durchlässigkeit.

Auftriebssicherung: Aufgrund der Ausbildung als lose Schüttung setzt sich das Material durch den an- und absteigenden Wasserdruck. Hier muss nach dem Einbau eine regelmäßige Kontrolle erfolgen. Die Schrauben sind ggf. nachzuziehen. Weiterhin ist zu untersuchen, wie Bewegungen des Filterbettes reduziert werden können. Gleichzeitig ist darauf zu achten, dass die Schrauben nicht zu fest angezogen werden, um die Filtermatte nicht zu stark zu komprimieren und so die Durchlässigkeit des Filters herabzusetzen.

Schlammabzugsrohre: Am Ende jeder Filterstraße befinden sich Rohre zur Messung des Schlammspiegels und zum Schlammabzug aus dem Schlammammelraum. Wie sich im Betrieb gezeigt hat, haben sie jedoch kaum Vorteile für den Betrieb. Der Schlamm verdichtet sich so stark, dass ein Abzug über die Schlammabzugsrohre nicht möglich ist. Diese durchstoßen jedoch die Filterschicht und verkomplizieren den Ein- und Ausbau der Filterstraßen. Zusätzlich erhöhen sie das Risiko von Umläufigkeiten und Ausspülungen. Ein Abtrennen der Rohre oberhalb der Auftriebssicherung ist dringend ratsam.

Probenahme: Planung einer großvolumigen Probenahme umso validere Ergebnisse zur Bilanzierung der Filterwirksamkeit zu erzielen. Durch die zeitversetzte Verschmutzungsspitze zwischen Zu- und Ablauf entstehen teils kontroverse Messergebnisse.

7.3 Betriebsaufwand und Betriebskosten

Die Betriebskosten einer Regenwasserbehandlungsanlage korrelieren in gewissem Umfang mit dem Stoffrückhalt und der Verunreinigung der Oberflächen. Eine Anlage die wirkt und Stoffe zurückhält, muss regelmäßig gewartet werden. Dabei muss der zurückgehaltene Schlamm entfernt und in bestimmten Abständen das Filtermaterial getauscht werden. Zentrale Frage ist dabei, welche Häufigkeiten und Dauer der Wartungseinsätze erforderlich sind. Erfahrungsgemäß werden in der Praxis Wartungszeiträume von einem Jahr akzeptiert. Bei der Systementwicklung werden Filterstandzeiten in diesen Größenordnungen angestrebt. Die Untersuchungen des TRF Fleute haben gezeigt, dass abhängig von der Verunreinigung des Zuflusses auch kürzere Filterstandzeiten möglich sind. Die stoffliche Belastung ist saisonal unterschiedlich. Beispielsweise ist bei hohem Streuguteinsatz die Feststoffbelastung im Winter höher. Unzulässige Fehleinleitungen belasten den Filter. Vorteilhaft ist, dass Fehleinleitungen durch Filtration des Regenwasserabflusses erkannt werden.

Folgende Wartungsmaßnahmen sind für den TRF Fleute typisch:

- ▶ Systemüberwachung: In erster Linie durch Kontrolle und Vergleich der Füllstände im Zu- und Ablaufbereich. Die Messdaten sind durch Fernwirktechnik von der Leitwarte aus zu überwachen. Möglich ist zudem eine Systemüberwachung durch eine Kamera. Eine kontinuierliche Feststoffmessung mit entsprechenden Sonden ist für den dauerhaften Betrieb nicht erforderlich.
- ▶ Systemkontrolle vor Ort: Abhängig von der bestehenden Messtechnik mit regelmäßiger Auswertung der fernübertragenen Daten sind Überprüfungen vor Ort erforderlich. Die Häufigkeit ist hierbei mit der Wartung eines RKB vergleichbar.

- ▶ Entfernung des zurückgehaltenen Schlammes: Entleerung des Schlammammelraumes mit Hilfe eines Saugfahrzeugs und ggf. zusätzliche manuelle Räumung. Der Aufwand ist hierbei ebenfalls mit der Wartung eines RKB vergleichbar.
- ▶ Austausch des Filtermaterials: Die Kosten für das Filtermaterial hängen vom individuellen Aufbau des Filters ab. Durch Verwendung des Filtermaterials als lose Schüttung konnten die Kosten und der zeitliche Aufwand für den Einbau bereits reduziert werden.

