33X246951
28.03.2016

HERFORDER ABWASSER GMBH

Untersuchung zur Elimination von Mikroschadstoffen mittels Pulver-Aktivkohle in einer Actiflo®Carb-Anlage auf der KA Herford

PÖYRY
Engineering balanced sustainability™

Copyright © Pöyry Deutschland GmbH

Alle Rechte vorbehalten. Weder Teile des Berichts noch der Bericht im Ganzen dürfen ohne die ausdrückliche schriftliche Genehmigung von Pöyry Deutschland GmbH in irgendeiner Form vervielfältigt werden.

Untersuchung zur Elimination von Mikroschadstoffen mittels Pulver-Aktivkohle in einer Actiflo®Carb-Anlage auf der KA Herford

Auftraggeber:

Herforder Abwasser GmbH
Auf der Freiheit 21
32052 Herford

Verfasser:

PöyryDeutschland GmbH
Lazarettstraße 15
45127 Essen
Tel. 0201 82054-0
Fax 0201 82054-22
environment.essen.de@poyry.com
www.environment.poyry.de

Essen, den 28.03.2016
Pöyry Deutschland GmbH

i.V. Dr. Matthias Krüger i. A. Caroline Simsheuser

Inhalt

1 VERANLASSUNG UND ZIELSETZUNG ... 6

1.1 Veranlassung ... 6
1.2 Zielsetzung und Vorgehensweise ... 6

2 ANLAGENBESCHREIBUNG ... 7

2.1 Kurzbeschreibung der Kläranlage Herford ... 7

3 ERGEBNISSE DER VORANGEGANGENEN MACHBARKEITSSTUDIE ... 10

3.1 Kurzbeschreibung der Machbarkeitsstudie ... 10
3.2 Betrachtung der Verfahren für die KA Herford ... 11
3.3 Wirtschaftlichkeitsbetrachtung ... 12
3.4 Zusammenfassung der Ergebnisse der Studie ... 13

4 DAS ACTIFLO®CARB-VERFAHREN ... 14

4.1 Vorkontaktbecken (PAC pre-contact tank) ... 14
4.2 Koagulationsbecken (Coagulation tank) ... 14
4.3 Flockungsbecken mit eingebautem TURBOMIX™ (flocculation tank) ... 15
4.4 Absetzbecken/ Lamellenabscheider ... 15
4.5 Hydrozyklon (hydrocyclon) ... 15
4.6 PAK-Austrag (discharge sludge) ... 16

5 DARSTELLUNG DER PILOTANLAGE (GESAMTANLAGE) ... 18

5.1 Zulaufpumpstation ... 18
5.2 Actiflo®Carb-Anlage ... 19
5.3 PAK-Anlage ... 20
5.4 Trommelfilter ... 23
5.4.1 Funktionsprinzip der Filtration und Anwendung ... 24

6 VERSUCHSDURCHFÜHRUNG ... 25

6.1 Versuchsprogramm und Versuchseinstellungen ... 25
6.2 Probenahme ... 27
6.2.1 Probenahmestellen ... 27
6.2.2 Durchführung der Probenahme ... 28
6.3 Mess- und Analyseprogramm ... 28
6.4 Probenaufbereitung und Analytik ... 30
6.4.1 Filtration ... 31
6.4.2 Chemischer Sauerstoffbedarf (CSB) ... 32
6.4.3 Abfiltrierbare Stoffe (AFS) ... 33
6.4.4 Messung Trübung ... 34
6.4.5 Messung pH-Wert ... 34
6.4.6 Schwarzgrad ... 34
6.4.7 Mikroschadstoffe ... 34

7 VERSUCHSERGEBNISSE ... 36

7.1 Pulveraktivkohle ... 36
7.1.1 PAK-Konzentration im Vorkontaktbecken ... 36
7.1.2 PAK-Kontaktzeit ... 36
7.1.3 PAK-Alter ... 37
7.1.4 PAK-Beladung ... 37
7.2 Mikroschadstoffe ... 40
7.3 Ausgewählte Mikroschadstoffe ... 41
7.3.1 Benzotriazol ... 41
7.3.2 Diatrizoat (Amidotrizoat) ... 41
7.3.3 Iomeprol ... 42
7.3.4 Iopamidol ... 43
7.3.5 Diclofenac ... 43
7.3.6 Metoprolol ... 44
7.3.7 Übersicht der 6 ausgewählten Mikroschadstoffe ... 44
7.4 Vergleich Röntgenkontrastmittel ... 45
7.5 Vergleich Industriechemikalien ... 47
7.6 Vergleich Arzneimittelrückstände ... 49
7.6.1 Schmerzmittel ... 49
7.6.2 Betablocker ... 51
7.6.3 Antibiotika, Antiepileptika, Psychopharmaka und Lipidsenker ... 51
7.6.4 Eliminationsraten der einzelnen Stoffgruppen ... 52
7.7 Erreichung des Reinigungsziels der Leitparameter ... 53
7.8 Standardanalytik ... 55
7.8.1 Chemischer Sauerstoffbedarf (CSB) ... 55
7.8.2 Abfiltierbare Stoffe (AFS) und Trommelfilter ... 59

8 ZUSAMMENFASSUNG ... 61

LITERATURVERZEICHNIS ... 63

TABELLEN- UND BILDVERZEICHNIS ... 69

8.1 Tabellenverzeichnis ... 69
8.2 Abbildungsverzeichnis ... 70

1 VERANLASSUNG UND ZIELSETZUNG

1.1 Veranlassung

Die Stadt Herford betreibt eine Abwasserreinigungsanlage mit einer Kapazität von 250.000 EWG nach dem Prinzip der biologischen Filtration (Biostyr). Aufgrund der möglichen zusätzlichen Anforderungen an Abwasserreinigungsanlagen (4. Reinigungsstufe) und eines temporär erhöhten CSB-Ablaufwertes möchte die Herford Abwasser GmbH aufbauend auf der in 2013 durch die Firma Pöyry Deutschland GmbH durchgeführten Machbarkeitsstudie Pilotversuche mit einer Actiflo®Carb-Anlage durchführen.

Der vorliegende Abschlussbericht befasst sich mit der Beschreibung des Actiflo®Carb Verfahrens (Kapitel 4), mit der Darstellung und Beschreibung der gesamten Pilotanlage (Kapitel 5), der Versuchsdurchführung (Kapitel 6) und der anschließenden Aus- und Bewertung der Ergebnisse (Kapitel 7).

Hierbei wird auf den Ergebnissen aus der Machbarkeitsstudie aufgebaut und die dort dargestellten verschiedenen Versuchseinstellungen wie z.B. PAK– Dosierung in der Actiflo®Carb-Anlage übernommen.

1.2 Zielsetzung und Vorgehensweise

Die im Rahmen der Machbarkeitsstudie gewonnenen Erkenntnisse zum Einsatz von Pulveraktivkohle (PAK) sollten in einer nach dem Actiflo®Carb-Verfahren aufgebauten Pilotanlage vertieft und die Leistungsfähigkeit bzw. die Grenzen für den Anwendungsfall auf der Kläranlage Herford untersucht werden.

Durch Pöyry wurde der Aufbau der Actiflo®Carb-Anlage inkl. Pumpstation (inkl. Steuerung), PAK-Bevorratung und –Dosieranlage sowie nachgeschalteten Trommelfilter ausgearbeitet.

Die Ausarbeitung des Versuchsprogramms sowie die Auswertung der Ergebnisse erfolgte in enger Abstimmung mit dem Anlagenbetreiber und den ausrüstenden Firmen.

In Zusammenarbeit mit dem Personal der Herforder Abwasser GmbH wurde die halbtechnische Pilotanlage inkl. Peripherie auf der KA Herford errichtet.

Nach der Inbetriebnahme wurde die Pilotanlage durch Pöyry für den Versuchszeitraum betreut. Hierzu zählt sowohl die Bedienung der Anlage als auch die Vorbereitung und Durchführung der Eigenanalytik.

Ziel war es weitergehende und fundierte Informationen zu sammeln, welche Eliminationsraten an Spurenstoffen bzw. inerten Rest-CSB durch unterschiedliche Versuchseinstellungen erzielt werden können. Des Weiteren wurde untersucht, welche hydraulischen Randbedingungen für ein stabiles großtechnisches Verfahren einzuhalten sind.

2 ANLAGENBESCHREIBUNG

2.1 Kurzbeschreibung der Kläranlage Herford

Die Kläranlage Herford wurde in den 1930er Jahren erstmals erbaut und in den darauffolgenden Jahrzehnten schließlich als mechanisch-biologische Kläranlage mit anaerober Schlammfaulung ausgebaut. Im Jahr 1994 erfolgte der Neubau als vollständig in ein geschlossenes Gebäude integrierte Anlage zur Abwasserbehandlung an einem zur Altanlage nahegelegenen Standort. Die Abwasserreinigung erfolgt seither nach dem Biofiltrationsverfahren (Biostyr®) mit einer Kapazität von 250.000 Einwohnerwerten.

Zum Einzugsgebiet der durch die Herforder Abwasser GmbH betriebenen Kläranlage zählen das gesamte Stadtgebiet Herford und die Nachbargemeinde Hiddenhausen. Das zu behandelnde Abwasser setzt sich mit einem Anteil von rund 90.000 EW aus häuslichem Schmutzwasser und mit einem Anteil von rund 120.000 EW aus gewerblichem Schmutzwasser zusammen. Die für die Auslegung zu Grunde gelegten Daten sind in Tabelle 2-1zusammengefasst.

Die Kläranlage ist auf einen mittleren Mischwasserzufluss von Q_M = 33.000 m³/d ausgelegt.

Tabelle 2-1: Allgemeine Anlagenkenndaten Kläranlage Herford

Kläranlage Herford		Einheit
Einwohnerwerte, häusliches Schmutzwasser	90.000	[EW]
Einwohnerwerte, gewerbliches Schmutzwasser	120.000	[EW]
Einwohnerwerte, Zuschlag Spitzenabdeckung	40.000	[EW]
Einwohnerwerte gesamt (Auslegungswert, gerundet)	250.000	[EW]
Größenklasse nach AbwG	5	[-]
Täglicher Mischwasserzufluss (Auslegungswert)	33.000	[m³/d]
Täglicher Mischwasserzufluss (Mittelwert, Betriebsdaten 2011)	24.800	[m³/d]
Täglicher Abfluss (Mittelwert, Betriebsdaten 2011)	24.300	[m³/d]
Maximaler Trockenwetterzufluss (Auslegungswert)	2.200	[m³/h]
Maximaler Regenwetterzufluss (Auslegungswert)	4.400	[m³/h]
Zulauffracht CSB (Auslegungswert)	37.900	[kg/d]

Abbildung 2-1 zeigt den schematischen Aufbau der Kläranlage Herford. Die Verfahren zur Abwasser- und zur Schlammbehandlung sind im Folgenden kurz erläutert.

Abwasserbehandlung

Vor Eintritt in die erste Reinigungsstufe, durchfließt das aus dem Kanalnetz zulaufende Abwasser eine Sicherheitskammer, in der explosive Gase und öl- oder benzinbelastete Rohabwässer messtechnisch erfasst werden und dessen Eintritt in die Kläranlage verhindert wird.

Die mechanische Abwasserreinigung erfolgt konventionell. Zur Grob- und Sperrstoffentnahme sind zwei Grobrechen mit einer Spaltweite von 20 mm vorgesehen. Von dort aus wird das Abwasser mit Hilfe von insgesamt 6 in einem Rohwasserpumpwerk aufgestellten Tauchmotorpumpen in den 2-straßigen belüfteten Sand- und Fettfang gefördert.

Anschließend passiert das Abwasser den Feinstrechen mit einer Stabweite von 3 mm bevor es der Primärstufe zufließt.

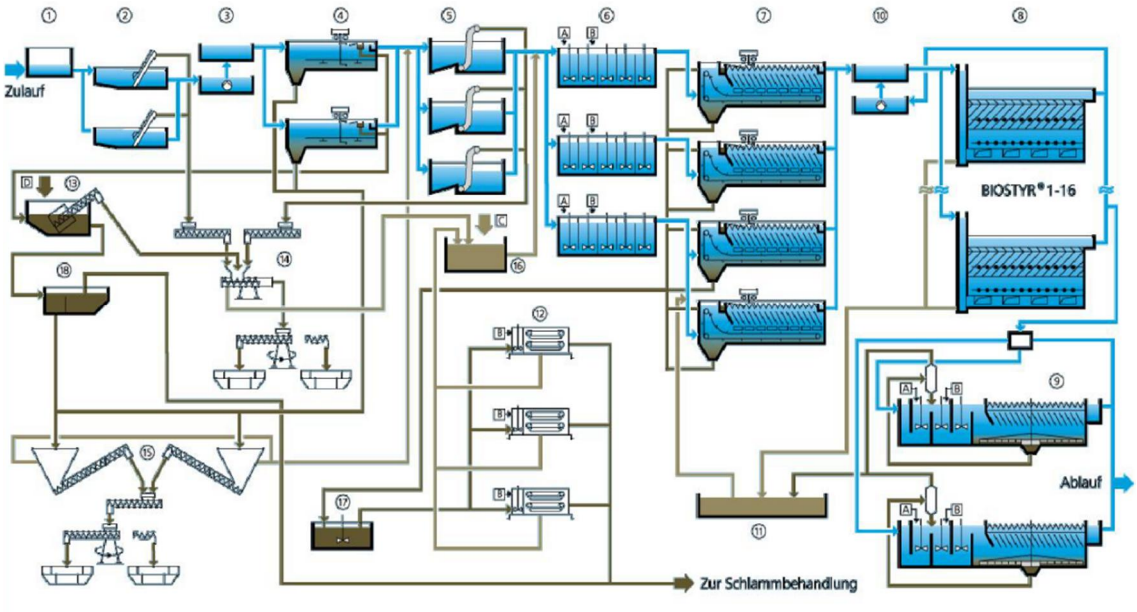

Abbildung 2-1: Schemaplan, Kläranlage Herford [Quelle: Hydro Ingenieure, 2000]

(1) Sicherheitskammer, (2) Grobrechenanlage, (3) Zulaufpumpwerk, (4) Sandfang, (5) Feinstrechen, (6) Vorfällung, (7) Lamellenabscheider, (8) Biofiltration Filter, (9) Biofiltration Fällstufe, (10) Biofiltration Verteilung

Die Vorklärung setzt sich aus 3 CLARIFLO®-Becken (im Folgenden: Clariflo) bestehend aus jeweils einem Koagulations-Flockungsbecken und einem anschließendem Lamellenabscheider zusammen. Diese Technik zeichnet sich durch einen hohen Wirkungsgrad bei kleiner Grundfläche aus. Durch die Vorfällung wird eine zusätzliche Abscheidung von Phosphor und Schwebstoffen begünstigt. Ein viertes Clariflo-Becken ist zur Trübwasserbehandlung vorhanden, derzeit jedoch außer Betrieb. Im Anschluss an die Vorklärung wird das Abwasser auf die jeweils betriebene Anzahl an Biofiltrationsbecken der Sekundärstufe verteilt und mit dem Rezirkluat vereinigt. In den 16 BIOSTYR®-Filtern (im Folgenden; Biostyr) wird eine schwimmende Festbettfilterschicht aus feinkörnigem Polystyrol-Granulat mit dem zu klärenden Abwasser im Aufwärtsstrom beschickt. Durch die direkt ins Filtermaterial eingeblasene Luft bildet sich ein aktiver Bakterienfilm auf der Oberfläche der Körner. Dabei werden alle biologisch abbaubaren Stoffe in Bakterienmasse umgesetzt. Die Filter werden in regelmäßigen Abständen gespült und vom überschüssigen Bakterienfilm befreit. Der anfallende Überschussschlamm wird abgezogen und der maschinellen Schlammeindickung zugeführt. Das biologisch gereinigte Abwasser fließt der Tertiärstufe, den ACTIFLO®-Becken (im Folgenden: Actiflo), zu. Dabei handelt es sich um ein Lamellenklärbecken mit vorangehender Eisen-II-Salz-, Mikrosand- und Flockungsmittel-Dosierung. Die Reinigungsstufe dient der Abscheidung feinster Schwebstoffe und Rest-Phosphorvor einer anschließenden Einleitung des Klarwassers in die Werre.

<u>Schlammbehandlung</u>

Die in der Primär-, Sekundär- und Tertiärstufe anfallenden Schlämme werden abgezogen, zur Vergleichmäßigung des Trockensubstanz-Gehaltes in einem Sammelbecken gemischt und zwischengespeichert. Unter Zugabe von Polymer wird das Schlammge-

misch anschließend zur maschinellen Eindickung gefördert. Die Eindickung erfolgt durch 2 Seihtische und 1 Scheibeneindicker auf einen TS-Gehalt von 6 %. Der eingedickte Schlamm wird zur anschließenden Stabilisierung in die Faulbehälter gepumpt.

sonstiges

Aus Gründen des Emissionsschutzes ist ein Großteil der Anlage als geschlossenes Bauwerk ausgeführt. Es findet sowohl eine Be- als auch eine Entlüftung statt. Die anfallenden Abluftströme werden abgesaugt und in einer 3-stufigen, 2-straßigen chemischen Wäsche (AQUILAIR®) behandelt.

Aufgrund der, zum Zeitpunkt der Planung, in Deutschland bislang neuartigen und unerprobten Abwasserbehandlungstechnik, erfolgte die Bemessung der Kläranlage auf Grundlage von 99 %-Quantilen der Zulauffrachten, anstatt der üblichen 85 %-Quantilen.

3 ERGEBNISSE DER VORANGEGANGENEN MACHBARKEITSSTUDIE

Im Jahr 2013 wurde durch die Firma Pöyry Deutschland GmbH eine „Machbarkeitsstudie zur Elimination von Spurenstoffen und Rest-CSB auf der Kläranlage Herford“ durchgeführt. Eine kurze Zusammenfassung der Studie und die dort beschriebenen Ergebnisse dienen als Basis für die Vorbereitung und Durchführung der Pilotierung und werden nachfolgend dargestellt:

3.1 Kurzbeschreibung der Machbarkeitsstudie

Die Bearbeitung der Machbarkeitsstudie erfolgte im Jahr 2013. Für die Bearbeitung wurden seitens der Herforder Abwasser GmbH die Betriebstagebücher aus dem Jahr 2011 zur Verfügung gestellt. Eine Auswertung dieser Betriebsdaten ergab einen erhöhten Anfall von inertem Rest-CSB im Ablauf der KA Herford. Es wurde ermittelt, dass es vor allem zum Ende der Woche (Do-Fr) zu einem Anstieg der CSB-Frachten im Ablauf kommt. Zum Wochenende nehmen die Frachten daraufhin wieder ab. Dadurch kommt es zu einem sägezahnförmigen Wochenverlauf.

Zur Entfernung der untersuchten Spurenstoffe sowie des inertem Rest-CSB wurden innerhalb der Machbarkeitsstudie drei unterschiedliche Verfahren betrachtet. Diese wurden hinsichtlich ihrer Eliminationsraten, der Betriebssicherheit und wirtschaftlichen Umsetzbarkeit untersucht und bewertet.

Die im Rahmen der Studie betrachteten Verfahren werden nachfolgend kurz erläutert:

Granulierte Aktivkohle – GAK

Granulierte Aktivkohle wird in einem Raumfilter eingesetzt. Das Filterbett wird hierbei vom Abwasser durchflossen. Dabei lagern sich die adsorbierbaren Stoffe an der Aktivkohle an. Das Filtrat wird in Abhängigkeit von der Fließrichtung innerhalb des Filters oberhalb oder unterhalb des Filterbettes bzw. der Spüldüsen entnommen.

Pulveraktivkohle – PAK

Pulveraktivkohle besitzt aufgrund ihrer geringeren Korngröße eine größere spezifische Oberfläche als granulierte Aktivkohle und erzielt dadurch eine bessere Adsorptionsleistung, insbesondere hinsichtlich schwer adsorbierbarer Stoffe.

Ein weiterer Vorteil der Pulveraktivkohle liegt in der Möglichkeit einer flexiblen Dosierung in Abhängigkeit der zu eliminierenden Stofffracht. Hierdurch können die Betriebskosten gegenüber einem kontinuierlich beschickten Festbettfilter mit granulierter Aktivkohle gegebenenfalls gesenkt werden.

Anders als die granulierte Aktivkohle wird Pulveraktivkohle aufgrund seiner Partikelgröße nicht regeneriert. PAK kommt in der Regel nur einmal zum Einsatz und wird anschließend aus dem Abwasser abgetrennt und über die Klärschlammverbrennung entsorgt.

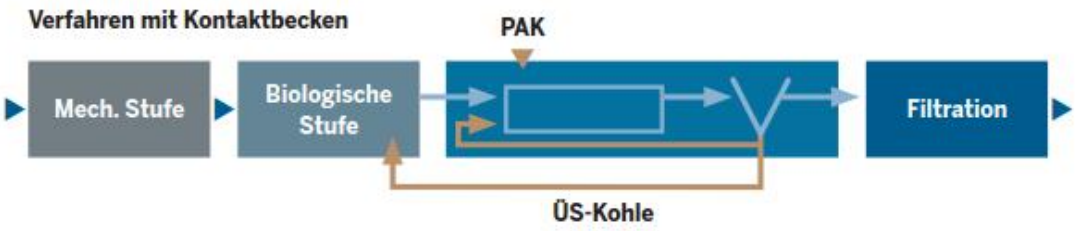

Abbildung 3-1: Mögliche Einbindung einer PAK-Anlage in eine Kläranlage

Ozonierung

Ozon wird zur Behandlung und Desinfektion von Wasser unter anderem in der Abwassertechnik, Schwimmbadtechnik und in der Aquaristik eingesetzt. Zudem wird es zur Behandlung von schadstoffbesetzter Abluft, beispielsweise aus Lackierereien, Druckereien oder der Müllentsorgung genutzt.

Die Eliminationsleistung der Ozonung ist stark stoffabhängig. Einige Stoffgruppen werden besser abgebaut, andere weniger gut. Durch oxidative Prozesse können feste, flüssige und gasförmige Verunreinigungen abgebaut, sowie mikrobiologische Keime und deren Umsetzungsprodukte zerstört werden.

3.2 Betrachtung der Verfahren für die KA Herford

Jedes dieser drei Verfahren wurde konkret für eine Anwendung auf der KA Herford ausgelegt. Dabei wurden auch die lokalen Platzverhältnisse und eine mögliche Nutzung vorhandener Bausubstanz berücksichtigt. Die abschließend ermittelte Vorzugsvariante war aufgrund von geringem bautechnischem Aufwand und der Möglichkeit der Erweiterung des Kontaktbeckens die PAK-Anlage im Actiflo®Carb-Verfahren.

Aufgrund von Bedenken gegenüber einer negativen Beeinflussung des Biostyr Filtermaterials durch die Pulveraktivkohle, wurde als Grundvoraussetzung für das Verfahren festgelegt, das keine Pulveraktivkohle in die Biologie gelangen soll.

Die bereits bestehende Actiflo Anlage kann um die PAK Zugabe und einen anschließenden Trommelfilter erweitert werden. In Abbildung 3-2 ist ein möglicher Aufbau der PAK-Anlage dargestellt:

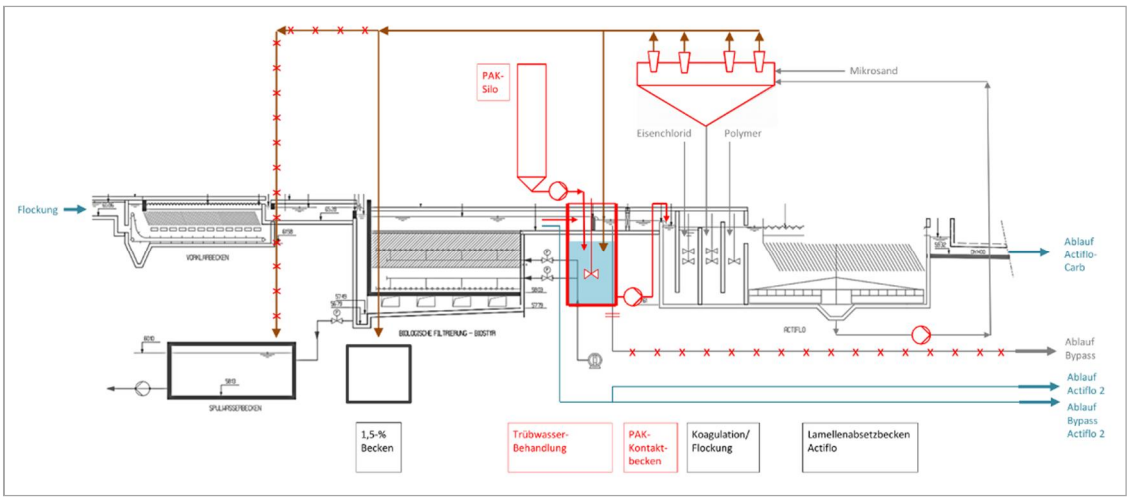

Abbildung 3-2: Möglicher Aufbau eine PAK-Anlage als Actiflo®-Carb auf der KA Herford

Durch Laborversuche wurden verschiedene Aktivkohlesorten hinsichtlich ihrer Adsorptionseigenschaften untersucht und anschließend die am besten geeignetste Sorte ermittelt. Die Aktivkohle AquaSorb 5000P vom Hersteller Jacobi Carbons Service GmbH erzielte die größtmögliche Reduktion von Rest CSB und Spurenstoffen. Aus diesem Grund sollte auch die in Kapitel 4 dargestellte Pilotanlage mit dieser Aktivkohlesorte betrieben werden. Wie in Kapitel 6.1 dargestellt war diese Aktivkohlesorte zum Zeitpunkt der Pilotierung nicht mehr verfügbar. Daher wurde auf eine laut Herstellerangaben ähnliche PAK mit entsprechenden Eigenschaften zurückgegriffen.

3.3 Wirtschaftlichkeitsbetrachtung

Die Jahreskosten der untersuchten Varianten wurden anhand der Kostenvergleichsrechnung nach LAWA [2005] ermittelt.

Die Ergebnisse sind in Tabelle 3-1, abgebildet. Die aufgeführten Jahreskosten wurden für den Einsatz der jeweiligen Anlagen zur Elimination von Spurenstoffen und inertem Rest-CSB an 365 d/a ermittelt.

Tabelle 3-1: Kostenvergleichrechnung nach LAWA

Kläranlage Herford
Elimination von Spurenstoffen und Rest-CSB
Variantenvergleich
Kostenvergleichsrechnung nach LAWA

Durchschnittliche Nutzungsdauern nach den LAWA-Leitlinien zur Durchführung von Kostenvergleichsrechnungen (2005):

Inbetriebnahme Anlagenerweiterung:	**2015**
Untersuchungszeitraum / Planungshorizont :	**30 Jahre**
Bezugszeitpunkt DFAKE	**0 Jahre**
Nutzungsdauer Bautechnik:	**30 Jahre**
Nutzungsdauer M-Technik	**15 Jahre**
Nutzungsdauer E-/MSR-Technik:	**15 Jahre**
Nutzungsdauer Sonstiges	**15 Jahre**
Realzinssatz i :	**3,0 % p.a.**
Reale jährliche Preissteigerungsraten für die laufenden Energiekosten:	**4,0 % p.a.**
Reale jährliche Preissteigerungsraten für alle übrigen Kosten:	**3,5 % p.a.**
Die Investitionskosten werden zum Bezugszeitpunkt betrachtet.	Alle Kosten netto

Eingangsdaten		**Variante 1**		**Variante 2**		**Variante 3**	
Untersuchte Variante		**Einsatz von Granulierter Aktivkohle**		**Einsatz von Pulveraktivkohle**		**Einsatz der Ozon-Oxidation**	
Kosten	Menge	EP	GP	EP	GP	EP	GP
A) Investitionen							
Summe Investitionskosten:			**2.600.000 €**		**1.125.000 €**		**1.178.400 €**
B) Laufende Kosten							
Summe Laufende Kosten:			**694.000 €**		**418.000 €**		**584.000 €**
Aufbereitung der Kosten	**Umrechnungs-faktor *)**	**nominale Kosten [€ netto]**	**Barwert [€ netto]**	**nominale Kosten [€ netto]**	**Barwert [€ netto]**	**nominale Kosten [€ netto]**	**Barwert [€ netto]**
Investitionskosten IK							
Summe IK			**2.600.000 €**		**1.125.000 €**		**1.178.400 €**
Reinvestitionskosten RK							
Summe RK			**2.623.836 €**		**1.053.836 €**		**777.903 €**
Laufende Kosten LK:							
Summe LK			**22.574.504 €**		**13.698.477 €**		**19.656.772 €**
Projektkostenbarwert $PKBW_{DFAKE+DFAKR}$			**27.798.300 €**		**15.877.300 €**		**21.613.100 €**
Jahreskosten JK **KFAKR (3,0;30)**	**0,05102**		**1.418.200 €**		**810.000 €**		**1.102.700 €**

Im Ergebnis der Kostenvergleichsrechnung ist die GAK-Filteranlage mit Jahreskosten in Höhe von 1.418.200 €/a das teuerste Verfahren. Die Nutzung des bestehenden Actiflos als Actiflo®Carb mit einer zusätzlichen Pulveraktivkohledosierung weist mit 810.000 €/a die geringsten Jahreskosten auf. Die Jahreskosten der Ozonanlage liegen mit 1.102.700 €/a genau im Mittelfeld. Die detaillierten Kosten sind der Machbarkeitsstudie zu entnehmen.

3.4 Zusammenfassung der Ergebnisse der Studie

Betrachtet man die drei im Rahmen dieser Studie untersuchten Verfahren zur Elimination von Spurenstoffen und inertem Rest-CSB auf der Kläranlage Herford im Gesamten, so müssen zum einen die Jahreskosten, zum anderen aber auch die Betriebssicherheit, der Betriebsaufwand sowie die Eliminationsleistung der Verfahren berücksichtigt werden.

Der Einsatz von Pulveraktivkohle stellt bei wirtschaftlicher Betrachtung und dem Vergleich der ermittelten Jahreskosten die kostengünstigste Variante dar.

Die ermittelte Vorzugsvariante als Ergebnis der Machbarkeitsstudie ist eine PAK-Anlage in Form einer Actiflo®Carb Anlage. Diese kann unter Berücksichtigung der bestehenden Bausubstanz in die Kläranlage integriert werden.

Um diese gewonnenen Erkenntnisse der Studie zu verifizieren und zu untermauern, wurde die in Kapitel 5 beschriebene Pilotanlage geplant , die in den nachfolgenden Kapiteln ausführlich beschrieben wird und die Ergebnisse erläutert und diskutiert werden.