Ein weiterer Aspekt für die Materialkosten ist der Einsatzzweck. Soll nur die AFS-Konzentration durch das Filtermaterial gesenkt werden, kann auch ein vergleichsweise kostengünstiges Substrat zum Einsatz kommen. Soll jedoch auch ein Großteil der gelösten Schwermetalle zurückgehalten werden, erhöht dies den Kostenaufwand.

Für den letzten Filteraufbau in der Fleute betrugen die Materialkosten etwa 200 €/m² Filterfläche inklusive Lieferung zum Einbauort.

Der Filtertausch inklusive der Entleerung des Schlammammelraumes erfordert etwa einen Arbeitstag. Für die Maßnahme sind mindestens 3 Personen erforderlich. Zusätzlich wird ein Saugfahrzeug über einen Zeitraum von ca. 4 Stunden benötigt. Die Maßnahmen sollten auf zwei Einsätze aufgeteilt werden. Für den Ausbau der Filtermatten sollte außerdem ein Fahrzeug mit Hebevorrichtung bereitgestellt werden. Dieses wird etwa eine Stunde benötigt.

Der aufgenommene Schlamm könnte auf der Kläranlage entsorgt werden. Die Entsorgung des Filtermaterials kann ähnlich wie der Rechengutanfall einer Kläranlage durch spezialisierte Entsorgungsfirmen erfolgen. Eine Regenerierung ist bislang aus ökonomischen Gründen noch nicht vorgesehen, aber grundsätzlich denkbar. Vor allem für die Filtermatten (oberste Lage) sind anteilmäßig nennenswerte Kosten erforderlich. Diese könnten ggf. gesäubert und mehrfach verwendet werden.

Die Durchlässigkeit des Filters und die erforderliche Wartung kann durch Bilanzierung der Füllstände im Zu- und Ablaufbereich sowie anhand des Füllstandsabfalls im Zulaufbereich abgeschätzt werden. Sinkt der Füllstand im Zulauf nicht mehr ab, ist der Filter kolmatiert. Ein wesentlicher Vorteil ist dabei, dass die Funktion des Systems auf diese Weise einfach und sicher überwacht werden kann und der Filterwechsel zum idealen Zeitpunkt erfolgt.

7.4 Entsorgungsmöglichkeiten

Die Entsorgung des anfallenden Schlammes aus technischen Regenwasserfiltern gestaltet sich generell schwierig. Hauptproblem ist hierbei der hohe organische Anteil des Schlammes, welcher nur eine eingeschränkte Deponierbarkeit zulässt. Für das bei einem TRF zusätzlich anfallende Filtersubstrat ist dieses Problem weniger relevant, da hier der mineralische Anteil um das Substrat erhöht wird und sich hierdurch der organische Anteil sogar entsprechend reduziert. Allerdings wird das Substrat bisher zusammen mit dem Schlamm aus dem Schlammammelraum entfernt wodurch eine getrennte Entsorgung nicht möglich ist.

Theoretisch besteht für die eingesetzten Substrate die Möglichkeit diese weitestgehend zu regenerieren und zumindest anteilig erneut als Filtermaterial zu nutzen umso die Abfallmengen und Materialkosten gering zu halten. Allerdings existiert bisher weder ein Verfahren zur Regeneration der Filtermaterialien, noch fallen Substratmengen an, welche die Entwicklung eines Verfahrens ökologisch rechtfertigen.