4 DAS ACTIFLO®CARB-VERFAHREN

Das Actiflo®Carb-Verfahren basiert auf dem Actiflo® -Verfahren und wurde hierauf aufbauend weiterentwickelt. Das Actilfo®Carb-Verfahren wurde ursprünglich für die Wasseraufbereitungsindustrie entwickelt und dient dazu organische Stoffe aus dem Wasser zu entfernen.

Das Actiflo®Carb Verfahren ist in Abbildung 4-1 dargestellt und wird nachfolgend erläutert.

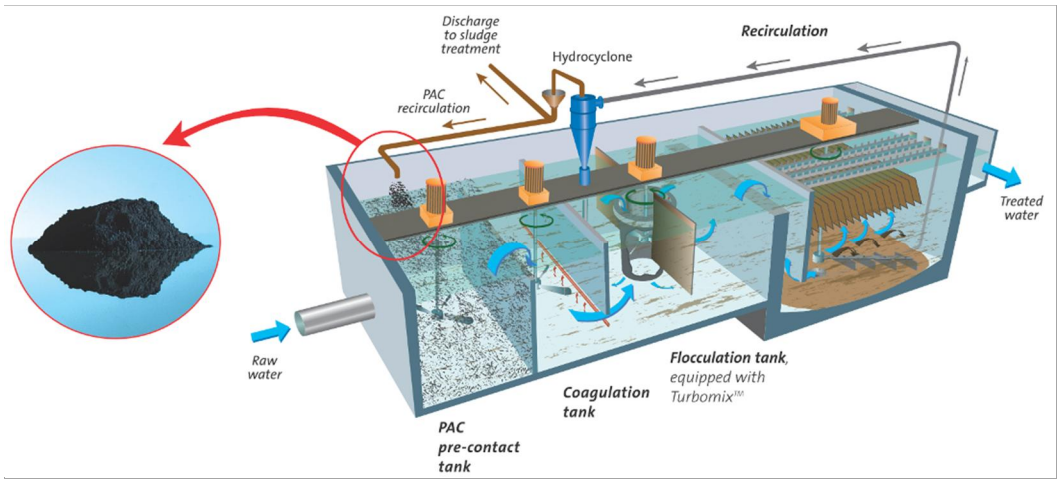

Abbildung 4-1: Verfahrensschema des Actiflo-Carb-Verfahrens [Quelle: Veolia Water Solutions & Technologies]

4.1 Vorkontaktbecken (PAC pre-contact tank)

In einem Vorkontaktbecken wird dem zu behandelnden Abwasser frische Pulveraktivkohle (PAK) als Suspension hinzugefügt und in Kontakt gebracht. Durch einen leistungsstarken Rührer kommt es zu einer Vermischung und somit zu einem verbesserten Kontakt und Stoffaustausch zwischen der Aktivkohle und den adsorbierbaren Abwasserinhaltsstoffen.

In das Vorkontaktbecken fließen sowohl die frische PAK als auch die teilweise vom nachgeschalteten Lamellenabscheider abgetrennte und vom Hydrozyklon zurückgeführte PAK (siehe auch Kapitel 4.4 / 4.5).

4.2 Koagulationsbecken (Coagulation tank)

Im an das Vorkontaktbecken anschließenden Koagulationsbecken wird ein Fällmittel wie zum Beispiel Eisen-(III)-Chloridsulfat ($FeClSO_4^-$) zugeführt. Hierdurch kommt es zur Koagulation, das heißt zur Flockenbildung.

Zur Erzielung einer längeren Wirk- bzw. Kontaktzeit kann das Fällmittel auch in den Zulauf vor dem Eintritt in das Vorkontaktbecken injiziert werden.

Durch die hohe Fließgeschwindigkeit im Rohr (statischer Mischer) findet dort bereits vorgelagert eine Vermischung statt, die im Vorkontaktbecken und im anschließenden Koagulationsbecken durch Rührer unterstützt wird.

4.3 Flockungsbecken mit eingebautem TURBOMIX™ (flocculation tank)

Im Flockungsbecken werden anschließend ein anionisches/kationisches Polymer sowie Mikrosand hinzugefügt. Dies führt zur Bildung von größeren und stabileren Flockenstrukturen. Durch den Einsatz eines langsam laufenden Rührapparates (TURBOMIX™) wird der Wirkungsgrad der Flockung verbessert (Abbildung 4-2).

Abbildung 4-2: TURBOMIX™ aus Pilotanlage

4.4 Absetzbecken/ Lamellenabscheider

Das Absetzbecken beinhaltet einen Abscheider, bestehend aus wabenförmigen, im 60° Winkel zueinanderstehenden Lamellen und wird im Aufstrom betrieben. Das behandelte Wasser aus dem Flockungsbecken durchfließt die Lamellen (siehe Abbildung 4-3) und wird über ein Zackenwehr abgeschieden.

Die sedimentierenden Flocken (koaguliertes Mikrosand-PAK-Gemisch) werden im Sumpf des Absetzbeckens entnommen und mithilfe einer Rezirkulationspumpe zu einem Hydrozyklon weitergeleitet.

Abbildung 4-3: Draufsicht auf Lamellenabscheider aus Pilotanlage (links), Klarwasserüberlauf mit Zackenwehr (rechts)

Das gereinigte Abwasser (treated water) wird dem Ablauf zur Vorflut zugegeben.

4.5 Hydrozyklon (hydrocyclon)

Im Hydrozyklon (siehe Abbildung 4-4), auch Fliehkraftabscheider genannt, wird das koagulierte Mikrosand-PAK-Gemisch durch Zugabe von filtriertem Betriebswasser voneinander getrennt. Während der Mikrosand, aufgrund des wesentlich schwereren spezifischen Gewichtes unten abgeschieden wird, wird die PAK über den Oberlauf des Hydrozyklons ausgetragen. Der Mikrosand wird anschließend wieder dem Flockungs-

becken (flocculation tank) zugeführt. Die PAK wird als Rezirkulat-Suspension in das Vorkontaktbecken (PAC pre-contact tank) zurückgeführt (siehe Abbildung 4-4)

Abbildung 4-4: Hydrozyklon aus Pilotanalge

4.6 PAK-Austrag (discharge sludge)

Der Austrag von beladener bzw. verbrauchter PAK erfolgt aus der PAK-Rezirkulationsleitung im Ablauf des Hydrozyklons. Im großtechnischen Anwendungsfall wird die beladene PAK entweder direkt oder über Zugabe in die biologische Reinigungsstufe und Abscheidung im Nachklärbecken gemeinsam mit dem Überschussschlamm der Schlammbehandlung zugeführt.

Abbildung 4-5: Schlammaustrag in Pilotanlage

Der Austrag des Schlamm-PAK-Gemisches ist aus verschiedenen Gründen notwendig:

1. Die PAK-Konzentration im Gesamtsystem bzw. im Vorkontaktbecken muss konstant gehalten werden, um ein konstantes Alter von 12 - 48 h bzw. eine konstante Beladung von 200 – 300 g_{CSB}/kg_{PAK} sicherzustellen.
2. Eine erhöhte PAK-Konzentration im Vorkontaktbecken von über 5 g/l sowie im Gesamtsystem muss vermieden werden, um ein Verstopfen der Lamellen im nachfolgenden Absetzbecken zu verhindern.

In Abhängigkeit der zudosierten PAK-Konzentration im Zulaufvolumenstrom erfolgt der Austrag an beladener PAK. Die Konzentration im Vorkontaktbecken sollte möglichst konstant zwischen 1 – 5 g/l gehalten werden.

5 DARSTELLUNG DER PILOTANLAGE (GESAMTANLAGE)

Im Nachfolgenden wird der Aufbau der gesamten Pilotanlage dargestellt. Diese besteht aus folgenden zugehörigen Systemkomponenten:

- Zulaufpumpstation inkl. Steuerung (Kapitel 5.1)
- Actiflo®Carb-Anlage (Kapitel 5.2)
- PAK-Anlage (Kapitel 5.3)
- Trommelfilter (Kapitel 5.4)

In Abbildung 5-1 ist das Fließschema der Pilotanlage dargestellt:

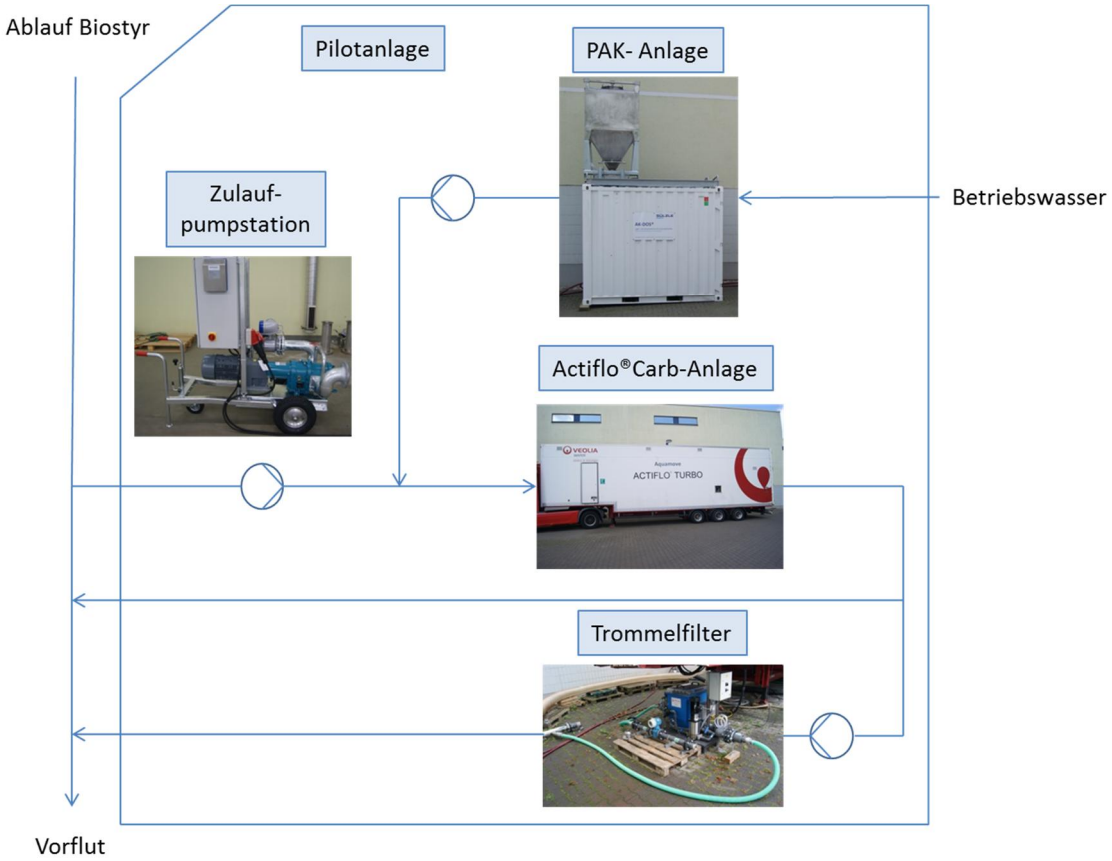

Abbildung 5-1: Fließschema der Pilotanlage

5.1 Zulaufpumpstation

Das in der Pilotierung zu behandelnde Wasser wird aus dem Ablaufgerinne (Ablauf Biostyr) mittels einer Pumpstation entnommen. Es handelt sich hierbei um eine Drehkolbenpumpe der Fa. Börger. Über eine FU-Steuerung kann die Pumpenleistung zwischen 20-50 m³/h frei gewählt und geregelt werden. Das so gepumpte Wasser fließt über eine Rohrleitung / Schlauch zum Vorkontaktbecken der Pilotanlage.

Abbildung 5-2: Zulaufpumpstation auf mobilen Rollwagen

5.2 Actiflo®Carb-Anlage

Die Actiflo®Carb-Anlage ist auf einem Trailer installiert, der auf dem Gelände der KA Herford aufgestellt wurde. Insgesamt hat der Trailer eine Länge von 13,65 m, eine Höhe von 4,51 m und eine Breite von 2,5 m. In nachfolgender Abbildung 5-3 ist der Trailer dargestellt:

Abbildung 5-3: Trailer der Actiflo®Carb-Anlage

Die Actiflo®Carb-Anlage ist bauseits mit den benötigten Anschlüssen versehen, um die nötigen Stoffströme zu- und abführen zu können.

Die möglichen Systemleistungen der Actiflo®Carb-Anlage sind in Tabelle 5-1 aufgelistet.

Tabelle 5-1: Systemleistungen der Actiflo®Carb-Anlage

Systemleistungen	Hydraulische Randbedingungen
Hydraulischer Durchsatz	20-125 m^3/h
Aufbereitungswassermenge (Trinkwasser)	< 80 m^3/h
Aufbereitungswassermenge (Abwasser)	20 - 40 m^3/h

In diesem Trailer sind folgende Anlagenkomponenten für das Actiflo®Carb-Verfahren eingebaut und angeschlossen.

- Vorkontaktbecken (Kapitel 4.1)
- Koagulationsbecken (Kapitel 4.2)
- Flockungsbecken mit Turbomix™ (Kapitel 4.3)
- Absetzbecken mit Lamellenklärer (Kapitel 4.4)
- Hydrozyklon zur Rückgewinnung des Mikrosandes (Kapitel 4.5)
- System zur Eindickung des Schlammes / ein Kontaktbecken für den Einsatz des Systems mit Aktivkohlepulver (Actiflo®Carb) oder als Wasserenthärtungsanlage (Acti Soft) (Kapitel 4.6)

Eine Verfahrensbeschreibung der einzelnen Anlagenkomponenten erfolgte in Kapitel 4.

Die einzelnen Behältervolumen des Actiflo®Carb-Anlage sind in Tabelle 5-2 dargestellt. Das Gesamtvolumen der Actiflo Pilotanlage umfasst 12,50 m³. Die Behältervolumina sind ausschlaggebend zur Ermittlung der Kontaktzeit in Abhängigkeit des Zulaufvolumenstroms. Eine Erläuterung der unterschiedlichen Versuchseinstellungen erfolgt in Kapitel 6.

Tabelle 5-2: Behältervolumen der Actiflo®Carb-Anlage

Behältervolumen Actiflo®Carb- Anlage	[m³]
Vorkontaktbecken	3,25
Koagulationsbecken	1,70
Flockungsbecken mit TURBOMIX™	4,00
Absetzbecken mit Lamellenklärer	3,55
Total	**12,50**

5.3 PAK-Anlage

Die Lagerung und die Dosierung der PAK erfolgt mit dem Dosiersystem AK-DOSxs der Firma Sülzle Kopf Anlagenbau GmbH. Das Dosiersystem ist integriert in einen Anlagencontainer (A) auf den ein Silo mit der PAK (B) aufgesetzt wird (siehe Abbildung 5-4).

Abbildung 5-4: Lager- und Dosiersystem AK-DOSxs für die PAK-Anlage

Das Edelstahlsilo hat ein Nutzvolumen von 1,50 m³ und verfügt über einen Auslaufkonus mit Druckluftschnellkupplungen zur Fluidisierung der PAK.

Das vollautomatische AK-DOS Dosiersystem der PAK ist auf nachfolgender Abbildung 5-5 dargestellt.

Abbildung 5-5: PAK-Dosiersystem AK-DOS

(1)	Vorlagerohr - Zulauf PAK aus PAK-Silo
(2)	Zellradschleuse
(3)	Vorlagerohr für Feindosierer
(4)	Absperrklappe mit Pneumatikantrieb
(5)	Feindosierer als tarakompensierter Hybrid-Trockengutdosierer mit Auflockerer
(6)	Hochpräzisionswaage
(7)	Dosierschnecke zum Vortex-Behälter
(8)	Vortex-Behälter
(9)	Druckerhöhungspumpe mit Einspüldisperser
(10)	Kompressor für Druckluft
(11)	Schalt- und Steueranlage mit Touchpanel „Easy-DOS“

Aus dem Vorlagerohr des PAK-Silos (1) kommend fließt eine durch die Zellradschleuse (2) bestimmte Menge an PAK aus dem Silo in das Vorlagerohr des Feindosierers (3). Durch Öffnen der pneumatischen Absperrklappe (4) gelangt die PAK weiter in den Feindosierer (5). Der Feindosierer besteht aus einem Umwälzwerk zum Auflockern der PAK und einer Dosierschnecke (7), die die PAK in den anschließenden VORTEX-Behälter (8) befördert. Dort wird die PAK mithilfe eines Einspüldispersers (9) mit Wasser vermischt und anschließend als Suspension in den Zulauf der Actiflo®Carb-Anlage gepumpt. Die Druckerhöhungspumpe (9) sorgt für einen konstanten Druckverlauf. Mithilfe des Kompressors (10) wird in regelmäßigen Abständen Druckluft in den Auslaufkonus des Silos geblasen, damit die PAK fluidisiert wird.

Das ganze System läuft vollautomatisch und kontinuierlich. Für eine gleichbleibende präzise Dosierung an PAK ist eine Hochpräzisionswaage (6) notwendig.

5.4 Trommelfilter

Der Pilotanlage wird der Trommelfilter HDF501-1FP (siehe Abbildung 5-6) der Firma Hydrotech nachgeschaltet.

Abbildung 5-6: Trommelfilter HDF501-1FP der Firma Hydrotech

Er dient zur Abtrennung der im Ablauf der Pilotanlage möglicherweise befindlichen PAK sowie anderer Feststoffe. Der Einsatz des Trommelfilters soll den Austrag der mit Mikroschadstoffen beladenen PAK in die Oberflächengewässer verhindern bzw. minimieren.

Abbildung 5-7: Spritzdüsen zur Selbstreinigung der Filterfläche

Der Trommelfilter besitzt eine Filterfläche von 0,35 m². Die Porenweite beträgt 10 µm. Zur Selbstreinigung der Filterfläche sind Spritzdüsen vorgesehen (siehe Abbildung 5-7). Für die Spülung der Filterfläche wird ein Druck zwischen 7 und 8 bar benötigt.

5.4.1 Funktionsprinzip der Filtration und Anwendung

Das Funktionsprinzip zur Filtration des Wassers mithilfe des Trommelfilters ist in Abbildung 5-8 dargestellt:

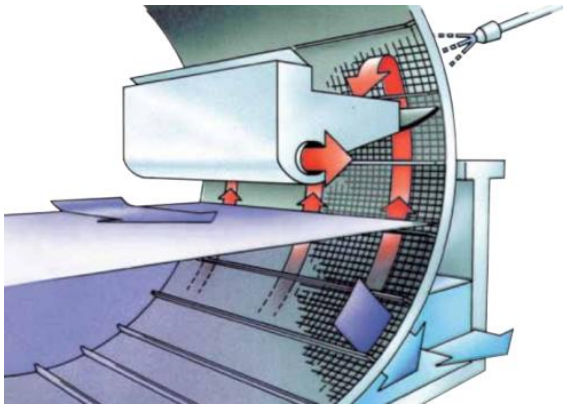

Abbildung 5-8: Funktionsprinzip eines Trommelfilters [Quelle: http://www.water-proved.de/de/Downloads/Hydroetch_Downloads/Brochure-HDF-DE-080415.pdf]

Das Wasser aus dem Ablauf der Pilotanlage wird durch einen Schlauch dem Trommelfilter zugeführt und trifft dort auf die Filteroberfläche der drehenden Trommel. Die Feststoffpartikel im Wasser, die eine Porengröße von > 10 µm aufweisen, werden zurückgehalten. Die zurückgehaltenen Feststoffe werden durch Spritzdüsen von der Filterfläche in einen separaten Feststoff-Spülwasserkanal gespült und entsorgt. Durch die spezielle Bauweise der Filteroberfläche des Trommelfilters wird ein Abreiben der Partikel an der Trommel verhindert und dadurch eine bestmögliche Filterleistung erreicht.

6 VERSUCHSDURCHFÜHRUNG

Auf der Kläranlage Herford wurden im Zeitraum vom 06.07.2015 bis zum 09.08.2015 Versuche mit der Pilotanlage durchgeführt. Die Pilotanlage ist in Kapitel 5 beschrieben.

In diesem Zeitraum wurden vier unterschiedliche Betriebsweisen mit der Pilotanlage gefahren und Wasserproben im Zulauf und im Ablauf der Pilotanlage für die Analytik genommen. Zusätzlich wurden zur Bilanzierung von Pulveraktivkohlemengen im System bzw. Aktivkohlealter Proben aus dem Vorkontaktbecken und dem Rückführungssystem entnommen.

Nachfolgend wird der Aufbau des Versuchsprogramms (Kapitel 6.1), die Probenahme und Auswertung (Kapitel 6.2), sowie das Mess- und Analyseprogramm (Kapitel 6.3) erläutert.

6.1 Versuchsprogramm und Versuchseinstellungen

In Abstimmung mit dem Betriebspersonal der Herforder Abwasser GmbH und den Lieferanten der einzelnen Verfahrenskomponenten wurden vier Versuchseinstellungen ausgearbeitet. Dabei wurde jede Einstellung über einen Zeitraum von mindestens 5 Tagen gefahren. Das Versuchsprogramm für die Actiflo®Carb-Anlage ist in folgender Tabelle 6-1 dargestellt.

Tabelle 6-1: Versuchsprogramm der Actiflo®Carb-Anlage

Versuchs-reihe	Zeitraum	Zeit-dauer	Zulauf-strom	Verweilzeit	PAK-Dosierung	FHM-Dosierung	$FeClSO_4$-Dosierung
		[d]	[m³/h]	[min]	[mg/l]	[mg/l]	[mg/l]
1	06.07 - 14.07.15	9	25	30	50	1,2	12
2	23.07. - 29.07.15	7	25	30	15	0,8	6
3	31.07. - 04.08.15	5	40	19	15	0,8	6
4	05.08. - 09.08.15	5	40	19	50	1,2	12

Die vier verschiedenen Versuchseinstellungen resultieren weitestgehend aus der vorangegangen Machbarkeitsstudie sowie den spezifischen Randbedingungen der Kläranlage Herford.

Die Wahl der Zulaufmenge (25 bzw. 40 m³/h) ergab sich aus der Vorgabe der hydraulischen Belastungsgrenzen der Actiflo®Carb-Anlage und der angestrebten Verweilzeit der PAK im System.

Laut „Anleitung zur Planung und Dimensionierung von Anlagen zur Mikroschadstoffelimination“ (März, 2015) durch das Kompetenzzentrum für Mikroschadstoffe.NRW wird eine Verweilzeit des zu behandelnden Abwassers von etwa 30 min angestrebt. Um diese Verweilzeit zu erreichen, muss bei einem Gesamtvolumen der Pilotanlage von 12,5 m³ (siehe Tabelle 5-2) der Zulaufstrom auf 25 m³/h eingestellt werden. Dieser Volumenstrom ist in den Versuchsreihen 1 und 2 umgesetzt.

Die maximale hydraulische Belastung der Pilotanlage beträgt nach Herstellervorgaben 40 m³/h. Dieser Zulaufstrom wurde für die Versuchsreihen 3 und 4 verwendet. Dadurch ergibt sich eine Verweilzeit der PAK im System von 19 Minuten.

Die PAK-Dosiermenge wurde innerhalb der vorangegangenen Studie mit einer Spannweite von 15 - 50 mg/l ermittelt. Dabei wurden die 15 mg/l maßgebend für die Eliminierung von Spurenstoffen und die 50 mg/l für die Eliminierung von inertem Rest-CSB angesetzt. Die zu untersuchenden Spurenstoffe werden nachfolgend in Tabelle 6-4 dargestellt.

Die im Rahmen der Studie ermittelte bestgeeignete PAK (Jacobi Adsorb 5000P) war zum Zeitpunkt der Pilotierung nicht mehr verfügbar. Daher wurde das Produkt Aqua-Sorb™ MP23 eingesetzt, dass laut Herstellerangaben ähnliche Eigenschaften aufweist und vergleichbare Eliminationsleistungen erzielt.

Im Vorfeld der Pilotversuche wurden sogenannte JAR-Tests durchgeführt. Diese dienen dazu die Art und Menge der einzusetzenden Fäll- und Flockungshilfsmittel (FM, FHM) zu ermitteln, um die bestmögliche Flockenstruktur in Abhängigkeit der Abwasserzusammensetzung zu erhalten. Die Auswertung dieser Tests ergab, dass die besten Ergebnisse bei Verwendung von $FeCISO_4$ (FM) und Magnafloc LT25 von der Firma BASF (FHM) erreichbar sind.

Während der Inbetriebnahme der Pilotanlage wurden diese Tests wiederholt und bestätigten die vorangegangenen Untersuchungen. Während der Pilotversuche wurden die Dosiermengen des ermittelten Flockungshilfsmittels bzw. Fällmittels auf die jeweilige tagesabhängige Abwasserzusammensetzung angepasst. Die Dosiermengen für FM lagen zwischen 6 – 12 mg/l, die Dosiermenge des FHM lag zwischen 0,8 -1,2 mg/l.

In Abbildung 6-1 ist der Versuchsaufbau zur Durchführung der JAR-Tests während der Inbetriebnahme der Pilotanlage zur Optimierung der Dosiermengen an FM und FHM dargestellt.

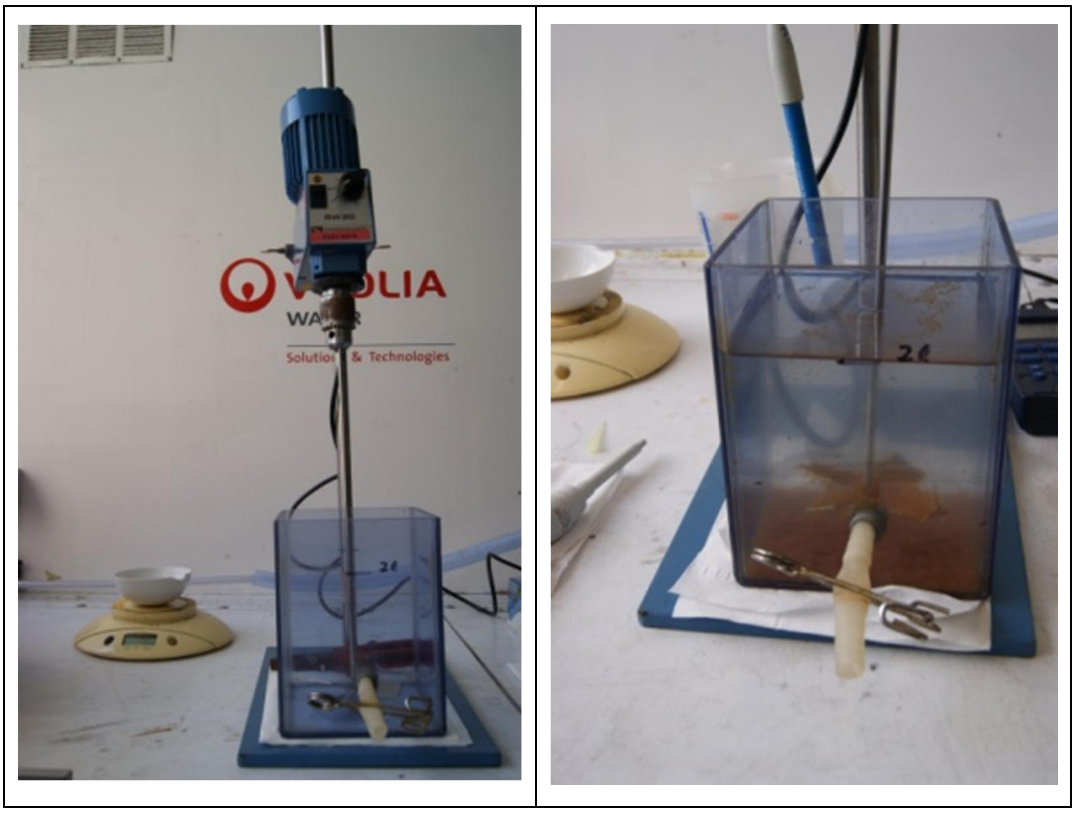

Abbildung 6-1: Darstellung des Versuchaufbaus des JAR-Tests während der Inbetriebnahme der Pilotanlage zur Optimierung der Dosiermenge an FM und FHM

Die angestrebte Konzentration von Pulveraktivkohle im Vorkontaktbecken wird vom Anlagenlieferanten mit < 5 g/l angegeben, um die Anlagentechnik störungsfrei betreiben zu können. Laut „Anleitung zur Planung und Dimensionierung von Anlagen zur Mikroschadstoffelimination“ (März 2015) wird ein Trockensubstanzgehalt im Vorkontaktbecken an PAK von 4 g/l angegeben. Bei den Pilotversuchen wurde eine PAK-Konzentration zwischen 1,5 – 2,5 g/l angestrebt.

Da eine automatisierte und kontinuierliche PAK-Entnahme aus dem System nicht umsetzbar war, musste die PAK-Entnahme manuell mehrfach täglich erfolgen (Kapitel 6.2.1). Hierdurch wird in Kauf genommen, dass die PAK-Konzentration zwischen 1,0 und 3,5 g/l schwankte.

Von Seiten des Anlagenlieferanten wurde empfohlen Mikrosand vom Typ GA-39 der Firma Sibelco zu verwenden. Der Mikrosand dient zur Verbesserung der Abscheidungsleistung von Flockenstrukturen im Absetzbecken. Zur Inbetriebnahme der Pilotanlage wurde der Mikrosand dem System in den Flockulationstank zugegeben. Laut Anlagenlieferant wird eine Konzentration an Mikrosand von >5 kg/m³ vorgegeben. Der im Lamellenklärer abgeschiedene Mikrosand wird im Hydrozyklon von der Flocke getrennt und zurück in den Flockulationstank zurückgeführt. Im Verlauf der Pilotierung wurde je nach Versuchsreihe eine Mikrosandkonzentration zwischen 5 und 13 kg/m³ gemessen.

Die Rezirkulationsrate wird vom Anlagenlieferanten mit 6-17 % des Abwasserzuflusses angegeben. Aufgrund der anlagenspezifischen Randbedingungen wurde während der Versuchsdurchführung die Rezirkulationsmenge auf 8 m³/h festgelegt. Dies führte abhängig vom Zulaufvolumenstrom zu einer Rezirkulationsrate 32% (Versuchsreihe 1 und 2) bzw. 20 % (Versuchsreihe 3 und 4).

Die Aufstromgeschwindigkeit im Lamellenklärer wird mit 30-80 m/h angegeben und beträgt im Versuchsaufbau abhängig von der betrachteten Versuchsreihe 25 bzw. 40 m/h. Die Abscheiderfläche ist vom Anlagenlieferanten mit 1 m² vorgegeben.