Unabhängig vom Filtermaterial muss jedoch auch der Schlamm entsorgt werden. Dieser ist in seiner Beschaffenheit und Zusammensetzung vermutlich identisch mit den Schlämmen aus Regenklärbecken. Obwohl nach Stand 2013 in Deutschland 3.747 Regenklärbecken mit einem Gesamtspeichervo-

lumen von 2.576.432 m³ betrieben werden (Statistisches Bundesamt, 2015) scheint die Entsorgung der anfallenden Schlämme problematisch. Laut LUBW (2017) liegt der TOC zwischen 1,9 und 17,9 % wobei ein Mittelwert von 10,3 % TOC bezogen auf die Trockenmasse festgestellt wurde. Laut Deponieverordnung (2009) darf der TOC des Deponiegutes auf Deponien der Klasse III (oberirdische Deponie für gefährliche Abfälle) maximal 6 % betragen. Damit ist in Bezug auf den organischen Anteil ein Großteil der Schlämme nicht deponierbar. In Ausnahmefällen kann dennoch eine Deponierung erfolgen. Das LUBW gibt an, dass es zudem möglich ist, in Behandlungsanlagen Ölanteile und organische Rückstände abzutrennen und die Schlämme so deponierbar zu machen. Ob derartige Verfahren tatsächlich Anwendung finden ist schon allein aus Kostengründen fragwürdig.

8 Schlussfolgerungen und Ausblick

Die wesentlichen Ziele des Projektes waren die Begleitung der ersten Betriebsjahre des TRF Fleute, um mögliche betriebliche Optimierungen zu testen und konstruktive Optimierungen für künftige Anlagen zu entwickeln. Die Eignung des technischen Filtersystems sollte dabei insbesondere unter folgenden Bedingungen untersucht werden:

- ▶ Ständiger Fremdwasserzufluss
- ▶ Begrenzte Platzanforderungen in eng strukturierten urbanen Räumen

Die Untersuchungen umfassen den Zeitraum vom 07.10.2013 bis zum 31.03.2017. Damit wurde ein wesentlich größerer Zeitraum untersucht, als ursprünglich vorgesehen. Die Projektfinanzierung sah einen Zeitraum vom 07.10.2013 bis 31.12.2015 bzw. nach Verlängerung bis zum 30.06.2016 vor.

Die bisherigen Betriebserfahrungen zeigen, dass eine Regenwasserfiltration auch im großtechnischen Maßstab gut möglich ist. Ein maßgebliches, häufig unterschätztes Kriterium, das die Wirkung von Regenwasserbehandlungssystemen beeinflusst, ist die Wartung der Systeme. Nur regelmäßig gewartete Systeme wirken langfristig. Es hat sich gezeigt, dass insbesondere der manuelle Aufwand für den Ein- und Ausbau des Filtermaterials für das Betriebspersonal ungewohnt ist. Letztlich erfolgte der Filterwechsel aber innerhalb von zwei Tagen, wobei mit entsprechender Erfahrung künftig ein Arbeitstag realistisch erscheint, sodass der erforderliche Arbeitsaufwand mit der Reinigungsmaßnahme eines Regenklärbeckens durchaus vergleichbar ist. Vertreter der Betriebsabteilung der WSW schätzen den Aufwand im Vergleich zu einem Retentionsbodenfilter als deutlich geringer ein.

Im Rahmen des Projektes wurden eine Reihe konstruktiver Optimierungsmöglichkeiten erkannt und entwickelt, die dazu beitragen, den betrieblichen Aufwand bei künftigen Filtern deutlich zu reduzieren bzw. zu vereinfachen. Es ist davon auszugehen, dass ein Teil der entwickelten Maßnahmen dazu beiträgt, die Filterwirkung deutlich zu steigern.

Zur **Optimierung des Filters** (Filtermaterial und Filteraufbau) zählen folgende Maßnahmen:

- ▶ Vermeidung von Umläufigkeiten, u. a. durch regelmäßige Kontrolle der Befestigungselemente zur Auftriebssicherung
- ▶ Verwendung von Gitterrosten mit geringerer Stegdicke
- ▶ Vereinfachung des Filtereinbaus und des Filterwechsels durch Verwendung loser Schüttgüter

Zur konstruktiven **Optimierung des Bauwerkes** zählen folgende Maßnahmen:

- ▶ Verbesserung der Zugangsmöglichkeiten durch größere Montageöffnungen
- ▶ Gestaltung des Arbeitsraums (Höhe des Arbeitsraumes)
- ▶ Ausreichendes Gefälle in den Schlammammelräumen
- ▶ Zusätzliche mechanische Rückhaltemaßnahmen zum Rückhalt der Stoffe $> 63 \mu\text{m}$ zur Maximierung der Filterstandzeit
- ▶ Vermeidung von Sedimentation auf dem Filter durch Umleitung des Entlastungsabflusses
- ▶ Zuflussregulierung zur Vermeidung überproportional hoher Durchflüsse gerade zu Beginn der jeweiligen Betriebsphase
- ▶ Verhinderung des Lichteinfalls zur Vermeidung von Algenbildungen
- ▶ Verzicht auf Durchdringungen der Filterfläche zur Reduzierung von Umläufigkeiten

Die Erfahrungen haben gezeigt, dass grundsätzlich mit organischen Belastungen durch fehlangeschlossene Schmutzwasserleitungen zu rechnen ist. Hier sind vor Inbetriebnahme des Filters entsprechende Maßnahmen zur Detektion und Beseitigung erforderlich. Spätestens mit Inbetriebnahme eines Filters werden solche Missstände aber offensichtlich und erfordern dann entsprechende Maßnahmen im Einzugsgebiet. Dies ist aber kein Mangel des Filtersystems sondern ein bisher unentdeckter Mangel der Gebietsentwässerung.

Schwerpunkt der Untersuchungen dieses Projektes zur Untersuchung technischer Filter war nicht die Optimierung des Stoffrückhaltes. Hier liegt allerdings die besondere Stärke von Filtersystemen. Künftige Anforderung an Niederschlagswasserbehandlung, beispielsweise durch das Arbeitsblatt DWA-A 102, ist der Rückhalt der Feinfraktion abfiltrierbarer Stoffe (AFS₆₃). Vor diesem Hintergrund sind weitere Untersuchungen mit unterschiedlichen Filterwerkstoffen und Materialkombinationen sinnvoll. Bislang noch weitgehend ungeklärt ist der Rückhalt gelöster Schwermetalle, die möglicherweise in bislang unterschätztem Umfang zur Schädigung der aquatischen Ökosysteme beitragen. Neben den verwendeten Filtermaterialien spielt hier sicherlich die Interaktion mit den übrigen Inhaltsstoffen im Niederschlagswasser, die sich im Laufe des Filterbetriebs an das Filtermaterial anlagern, eine wesentliche Rolle. Hierzu sind im Rahmen von Laborversuchen nur unzureichende Erkenntnisse zu gewinnen.

Orientierende Untersuchungen zum Feststoffrückhalt sind im Rahmen des Projektes bereits im Labormaßstab durchgeführt worden. Dabei stellte sich heraus, dass die Verwendung des Quarzmehls Millisil W4, zur Beurteilung der Wirkung technischer Filter nur eingeschränkt geeignet ist.

Mit den vorliegenden Ergebnissen ist ein erster Schritt in Richtung „Regenwasserfiltration im zentralen Maßstab“ erfolgt. Vor dem Hintergrund jahrzehntelanger Entwicklungen und Erfahrungen mit der Regenwasserbehandlung in Sedimentationsbecken, die nur eingeschränkt wirken, kann nicht erwartet werden, dass eine Filteranlage innerhalb kürzester Zeit zu einem System mit uneingeschränkter Betriebsstabilität und hohem Stoffrückhalt entwickelt wird. Weiterhin müssen bei der Systementwicklung technischer Regenwasserfilter vergleichbare Untersuchungs- und Entwicklungsaufwendungen akzeptiert werden, wie bei den inzwischen etablierten Retentionsbodenfiltern.

Auf der Basis der vorliegenden Erkenntnisse sind nun weitere Entwicklungen erforderlich. Mit diesen Systemen besteht dann die Möglichkeit, auch in engen urbanen Räumen, wirksam und mit akzeptablem Betriebsaufwand, verunreinigte Oberflächenabflüsse zu behandeln.