6.2 Probenahme

6.2.1 Probenahmestellen

Die Durchführung der Probenahme erfolgte an verschiedenen Stellen der Actiflo®Carb-Anlage bzw. des Trommelfilters:

Zulauf Pilotanlage: Die Probenahme erfolgte aus dem Ablaufgerinne des Biostyr und entspricht dem Ablauf der KA Herford.

Ablauf Pilotanlage: Die Probenahme erfolgte aus dem Ablaufgerinne des Lamellenkläres nach dem Zackenwehr.

Ablauf Trommelfilter: Die Probenahme erfolgte im Ablauf des Trommelfilters.

Eine Probenahme im Zulauf des Trommelfilters erfolgte nicht, da diese dem Ablauf der Pilotanlage entspricht.

Zur Bestimmung der Konzentration an PAK im Vorkontaktbecken wurden mehrmals täglich Proben direkt aus dem Vorkontaktbecken gezogen. Die Bestimmung der PAK-Konzentration erfolgte anhand der Analytik für abfiltrierbare Stoffe (AFS) und wurde vereinfachend dieser gleichgesetzt. Die Durchführung der Analytik der abfiltrierbaren Stoffe wird in Kapitel 7.8 beschrieben.

Die Ausschleusung der beladenen bzw. verbrauchten PAK aus der Actiflo®Carb-Anlage erfolgte durch manuelles Schließen einer Klappe im Rücklauf des Hydrozyklons zum Vorkontaktbecken.

Aus dem Rücklauf des Hydrozyklons zum Vorkontaktbecken wurde ebenfalls mehrmals täglichen Proben zur Bestimmung der PAK-Konzentration entnommen, um eine Bilanzierung der auszuschleusenden PAK-Menge vornehmen zu können. Die ausgeschleuste PAK wurde über das Kanalsystem in das Zulaufgerinne der KA Herford abgeleitet.

6.2.2 Durchführung der Probenahme

Da ein automatischer mengenproportionaler Probenehmer nicht zur Verfügung stand, erfolgte die Durchführung der Probenahme fünfmal pro Tag zu festen Uhrzeiten an den in Kapitel 6.2.1 dargestellten Stellen.

Hierzu wurden an jeder Probenahmestelle mit Hilfe von 1-Liter PE-Flaschen insgesamt jeweils 3 Liter Wasserproben entnommen. Die einzelnen Proben wurden in Abhängigkeit der Probenahmestelle unterschiedlich behandelt:

Zulauf Pilotanlage: Die Probe wurde unmittelbar nach Entnahme in einen Sammelbehälter für Tagesmischproben umgefüllt und kühl gelagert.

Ablauf Pilotanlage: Ein Teil der Probe wurde unmittelbar nach Entnahme in einen Sammelbehälter für Tagesmischproben umgefüllt und kühl gelagert.

Zusätzlich wurde ein Teil der Probe zur Bestimmung der Parameter Mikroschadstoffe und CSB-gelöst direkt nach der Probennahme filtriert und nachfolgend in einem Sammelbehälter für Tagesmischproben kühl gelagert.

Ablauf Trommelfilter: Die Probe wurde unmittelbar nach Entnahme in einen Sammelbehälter für Tagesmischproben umgefüllt und kühl gelagert.

Um ungewollte Adsorbtionsvorgänge für die Zeit zwischen Probenahme, Lagerung und Analytik zu vermeiden, wurde die Probe aus dem Ablauf der Pilotanlage direkt filtriert. Dieses geschieht vor dem Hintergrund, dass möglicherweise PAK aus dem System abgetrieben wird. Somit ist sichergestellt, dass die eigentliche Kontaktzeit der PAK mit den Abwasserinhaltsstoffen nur innerhalb der Actiflo®Carb-Anlage stattfindet.

Die weitergehende Probenaufbereitung und Analytik erfolgt mit den zuvor dargestellten Tagesmischproben.

In Kapitel 6.3 und 6.4 wird das Mess- und Analyseprogramm sowie die Probenaufbereitung zur Durchführung der Analytik erläutert.

6.3 Mess- und Analyseprogramm

Die Analytik erfolgte anhand einer Tagesmischprobe im Labor der KA Herford (Eigenanalytik) bzw. durch ein zugelassenes externes Labor.

Die **Eigenanalytik** wurde zur täglichen Überprüfung und Bilanzierung der Versuchseinstellungen durchgeführt und um tagesaktuell auf Schwankungen in der Abwasserzusammensetzung reagieren zu können.

In Tabelle 6-2 sind die im Rahmen der Eigenanalytik untersuchten Parameter in Abhängigkeit von der Probenahmestelle dargestellt.

Tabelle 6-2: untersuchte Parameter: Eigenanalytik

Parameter	Zulauf	Ablauf	Trommelfilter
Gesamt-CSB (CSB)	x	x	x
Gelöster CSB (S_{CSB})	x	x	x
Abfiltrierbare Stoffe (AFS)	x	x	x
Trübung	x	x	-
pH-Wert	x	x	-

Die Analytik der Mikroschadstoffe sowie des Schwarzgrades erfolgte ausschließlich durch ein externes Labor. Zur Überprüfung der Eigenanalytik des CSB und der abfiltrierbaren Stoffe erfolgte eine Analyse dieser Parameter ebenfalls im externen Labor.

In Tabelle 6-3 sind die untersuchten Parameter des externen Labors in Abhängigkeit der Probenahmestelle dargestellt.

Tabelle 6-3: untersuchte Parameter: externes Labor

Parameter	Zulauf	Ablauf	Trommelfilter
Gesamt-CSB	x	x	-
Gelöster CSB	x	x	-
Abfiltrierbare Stoffe (AFS)	x	x	-
Schwarzgrad	x	x	-
Mikroschadstoffe	x	x	-

Die nachfolgende Tabelle 6-4 stellt eine Übersicht dar, auf welche Mikroschadstoffe die Wasserproben durch das externe Labor untersucht wurden. Die Analyse auf Mikroschadstoffe erfolgte sowohl im Zulauf als auch im Ablauf der Pilotanlage, um die Eliminationsleistung ermitteln zu können. Die rechte Spalte zeigt die angewendeten Mess- und Analysemethoden zur Ermittlung der Mikroschadstoffe. Hier wird von der der Vorgehensweise des Kompetenzzentrums für Mikroschadstoffe abgewichen, wonach die Eliminationsleistungen zwischen Zulauf Biologie und Ablauf 4. Reinigungsstufe ermittelt werden (siehe Kapitel 7)

Tabelle 6-4: Untersuchte Mikoschadstoffe inkl. zugehöriger Stoffgruppe

Stoffgruppe	Parameter	Einheit	Methode
Industrie-Chemikalien	Benzotriazol	µg/l	LC/MS/MS
	Terbutryn	µg/l	LC/MS/MS
	Diuron	µg/l	LC/MS/MS
	Isoproturon	µg/l	LC/MS/MS
Röntgenkontrastmittel	Diatrizoat (Amidotrizoat)	µg/l	LC/MS/MS
	Iomeprol	µg/l	LC/MS/MS
	Iopamidol	µg/l	LC/MS/MS
	Iopromid	µg/l	LC/MS/MS
Schmerzmittel	Diclofenac	µg/l	SPE (sauer) / Derivatisierung / GC/MS
	Naproxen	µg/l	SPE (sauer) / Derivatisierung / GC/MS
	Phenazon	µg/l	LC/MS/MS
Verhütungsmittel ("Anti-baby-Pille")	17-alpha-Ethinylestradiol	µg/l	SPE, LC/MS/MS
	17-beta-Estradiol	µg/l	SPE, LC/MS/MS
	Estron	µg/l	SPE, LC/MS/MS
Antibiotika	Clarithromycin	µg/l	LC/MS/MS
	Sulfamethoxazol	µg/l	LC/MS/MS
Antiepileptika	Carbamazepin	µg/l	LC/MS/MS
Psychopharmaka	Diazepam	µg/l	LC/MS/MS
	Oxazepam	µg/l	LC/MS/MS
Betablocker	Metoprolol	µg/l	LC/MS/MS
	Atenolol	µg/l	LC/MS/MS
	Bisoprolol	µg/l	LC/MS/MS
	Sotalol	µg/l	LC/MS/MS
Lipidsenker	Bezafibrat	µg/l	SPE (sauer) / Derivatisierung / GC/MS

Die Probenaufbereitung zur Durchführung der Analytik der vorgenannten Parameter sowie die angewendeten Mess- und Analyseverfahren werden im nachfolgenden Kapitel kurz beschrieben.

6.4 Probenaufbereitung und Analytik

Die Durchführung der Probenaufbereitung zur Analytik der im Kapitel 6.3 dargestellten Parameter und die dafür erforderlichen Geräte und Materialien werden im Folgenden dargestellt und erläutert.

Zunächst werden die ungefilterten Tagesmischproben durch Schütteln homogenisiert. Dieses ist zwingend notwendig, um die sedimentierten Inhaltsstoffe in der Wasserprobe zu vergleichmäßigen. Die Proben werden anschließend in ein Becherglas umgefüllt und für mindestens 30 bis 45 Sekunden mit Hilfe eines Magnetrührers homogenisiert. Aus

dieser volldurchmischten Vorlage wird das entsprechende Probevolumen zur Durchführung der Analytik entnommen.

Die durchzuführenden Analysen aus der unfiltrierten Tagesmischprobe sind nachfolgend dargestellt:

- Gesamt-CSB (C_{CSB})
- pH-Wert
- Trübung
- AFS
- Schwarzgrad

Für die Bestimmung folgender Parameter ist eine Filtration notwendig

- Mikroschadstoffe
- Gelöster CSB (S_{CSB})

Nachfolgend ist die Durchführung der Filtration beschrieben.

6.4.1 Filtration

Zur Analyse der Parameter Mikroschadstoffe und gelöster CSB (S_{CSB}) ist eine Aufbereitung durch eine Filtration notwendig. Der Aufbau des Filtrationsgerätes ist in Abbildung 6-3 dargestellt. Die Durchführung der Filtatrion wird nachfolgend beschrieben.

Abbildung 6-2 Filtrierstation mit Edelstahl-Filtrationsgerät

Der Aufbau des Filtrationsgeräts ist in Abbildung 6-3 dargestellt und besitzt ein Volumen von 200 ml. Mithilfe von Druckluft (2- 4 bar) wird die Abwasserprobe durch den Filter gepresst. Der Filter besteht aus einem Grobfilter mit einer Porenweite von < 1 µm und einem Feinfilter (0,45 µm).

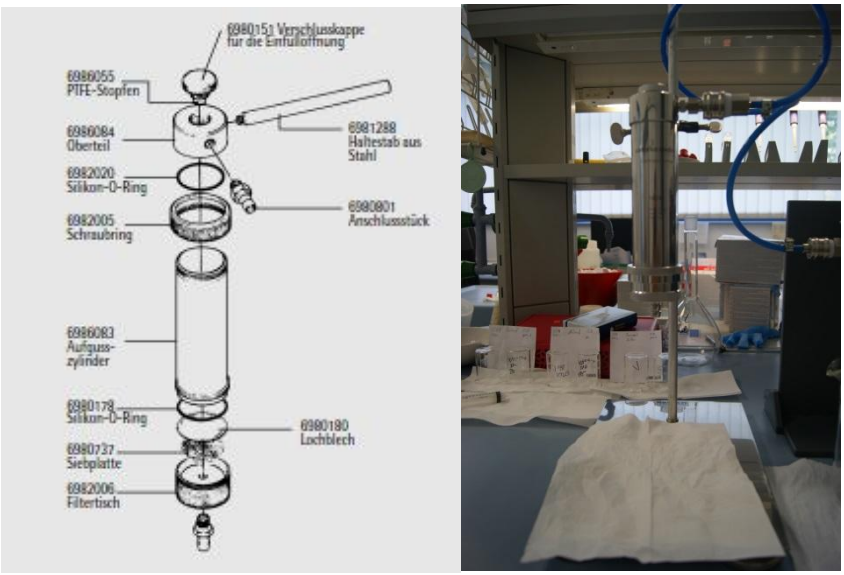

Abbildung 6-3: Aufbau Filtrationsgerät

In Abhängigkeit des Probenvolumens muss der Filtriervorgang mehrfach durchgeführt werden.

6.4.2 Chemischer Sauerstoffbedarf (CSB)

Der CSB wird sowohl in Eigenanalytik als auch durch ein externes Labor bestimmt.

Eigenanalytik

Die CSB-Analytik im Labor der Kläranlage Herford wird mithilfe des HACH-Lange-Küvetten-Tests durchgeführt und ist in nachfolgender Abbildung 6-4 dargestellt.

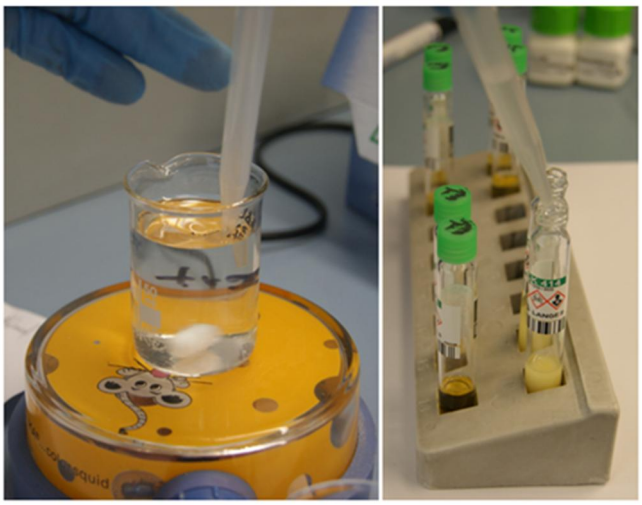

Abbildung 6-4: Darstellung Küvetten-Test

Sie beruht auf der Standard-Methode und dem der Norm entsprechenden Reaktionsprinzip. Die Unterschiede zum Norm-Verfahren bestehen in den deutlich geringeren Proben- und Reagenzienmengen und der Auswertung mit einem Photometer. Die jahrelange Betriebsanalytik auf der Kläranlage mit dem HACH-Lange-Küvetten-Test hat ergeben, dass diese mit den Normergebnissen sehr gut vergleichbar sind.

Externes Labor

Die abwassertechnischen Untersuchungen auf die Parameter Gesamt-CSB (C_{CSB}) und gelöster-CSB (S_{CSB}) erfolgen durch das externe Labor ebenfalls mittels Küvetten-Tests der Firma HACH-Lange GmbH, Düsseldorf.

6.4.3 Abfiltrierbare Stoffe (AFS)

Abfiltrierbare Stoffe (im Folgenden nur noch mit AFS abgekürzt) sind laut DIN 38409 Teil 2 „die volumenbezogene Masse der im Wasser enthaltenen ungelösten Stoffe, die unter bestimmten Bedingungen abfiltriert und im Anschluss an ein festgelegtes Trocknungsverfahren ausgewogen werden.“ Zu diesen ungelösten Stoffen zählen Sink-, Schwimm- und Schwebstoffe deren Zusammensetzung organisch und anorganisch ist. Die Angabe der AFS erfolgt in der Einheit Milligramm pro Liter [mg/l] und die AFS werden auf das Volumen der eingesetzten Wasserprobe bezogen.

Die Durchführung sowie die Auswertung erfolgt gemäß DIN 38409 Teil 2. Die Messung der AFS wurde in den im Kapitel 6.2.1 erläuterten Proben untersucht.

Der Zulauf der Pilotanlage entspricht dem Ablauf der Kläranlage Herford und weist gemäß der Betriebsdaten der KA Herford nur eine geringe Konzentration an AFS wie z.B. Flockenabtrieb der biologischen Stufe auf. Daher wird davon ausgegangen, dass die AFS im Ablauf der Pilotanlage auf den Abtrieb von PAK aus der Actiflo®Carb-Anlage zurückzuführen ist. Eine Bilanzierung der AFS erfolgt über die Auswertung von Zulauf und Ablauf der Pilotanlage. Aufgrund einer vereinfachten Analytik wurde die AFS Konzentration der PAK-Konzentration gleichgesetzt.

Die AFS-Bestimmung im Vorkontaktbecken sowie im Rücklauf des Hydrozyklons dient zur Kontrolle der PAK-Konzentration im System, sowie der Bilanzierung zur Ausschleusungsrate der verbrauchten PAK.

Beispielproben für die AFS im Vorkontaktbecken sowie im Rücklauf des Hydrozyklons zur PAK-Konzentrations-Bestimmung zeigt Abbildung 6-5.

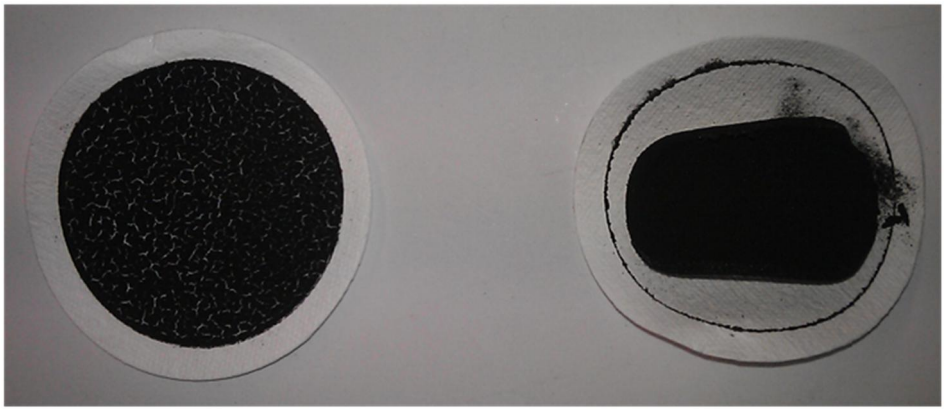

Abbildung 6-5: Proben aus Kontakttank (links) und Rücklauf (rechts)

6.4.4 Messung Trübung

Für die Bestimmung der Trübung wird das in Abbildung 6-6 dargestellte Trübungsmessgerät 2100N der Firma HACH Lange eingesetzt. Das Gerät erfüllt nach der EPA-Methode 180.1 die Norm.

Abbildung 6-6 Trübungsmessgerät 2100N der Firma HACH Lange

6.4.5 Messung pH-Wert

Der pH-Wert der Wasserproben wurde mit dem Multimeter Multiline P4 (Abbildung 6-7) der Firma WTW ermittelt.

Abbildung 6-7: Multimeter Multiline P4

6.4.6 Schwarzgrad

Die Beurteilungen der weitergehenden Feststoff- bzw. Pulveraktivkohleabtrennung wird anhand der Schwarzgradbestimmung durchgeführt. Dabei werden Abwasserproben über einen Membranfilter filtriert und die Schwarzfärbung des Filters durch Vergleich mit vorab definierten Filterpapieren ermittelt. Die Analytik wird durch ein externes Labor durchgeführt.

6.4.7 Mikroschadstoffe

Die Analytik der Mikroschadstoffe erfolgt wie in Kapitel 6.3 dargestellt im Zulauf und Ablauf der Pilotanlage. Hierzu werden die Proben wie in Kapitel 6.4.1 erläutert vorbereitet. Die Analytik erfolgt durch ein externes Labor. Die Analyseverfahren sind nachfolgend beschrieben:

Flüssigchromatographie mit Massenspektrometrie-Kopplung (LC/MS/MS)

Die Liquid-Chromatographie-Massenspektometrie / Massenspektometrie (LC-MS/MS) ist ein analytisches Verfahren zur Identifizierung und Quantifizierung von wasserlöslichen Mikroschadstoffen in den Anwendungsbereichen der Industrie-Chemikalien (bspw. Benzotriazol), der Röntgenkontrastmittel (bspw. Iomeprol) aber auch der Arzneimittel wie Antibiotika (bspw. Iopromid) oder Betablocker (bspw. Metoprolol). Das Verfahren basiert auf einer Verknüpfung der Flüssigkeitschromatographie (LC) mit einer nachgeschalteten Doppel-Massenspektrometrie (MS/MS). Dabei werden die Moleküle durch die Flüssigkeitschromatographie aufgetrennt und durch die anschließende Massenspektrometrie identifiziert und quantifiziert.

Gaschromatographie mit Massenspektrometrie-Kopplung (GC/MS)

Mithilfe des Analyseverfahrens aus der Kopplung von Gaschromatographie mit anschließender Massenspektrometrie können Spurenstoffe aus den Anwendungsbereichen der Arzneimittel wie beispielsweise Schmerzmittel (Diclofenac) oder Lipidsenker (Bezafibrat) ermittelt werden. Die zu untersuchenden Mikroschadstoffe werden durch den Gaschromatographen aufgetrennt und es folgt die Identifizierung und Quantifizierung der verschiedenen Moleküle durch das Massenspektrometer.

Bei den oben genannten Arzneimitteln (Diclofenac, Bezafibrat) handelt es sich um schwer verdampfbare oder leicht zersetzliche Substanzen. Für die Erfassung im Gaschromatographen ist eine vorherige Derivatisierung der Mikroschadstoffe erforderlich.

7 VERSUCHSERGEBNISSE

Im folgenden Kapitel werden die Versuchsergebnisse der Pilotanlage dargestellt, ausgewertet und anschließend analysiert. Die Übersicht der vier unterschiedlichen Versuchseinstellungen während des Untersuchungszeitraumes befinden sich in Tabelle 6-1.

7.1 Pulveraktivkohle

Im nachfolgenden werden die Randparameter hinsichtlich der Pulveraktivkohle näher betrachtet.

7.1.1 PAK-Konzentration im Vorkontaktbecken

Nachfolgend wird in Abbildung 7-1 die Sollkonzentration an PAK im Vorkontaktbecken der gemessenen Konzentration im Versuchszeitraum gegenübergestellt.

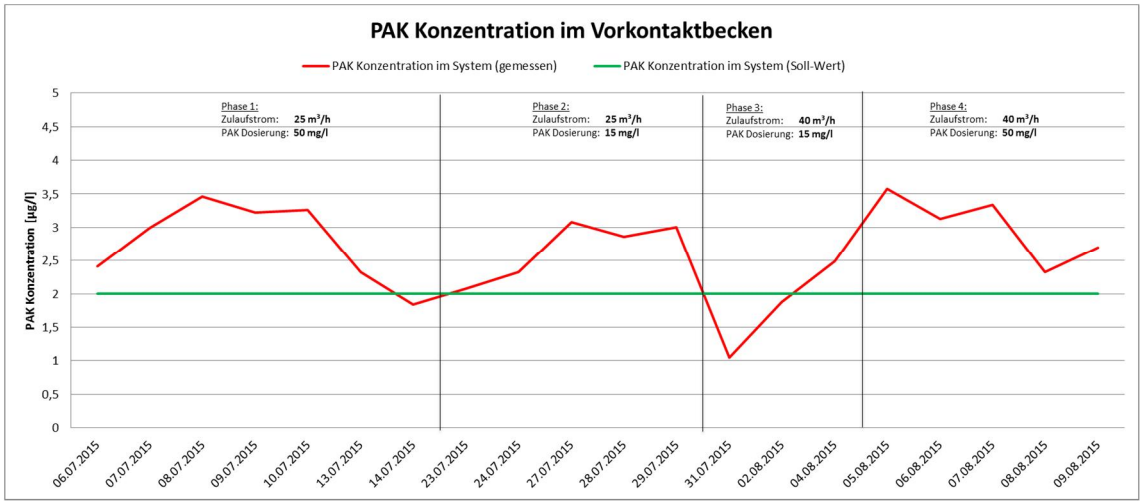

Abbildung 7-1: PAK-Konzentration

Die grüne Linie zeigt die PAK-Konzentration, die im Vorkontaktbecken angestrebt wurde. Diese war mit 2 g/l (1,5 – 2,5 g/l) veranschlagt. Die rote Linie stellt die im Vorkontaktbecken gemessene PAK-Konzentration über die vier unterschiedlichen Versuchseinstellungen dar. Diese schwankte im Versuchszeitraum zwischen 1,0 und 3,5 g/l.

Der in Abbildung 7-1 erkennbare wellenförmige Verlauf der gemessenen PAK-Konzentration ist durch das manuelle und diskontinuierliche Ausschleusen begründet. Die Durchführung der Ausschleusung wurde bereits in Kapitel 6.1 dargestellt. Für die Betrachtung des PAK-Alters wird vereinfachend eine PAK-Konzentration von 2 kg/m³ angenommen.

7.1.2 PAK-Kontaktzeit

Aufgrund des kontinuierlichen Zulaufvolumenstroms von 25 bzw. 40 m³/h und dem Gesamtvolumen der Actiflo®Carb-Anlage von 12,5 m³ wird vereinfachend angenommen, dass die Kontaktzeit der Verweilzeit entspricht und während der Versuchsphasen 1 und 2 ca. 30 min und für die Versuchsphase 3 und 4 ca. 19 min beträgt. Die Versuchseinstellungen sind in Tabelle 6-1 erläutert.

7.1.3 PAK-Alter

Die Bestimmung des PAK-Alters basiert auf den folgenden Parametern.

Das Gesamtvolumen der Actiflo®Carb-Anlage beträgt 12,5 m³. Die angestrebte PAK-Konzentration im System wurde mit 2 kg/m³ festgelegt. Daraus ergibt eine Gesamtmenge an PAK von 25 kg im System.

In den Versuchsphasen 1 und 4 wurde dem zufließenden Abwasser der Actiflo®Carb-Anlage 50 mg/l an PAK zugegeben. Bei einem zufließenden Volumenstrom von 25 bzw. 40 m³/h errechnet sich darauf ein PAK-Alter von 20 bzw. 12,5 h.

In den Versuchsphasen 2 und 3 wurde dem zufließenden Abwasser der Actiflo®Carb-Anlage 15 mg/l an PAK zudosiert. Bei dem zufließenden Volumenstrom von 25 bzw. 40 m³/h errechnet sich das PAK-Alter zu 67 bzw. 42 h.

Die dargestellten PAK-Alter in den verschiedenen Versuchseinstellungen entsprechen somit den Herstellerangaben von Veolia von 12 bis 48 h. Lediglich in der Versuchsphase 2 ist das PAK-Alter mit 67 h erhöht.

In der nachfolgenden Tabelle 7-1 sind die Kenngrößen zur Bestimmung des PAK-Alters dargestellt:

Tabelle 7-1: Ermittlung PAK-Alter

	PAK	PAK	PAK Alter
	mg/l	kg/h	h
Versuchs-phase 1	50.00	1.25	20.00
Versuchs-phase 2	15.00	0.38	67.00
Versuchs-phase 3	15.00	0.60	42.00
Versuchs-phase 4	50.00	2.00	12.50

7.1.4 PAK-Beladung

Die PAK-Beladung [kg_{CSB}/kg_{PAK}] ermittelt sich aus der täglichen eliminierten CSB Fracht in Abhängigkeit der täglich zum System zugegebenen PAK-Menge und ist in nachfolgender Tabelle 7-2 dargestellt. Eine detaillierte Betrachtung der CSB Eliminationsleistung erfolgt in Kapitel 7.8.1. In diesem Kapitel werden die in der Tabelle dargestellten Ergebnisse zur Betrachtung der PAK-Beladung verwendet.

Tabelle 7-2: PAK-Beladung in Bezug auf den gelösten CSB (Eigenanalytik)

	Analytik Labor				
	Gelöster CSB (S CSB)				
	Zulauf	Ablauf	Elimination	PAK Zugabe	PAK-Beladung
	kg/d	kg/d	kg/d	kg_PAK/d	kgCSB/kgPAK
Versuchs-phase 1	13.98	4.88	9.10	30.0	0.30
	16.98	8.61	8.37	30.0	0.28
	18.09	8.46	9.63	30.0	0.32
	13.92	5.26	8.66	30.0	0.29
	19.68	9.78	9.90	30.0	0.33
	16.86	7.53	9.33	30.0	0.31
	17.40	9.00	8.40	30.0	0.28
		Medianwert	**9.10**		**0.30**
		Mittelwert	**9.06**		**0.30**
Versuchs-phase 2	14.46	10.62	3.84	9.0	0.43
	15.33	10.86	4.47	9.0	0.50
	9.90	5.85	4.05	9.0	0.45
	11.19	5.26	5.93	9.0	0.66
	12.06	8.10	3.96	9.0	0.44
		Medianwert	**4.05**		**0.45**
		Mittelwert	**4.45**		**0.49**
Versuchs-phase 3	16.94	12.82	4.13	14.4	0.29
	16.70	13.39	3.31	14.4	0.23
	25.73	21.41	4.32	14.4	0.30
		Medianwert	**4.13**		**0.29**
		Mittelwert	**3.92**		**0.27**
Versuchs-phase 4	26.02	13.73	12.29	48.0	0.26
	26.88	16.27	10.61	48.0	0.22
	24.67	15.89	8.78	48.0	0.18
	10.33	2.78	7.55	48.0	0.16
	13.44	6.31	7.13	48.0	0.15
		Medianwert	**8.78**		**0.18**
		Mittelwert	**9.27**		**0.19**

In Versuchsphase 1 ist durch die Zugabe von 30 kg PAK pro Tag im Mittel eine Elimination von 9,06 kgS_{CSB} möglich. Dies entspricht einer PAK-Beladung von 0,3 kg_{CSB}/kg_{PAK}.

Bei einer Verweilzeit von 30 min. und einem PAK-Alter von 20 h entspricht diese Beladung in etwa dem in der Machbarkeitsstudie ermittelten Wert von ca. 0,25 kg_{CSB}/kg_{PAK}.

Einzelheiten der berechneten Parameter sind anhand einer Gegenüberstellung in nachfolgender Tabelle 7-3 dargestellt.

Tabelle 7-3: Gegenüberstellung von berechneten Parametern

	CSB Elimination	PAK Alter	Verweilzeit	PAK Beladung
	kg/d	h	min	KgCSB /KgPAK
Versuchs-phase 1	9.06	20.00	30.00	0.30
Versuchs-phase 2	4.45	67.00	30.00	0.49
Versuchs-phase 3	3.92	42.00	19.00	0.27
Versuchs-phase 4	9.27	12.50	19.00	0.19

In Versuchsphase 2 ist durch die Zugabe von 9 kg PAK pro Tag im Mittel eine Elimination von 4,45 kg S_{CSB} möglich. Dies entspricht einer PAK-Beladung von 0,49 $kg_{CSB}/kg_{PAK.}$

Bei einer Verweilzeit von 30 min. und einem PAK-Alter von 67 h übersteigt die Beladung deutlich dem in der Machbarkeitsstudie ermittelten Wert von ca. 0,25 $kg_{CSB}/kg_{PAK.}$ Dies ist zurückzuführen auf das hohe PAK-Alter einhergehend mit der Verweilzeit von 30 min. Daraus resultiert, dass die eingebrachte PAK voraussichtlich vollständig Beladen werden konnte.