9 Literatur

Bihs H.-J., Sommer U. und Kieseewetter L. (2015) Entwicklung eines Filterklärbeckens (FKB) zur zentralen Behandlung von belastetem Niederschlagswasser. Bericht zum Forschungsvorhaben der Wirtschaftsbetriebe Hagen, Hagen, Dezember 2015

Brombach H. und Weiß G. (2007) Technische Filterung von Oberflächenabflüssen aus Siedlungsgebieten. Forschungsbericht FZKA-BWPLUS, Bad Mergentheim, November 2007

Deponieverordnung (2009) Verordnung über Deponien und Langzeitlager, Ausfertigungsdatum: 27.04.2009, Bundesregierung und Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit

Dierschke M. und Welker A. (2015) Bestimmung von Feststoffen in Niederschlagsabflüssen. gwf-Wasser/Abwasser Nr. 4, S. 440 bis 446

DWA-M153 (2012) DWA-Regelwerk Merkblatt DWA-M153 Handlungsempfehlungen zum Umgang mit Regenwasser, Hennef: Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall

DWA-A118 (2006) DWA-Regelwerk Arbeitsblatt DWA-A118 Hydraulische Bemessung und Nachweis von Entwässerungssystemen, Korrigierte Fassung, Stand: September 2011 Hennef: Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall

Ellerhorst, St. (2012) Betriebliche Erfahrungen mit dezentralen Anlagen zur Straßenentwässerung. Tagungsunterlagen der DWA – Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Wasser und Abfall e.V., 11. Regenwassertage am 12./13. Juni 2012 in Berlin

Fent, K. (2013) Ökotoxikologie: Umweltchemie - Toxikologie - Ökologie, Georg Thieme Verlag, 20. Februar 2013

Fuchs S. und Eyckmanns-Wolters R. (2016) Wirksamkeit von Regenbecken im Bestand. Erfahrungsaustausch Forschungs- und Entwicklungsvorhaben zum Thema Niederschlagswasserbeseitigung, Landesamt für Natur, Umwelt und Verbraucherschutz Nordrhein-Westfalen (LANUV), am 14.01.2016 in Düsseldorf

Fuchs, S. und Kemper, M. (2016) Schrägklärer im Trenn- und Mischsystem. Erfahrungsaustausch Forschungs- und Entwicklungsvorhaben zum Thema Niederschlagswasserbeseitigung, Landesamt für Natur, Umwelt und Verbraucherschutz Nordrhein-Westfalen (LANUV), am 14.01.2016 in Düsseldorf

Gasper, H. (2004) Projektierung und Optimierung von Fest/Flüssigsystemen, Chemie Ingenieur Technik 2004, 76, No. 6, Wiley-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, Weinheim, S. 746 bis 748

Grüning H. (2002): Ein Modell zur simultanen Bewirtschaftung von Kanalnetz und Kläranlage unter Berücksichtigung resultierender Gewässerbelastungen. Schriftenreihe Siedlungswasserwirtschaft, Ruhr-Universität Bochum, Band 42

Grüning H. (2005) Einsatz von Photometersonden zur Stoffparametermessung für die Bewirtschaftung des Entlastungssammlers Wupper. Mess- und Regelungstechnik in abwassertechnischen Anlagen. Gemeinschaftstagung der ATV-DVWK und VDI/VDE-Gesellschaft Mess- und Automatisierungstechnik (GMA) am 22. und 23. November 2005 in Wuppertal, S. 233 bis 240

Grüning, H. und Hoppe, H. (2007) Niederschlagswasser im Trennsystem - Verlangt der „Trennerlass“ zu viel? Impulse und Entwicklungspotential. Abwasserreport Ausgabe 4/07

Grüning H., Giga A. und Quarg-Vonscheidt J. (2010) Vergleichende Gegenüberstellung von Regenklärbecken und dezentralen Regenwasserbehandlungssystemen. Tagungsunterlagen der DWA – Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Wasser und Abfall e.V., 9. Regenwassertage am 8./9. Juni 2010 in Bremen

Grüning H. und Schmitz T. (2017) Regenwasserfiltration in technischen Anlagen. 5. Wassertage Münster, Institut für Wasser · Ressourcen · Umwelt, 21./22. Februar 2017, Tagungsband (ISBN: 978-3-938137-93-2), S. 75 bis 92

Herrmann, R., Daub, J., Striebel, T. (1992) Charakterisierung und Analyse der Verschmutzung des Niederschlags und des Niederschlagabflusses, Phase I, Teilprojekt 1, Schlussbericht 1988-1991, Lehrstuhl für Hydrologie, Universität Bayreuth

Huth, B., Rennert, S., Lützner, K., & Grothhopp, H. (1995) Schadstoffeintrag durch atmosphärische Deposition. Schadstoffe im Regenabfluss III-3. Präsentation des BMBF-Verbundprojektes: Niederschlagsbedingte Schmutzbelastung der Gewässer aus städtischen befestigten Flächen“(Phase II). Schriftenreihe des Instituts für Siedlungswasserwirtschaft, Universität Karlsruhe (TH), 73, 169-198

LUBW (2017) Steckbrief Nr. 19.2: „Schlämme aus Retentions-, Regenüberlauf-, Regenrückhalte-, Regenklärbecken im Bereich der Straßenentwässerung“. Stand 01.01.2017, Landesanstalt für Umwelt, Messungen und Naturschutz Baden-Württemberg, Referat 35 Kreislaufwirtschaft, Chemikaliensicherheit

Manson, Y., Amman, A. A., Ulrich, A., Sigg, L. (1999) Behavior of Heavy Metals, Nutrients, and Major Components during Roof Runoff Infiltration, Environmental Science and Technology, VOL. 33, NO. 10, 1999, pp 1588–1597, American Chemical Society

MKULNV (2016) Entwicklung und Stand der Abwasserbeseitigung in Nordrhein-Westfalen, 17. Auflage, Stichtag der Daten: 31.12.2014, Ministerium für Klimaschutz, Umwelt, Landwirtschaft, Natur- und Verbraucherschutz des Landes Nordrhein-Westfalen (MKULNV), 40190 Düsseldorf

Odenkirchen, G. (2017) Wasserwirtschaft in NRW – Welche Herausforderungen liegen vor uns? Vortrag auf dem 35. Bochumer Workshop Siedlungswasserwirtschaft, Ruhr-Universität-Bochum, Lehrstuhl für Siedlungswasserwirtschaft und Umwelttechnik, 21.09.17

s::can Messtechnik GmbH (2010) Parameters and Measuring Principles.
<<http://www.s-can.at/index>>

s::can Messtechnik GmbH (2003) Handbuch s::can Monitoring System. Version 4.0 Ausgabe August 2003

Schmitt, T. G., Uhl, M., Mohn, R., Voßwinkel, N., Maus, C., Sommer, M., Eyckmanns-Wolters, R., Fuchs, S., Berger, C. (2013) Reduktion des Feststoffeintrages durch Niederschlagswassereinleitungen, Phase 1, Projektbericht, Ministerium für Klimaschutz, Umwelt, Landwirtschaft, Natur- und Verbraucherschutz des Landes Nordrhein-Westfalen

Sommer H., Post M. und Estupinan F. (2014) Dezentrale Behandlung von Straßenabflüssen. Broschüre der Ingenieurgesellschaft Prof. Dr. Sieker mbH, Berlin

Statistisches Bundesamt (2015) Umwelt, Erhebung der öffentlichen Wasserversorgung und öffentlichen Abwasserentsorgung, 2013, Erschienen am 29.07.2015, Wiesbaden

Stumwöhrer K. und Matsché N. (1999) Einsatz der SAK-Messung zur Beurteilung unterschiedlicher Abwasserbehandlungsverfahren. Wiener Mitteilungen Bd. 156 (1999), S. 111 bis 129

Rouault P, Wicke D., Matzinger A, Caradot N. und Schubert R.-L. (2015) Organische Spurenstoffe im Regenwasser - Erfassung und Bewertung ortspezifischer Belastungen in Berlin (Vortrag). 5. Kommunalen Erfahrungsaustausch: Regenwassermanagement in der Praxis, Dr. Pecher AG, 20.05.2015 in Gelsenkirchen

Voßwinkel, N. und Mohn, R. (2017) Strömungsmechanische Optimierung bestehender Regenklär- und überlaufbecken (Vortrag), Wassertage Münster 2017, Wasser in Deiner Stadt von morgen, IWARU, 22.02.2017 in Münster

Werker H. (2015) Dezentrale Abwassersysteme im urbanen Raum - Konsequenzen für Planung, Bau und Betrieb (Vortrag). Steinzeug-Dozententagung 2015 in Köln