In Versuchsphase 3 wurden 14,4 kg PAK pro Tag dosiert, was zu einer Elimination von 3,92 kg/d S_{CSB} führte. Daraus resultiert eine PAK-Beladung von 0,27 $kg_{CSB}/kg_{PAK.}$ Die Verweilzeit im System in Versuchsphase 2 beträgt 19 min.

Versuchsphase 4 weist mit 9,27 kg/d die höchste S_{CSB} Elimination auf und zeitgleich mit 0,19 kg_{CSB}/kg_{PAK} die geringste PAK-Beladung aller Versuchsphasen. Die PAK Zugabe betrug in dieser Versuchsphase 48 kg/d und die Verweilzeit im System betrug 19 min.

7.2 Mikroschadstoffe

Im Rahmen eines Screenings der durchgeführten Machbarkeitsstudie wurden nennenswerte Konzentrationen an verschiedenen Mikroschadstoffen im Abwasser der KA Herford festgestellt.

Während der Pilotierung wurden aufbauend auf den Ergebnissen der Studie und in Anlehnung an der dort dargestellten Tabelle 1 „Überblick der Substanzauswahl“ 12 Tagesmischproben, je drei pro Versuchsphase, aus dem Zulauf der Pilotanlage auf Mikroschadstoffe untersucht.

Die Ergebnisse der Analysen sind nachfolgend in Tabelle 7-4 dargestellt:

Tabelle 7-4 Zulaufkonzentrationen in µg/l der untersuchten Mikroschadstoffe zur Pilotanlage

Stoffgruppe	Parameter	BG	Anz.	Min	Max.	Ø	85%-Perzentil
		µg/l	µg/l	µg/l	µg/l	µg/l	µg/l
Industrie-Chemikalien	Benzotriazol	0,05	12	3,20	10,00	**5,53**	7,01
	Terbutryn	0,05	12	0,05	0,17	0,13	0,16
	Diuron	0,05	6	< 0,05	0,85	0,27	0,49
	Isoproturon	0,05	0	< 0,05	< 0,05	< 0,05	< 0,05
Röntgen-kontrastmittel	Diatrizoat	0,05	12	5,30	29,00	**14,95**	24,40
	Iomeprol	0,05	11	< 0,05	76,00	**44,09**	58,00
	Iopamidol	0,05	9	< 0,2	4,30	**1,68**	3,42
	Iopromid	0,05	0	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1
Schmerzmittel	Diclofenac	0,05	12	0,15	3,50	**1,67**	2,51
	Naproxen	0,05	12	0,07	1,20	0,59	1,04
	Phenazon	0,05	10	< 0,05	0,09	0,07	0,08
Verhütungs-mittel ("Anti-baby-Pille")	17-alpha-Ethinylestradi-ol	0,02	0	< 0,02	< 0,02	< 0,02	< 0,02
	17-beta-Estradiol	0,1	0	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1
	Estron	0,05	0	< 0,05	< 0,05	< 0,05	< 0,05
Antibiotika	Clarithromycin	0,05	11	< 0,05	0,17	0,11	0,16
	Sulfametho-xazol	0,05	11	< 0,05	0,67	0,33	0,48
Antiepileptika	Carbamazepin	0,05	12	0,46	1,10	0,75	0,97
Psycho-pharmaka	Diazepam	0,05	0	< 0,05	< 0,05	< 0,05	< 0,05
	Oxazepam	0,05	12	0,09	0,84	0,22	0,22
Betablocker	Metoprolol	0,05	12	1,10	2,60	**2,05**	2,54
	Atenolol	0,05	12	0,07	0,17	0,12	0,15
	Bisoprolol	0,05	12	0,13	0,35	0,27	0,32
	Sotalol	0,05	12	0,09	0,35	0,25	0,32
Lipidsenker	Bezafibrat	0,05	7	< 0,05	0,80	0,44	0,57

Die in der Tabelle orange dargestellten Mikroschadstoffe waren bereits in der Machbarkeitsstudie auffällig und weisen im Mittel eine Zulaufkonzentration von > 1 µg/l auf, was als Kriterium für die Auswahl der Mikroschadstoffe und weitergehende Betrachtung herangezogen wurde.

Es ist deutlich zu erkennen, dass die Stoffgruppe der Röntgenkontrastmittel wie z.B. Iomeprol bzw. Diatrizoat die höchsten Konzentrationen aufweisen. Die sechs orange dargestellten Mikroschadstoffe werden im Folgenden näher betrachtet.

7.3 Ausgewählte Mikroschadstoffe

7.3.1 Benzotriazol

Die Abbildung 7-2 stellt die Zu- und Ablaufkonzentrationen sowie die erzielte Eliminationsrate von Benzotriazol im Untersuchungszeitraum dar.

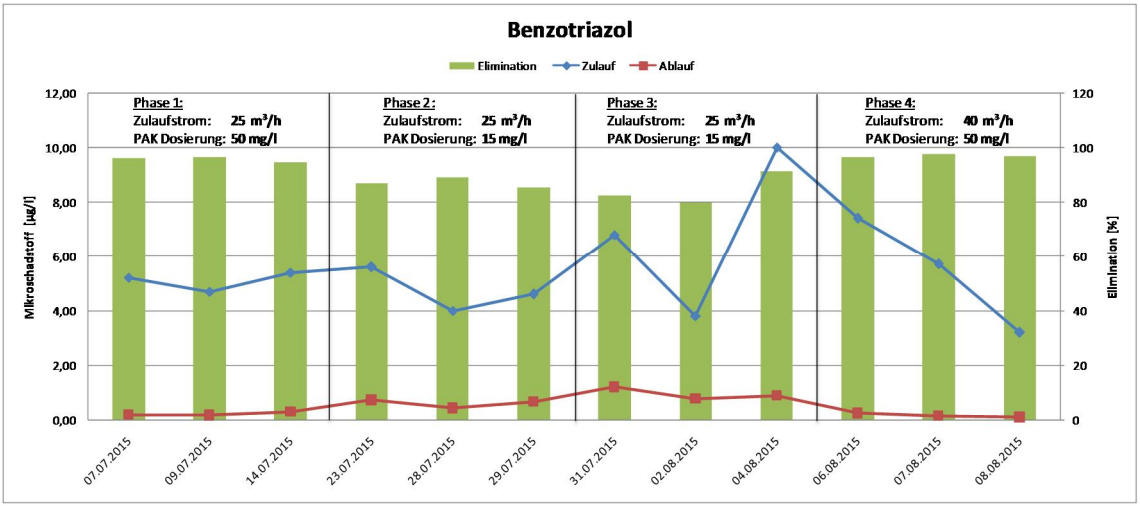

Abbildung 7-2 Elimination von Benzotriazol

Das Diagramm wurde in die vier unterschiedlichen Versuchsphasen untergliedert. Insgesamt ist eine nennenswerte Elimination von mindestens 80 % in allen Versuchsphasen erzielt worden. In den Versuchsphasen 1 und 4 konnte Benzotriazol durch die höhere PAK-Dosierung (50 mg/l) Eliminationsraten von bis zu 95 % im Mittel erreicht werden. Auch mit der niedrigen PAK-Dosierung von 15 mg/l wurden Eliminationen von ca. 80-90 % erreicht.

7.3.2 Diatrizoat (Amidotrizoat)

Das Röntgenkontrastmittel Diatrizoat (Amidotrizoat) weist die im Untersuchungszeitraum gemessene zweithöchste Zulaufkonzentration mit ca. 15 µg/l im Mittel auf. Die Messwerte der Konzentration im Zu- und Ablauf der Pilotanlage und die Eliminationsraten sind in nachfolgender Abbildung 7-3 dargestellt.

Die Elimination von Diatrizoat (Amidotrizoat) mithilfe von PAK ist im gesamten Untersuchungszeitrum gering, was auf schlechte Adsorptionsfähigkeiten des Mikroschadstoffes schließen lässt. Der Unterschied in der Elimination bezogen auf hohe (50 mg/l) und niedrige (15 mg/l) PAK-Dosierung ist deutlich zu erkennen. Während in den Ver-

suchsphasen 1 und 4 (50 mg/l PAK-Dosierung) noch ca. 30-40 % Diatrizoat (Amidotrizoat) eliminiert werden konnten, wurden in den Phasen 2 und 3 (15 mg/l) nur Eliminationsraten von 5-10 % erzielt.

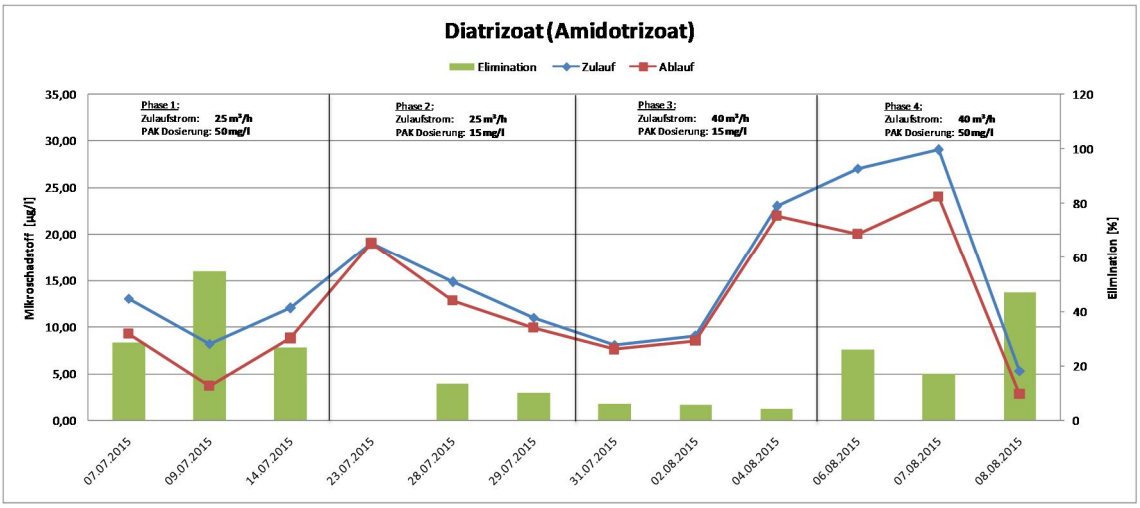

Abbildung 7-3: Elimination von Diatrizoat (Amidotrizoat)

7.3.3 Iomeprol

Der Mikroschadstoff Iomeprol gehört ebenfalls zur Stoffgruppe der Röntgenkontrastmittel. Wie in Abbildung 7-4 zu erkennen, lässt sich wie bei Benzotriazol ein Unterschied der Eliminationsrate bezogen auf die eingesetzte PAK-Dosierung in den einzelnen Versuchsphasen feststellen.

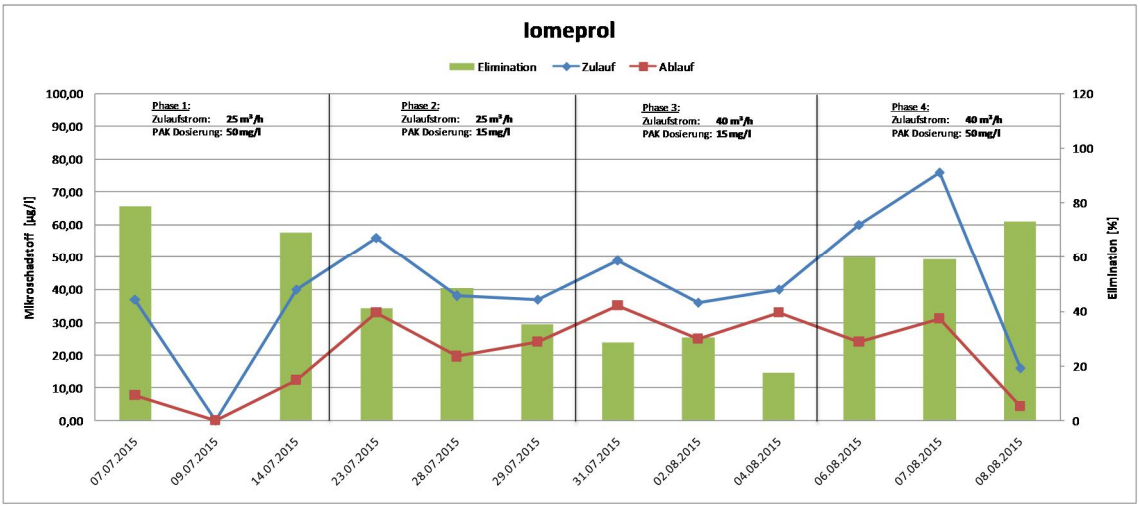

Abbildung 7-4: Elimination von Iomeprol

Bei einem PAK-Einsatz von 50 mg/l (Phase 1 und 4) können 70 % und bei 15 mg/l PAK rund 35 % eliminiert werden. Die Eliminationsraten liegen deutlich höher als beim Diatrizoat derselben Stoffgruppe der Röntgenkontrastmittel. Diese höhere Eliminationsrate ist besonders wichtig, da dieser Mikroschadstoff im Untersuchungszeitraum mit ca. 44 µg/l im Mittel die höchste Zulaufkonzentration aufweist.

7.3.4 Iopamidol

Das Röntgenkontrastmittel Iopamidol wurde in 9 von 12 Proben im Untersuchungszeitraum nachgewiesen. Die Ergebnisse der Eliminationsleistung, sowie die Zu- und Ablaufkonzentrationen sind in Abbildung 7-5 dargestellt.

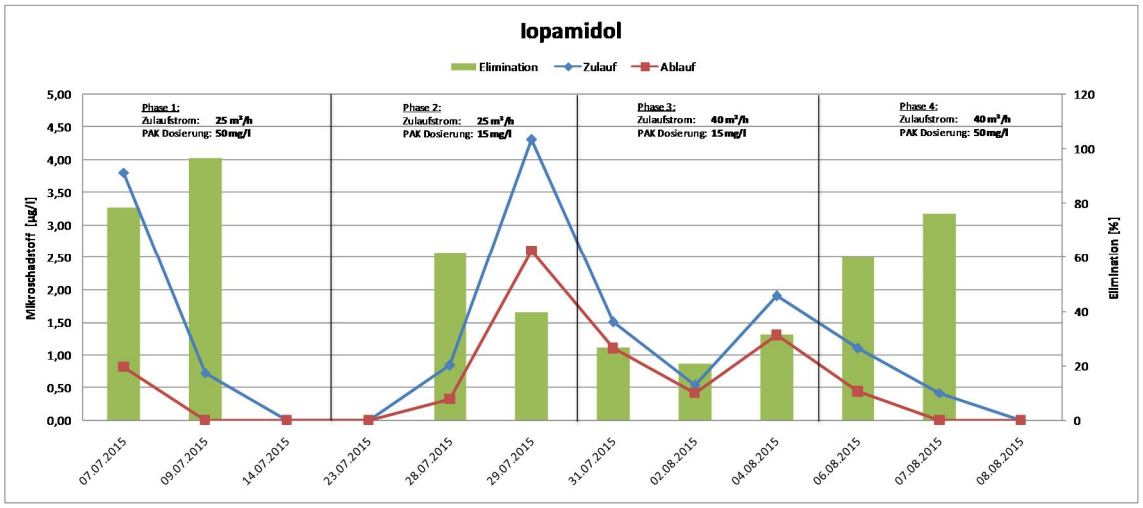

Abbildung 7-5: Elimination von Iopamidol

In allen 9 Proben konnte Iopamidol mithilfe von PAK aus dem Wasser eliminiert werden. Die Eliminationsleistungen in den Versuchsphasen 1 und 4 in denen jeweils 50 mg/l PAK zugegeben wurde, sind im Durchschnitt höher als in den Versuchsphasen 2 und 3 mit jeweils 15 mg/l PAK-Zugabe.

7.3.5 Diclofenac

Der Arzneistoff Diclofenac wird als Wirkstoff gegen Entzündungen und Schmerzen eingesetzt. In allen 12 Proben, die analysiert und quantifiziert wurden, konnte Diclofenac aufgezeigt werden (siehe Abbildung 7-6).

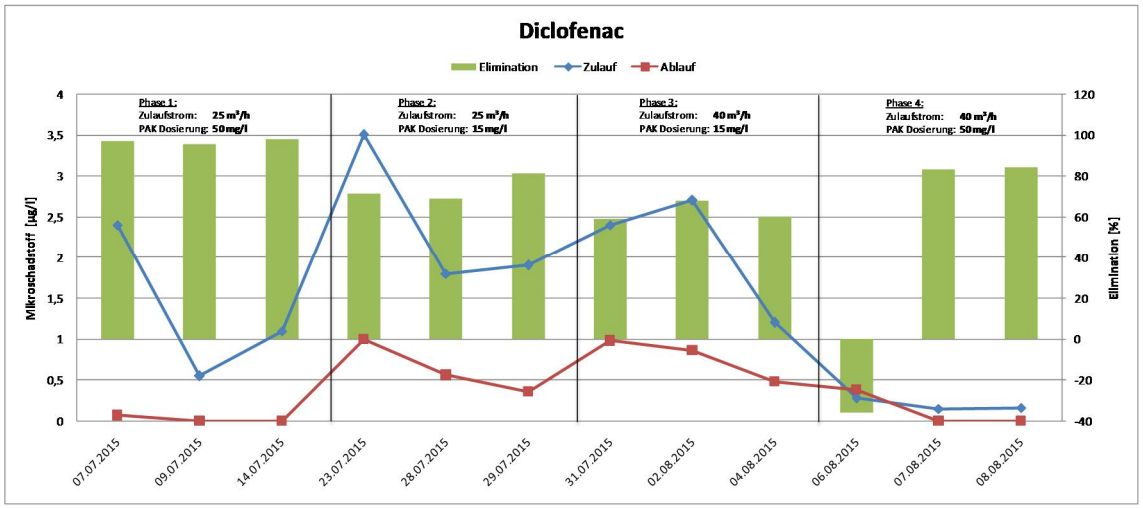

Abbildung 7-6: Elimination von Diclofenac

Die dargestellten Ergebnisse zeigen, dass durch den Einsatz von PAK eine hohe Elimination von Diclofenac erzielt werden kann. Bis auf eine Ausnahme konnte in den Versuchsphasen 1 und 4 zwischen 80 und 95% des Wirkstoffes eliminiert werden. Nach

Rücksprache mit dem externen Labor wird von einem Fehler in der Probenaufbereitung ausgegangen. Dieser Messwert wird in den nachfolgenden Auswertungen nicht weiter berücksichtigt. Auch in den Versuchsreihen 2 und 3, in denen deutlich weniger PAK (15 mg/l PAK) zugegeben wurde, werden Elimination zwischen 50 und 80 % erreicht.

7.3.6 Metoprolol

Das Arzneimittel Metoprolol gehört zu der Gruppe der Betablocker und wird zur Behandlung von Herzkrankheiten und als Prophylaxe gegen chronische Kopfschmerzen (Migräne) eingesetzt.

Die nachfolgende Abbildung 7-7 zeigt die Elimination von Metoprolol über den gesamten Untersuchungszeitraum.

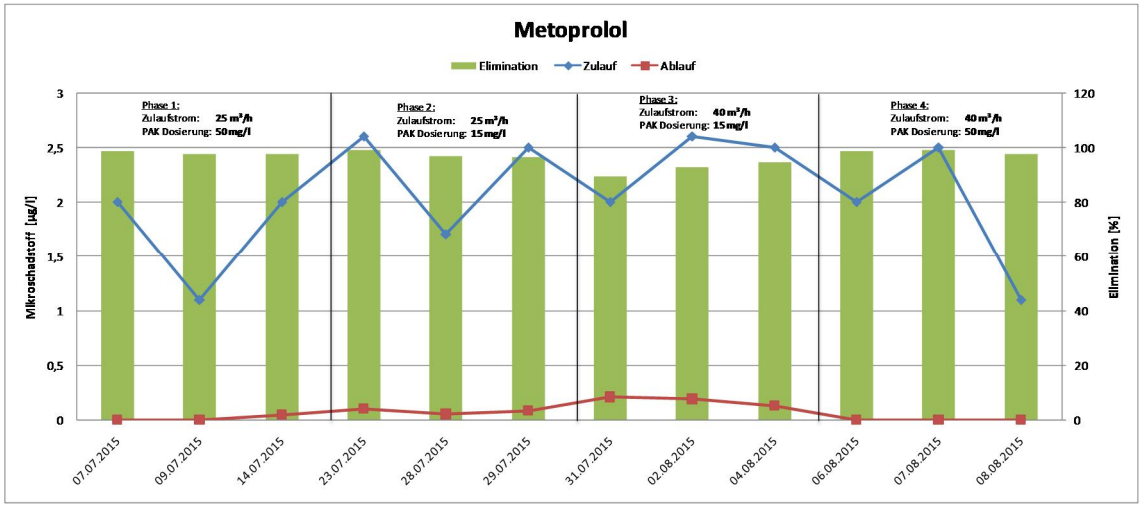

Abbildung 7-7 Elimination von Metoprolol

Alle 12 untersuchten Proben weisen Zulaufkonzentrationen von Metoprolol auf. Die Höhe der Konzentrationen liegt zwischen 1 und 2,5 µg pro Liter. In allen 4 Versuchsphasen konnten mindestens 95 % des Arzneistoffes mithilfe der eingesetzten PAK eliminiert werden. Die Ergebnisse zeigen, dass für eine fast vollständige Eliminierung von Metoprolol schon 15 mg/l PAK ausreichend sind.

7.3.7 Übersicht der 6 ausgewählten Mikroschadstoffe

Eine graphische Übersicht der Eliminationsraten der sechs ausgewählten Mikroschadstoffe ist in Abbildung 7-8 dargestellt:

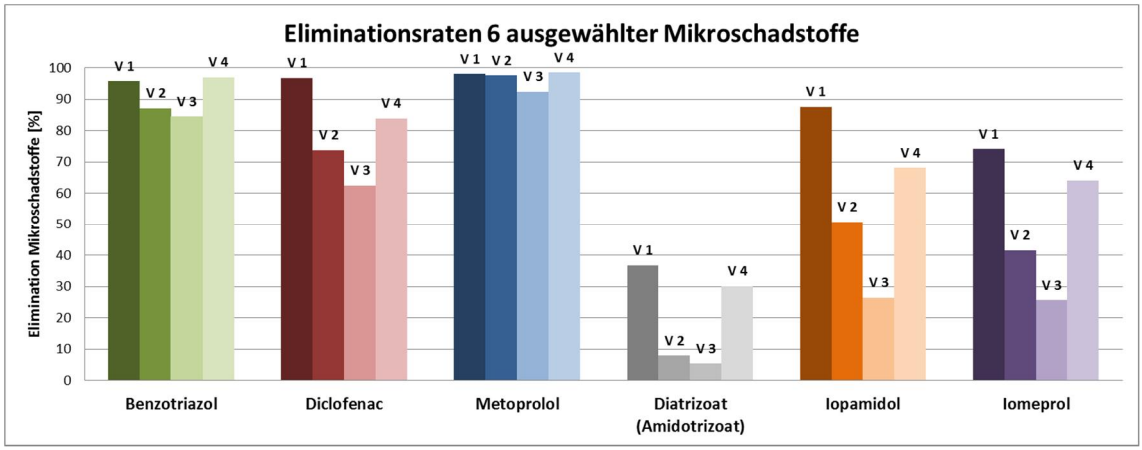

Abbildung 7-8: Eliminationsraten von 6 ausgewählten Mikroschadstoffen

Die Übersicht zeigt die Eliminationsraten der einzelnen Mikroschadstoffe in Abhängigkeit der Versuchsphasen 1 bis 4. Es ist erkennbar, dass die Elimination der einzelnen Mikroschadstoffe ist in den Versuchsphasen 1 und 4 mit einer PAK-Dosierung von 50 mg/l höher ist als in den Versuchsphasen 2 und 3, in denen nur 15 mg/l PAK zudosiert wurde. Des Weiteren ist zu erkennen, dass die unterschiedlichen Zulaufmengen (25 oder 40 m³/h) ebenfalls Auswirkungen auf die Eliminationsleistung haben. Jedoch ist der Einfluss der Hydraulik bzw. der Verweilzweit geringer, als die dosierte PAK-Menge.

Eine abschließende Bewertung und Gegenüberstellung der Versuchsphasen in Form einer Matrix erfolgt in Kapitel 7.7.

7.4 Vergleich Röntgenkontrastmittel

Die Stoffgruppe der Röntgenkontrastmittel liegt mit 3 von 4 analysierten Konzentrationen im Mittel über 1 µg/l. Die Messergebnisse und eine Übersicht der Mittelwerte der Eliminationsraten der einzelnen Versuchsphasen zeigt die nachfolgende Tabelle.

Tabelle 7-5: Zu- und Ablaufkonzentrationen sowie Eliminationsraten der einzelnen Röntgenkontrastmittel über den gesamten Versuchszeitraum

Datum	Versuchs-phasen	Iomeprol		Iopamidol		Diatrizoat	
		Zulauf	Ablauf	Zulauf	Ablauf	Zulauf	Ablauf
		µg/l	µg/l	µg/l	µg/l	µg/l	µg/l
07.07.2015	1	37,00	7,80	3,80	0,82	13,00	9,30
09.07.2015		< 0,05	< 0,05	0,72	0,03	8,20	3,70
14.07.2015		40,00	12,30	0,10	0,05	12,00	8,80
Ø		38,50	10,05	1,54	0,30	11,07	7,27
Elimination		**73,90%**		**80,63%**		**34,34%**	
		62,95%					
24.07.2015	2	56,00	33,00	< 0,1	< 0,1	19,00	19,00
28.07.2015		38,00	19,60	0,84	0,32	14,80	12,80
30.07.2015		37,00	24,00	4,30	2,60	11,00	9,90
Ø		43,67	25,53	2,57	1,46	14,93	13,90
Elimination		**41,53%**		**43,19%**		**6,92%**	
		30,55%					
01.08.2015	3	49,00	35,00	1,50	1,10	8,10	7,60
03.08.2015		36,00	25,00	0,53	0,42	9,00	8,50
04.08.2015		40,00	33,00	1,90	1,30	23,00	22,00
Ø		41,67	31,00	1,31	0,94	13,37	12,70
Elimination		**25,60%**		**28,24%**		**4,99%**	
		19,61%					
07.08.2015	4	60,00	24,00	1,10	0,44	27,00	20,00
08.08.2015		76,00	31,00	0,42	0,10	29,00	24,00
09.08.2015		16,00	4,30	< 0,2	< 0,2	5,30	2,80
Ø		50,67	19,77	0,76	0,27	20,43	15,60
Elimination		**60,99%**		**64,47%**		**23,65%**	
		49,70%					

Iomeprol

Tabelle 7-5 zeigt, dass Iomeprol die höchsten Zulaufkonzentrationen der drei untersuchten Röntgenkontrastmittel aufweist. Die Messwerte für Iomeprol liegen in den 12 untersuchten Tagesmischproben zwischen 16 und 67 µg/l.

Die niedrigste Konzentration in Höhe von 16 µg/l wurde in der Probe am Sonntag, den 09.08.15 gemessen. Dieser geringe Wert wird darauf zurückgeführt, dass der Einsatz von Röntgenkontrastmittel von dem im Einflussgebiet der Kläranlage befindlichen Krankenhaus mit Röntgenstation am Wochenende deutlich geringer ist als an Werktagen. Diese Annahme wird durch die niedrigeren Werte der beiden anderen Röntgenkontrastmittel an diesem Tag in Bezug auf deren Mittelwert im gesamten Untersuchungszeitraum gestützt.

Am 09.07.15 scheint es einen Fehler bei der Probenahme oder der anschließenden Analyse von Iomeprol gegeben zu haben. Der Messwert liegt mit < 0,05 µg/l unterhalb der Nachweisgrenze und weicht somit von den anderen Messergebnissen ab. Daher wird dieser Wert in der Auswertung und Diskussion nicht berücksichtigt.

Bei einem Vergleich der drei untersuchten Röntgenkontrastmittel ist auffällig, dass Iomeprol in allen Versuchsphasen die höchsten Eliminationsleistungen aufweist. Über

den gesamten Untersuchungszeitraum lag die Zulaufkonzentration im Mittel bei ca. 44 µg/l und die Konzentration im Ablauf bei ca. 20 µg/l, was einer Reduzierung von ca. 49 % entspricht.

Diatrizoat

Die Ergebnisse der Messungen von Diatrizoat (Amidotrizoat) ergaben mit 5 bis 29 µg/l die zweithöchsten Konzentrationen im Zeitraum der Untersuchungen. In der Betrachtung der Elimination (Mittelwert) von Zu- und Ablaufkonzentration ist eine Eliminationsrate von ca. 17 % über den Gesamtzeitraum zu verzeichnen. Im Vergleich zu Iopamidol ist die Eliminierungsrate sichtbar geringer. Dies ist auf schlechtere Adsorbtionseigenschaften von Diatrizoat (Amidotrizoat) zurückzuführen. Auch die Menge an PAK-Dosierung zeigt ihren Einfluss auf die Eliminationsraten. In den Versuchsphasen 2 und 3, bei einer Dosiermenge von 15 mg/l führt dies zu Eliminationsraten von ca. 6 %. Im Vergleich dazu weisen die Versuchsphasen 1 und 4 mit 50 mg/l Werte von rund 27 % auf. Daraus resultiert die Schlussfolgerung, dass für die Gewährleistung der Elimination von ca. 30 % Diatrizoat (Amidotrizoat) die PAK-Dosierung bei 50 mg/l liegen muss.

Iopamidol

Innerhalb des Versuchszeitraums weist Iopamidol die niedrigsten Konzentrationen innerhalb der Stoffgruppe der Röntgenkontrastmittel auf. Diese liegen bei ca. 1,7 µg/l im Zu- und 1 µg/l im Ablauf der Pilotanlage. Mit einer mittleren Eliminationsrate von ca. 40 % konnte Iopamidol über den gesamten Zeitraum betrachtet gut reduziert werden.

Bewertet man die Röntgenkontrastmittel in ihrer Gesamtheit als Stoffgruppe, so lässt sich zusammenfassen, dass eine Elimination zwischen Zu- und Ablauf der Pilotanlage stattfindet. Die Größe der Eliminationsrate ist jedoch stark vom Mikroschadstoff an sich abhängig. Insgesamt beträgt die gemittelte Eliminationsrate über alle untersuchten Röntgenkontrastmittel im Versuchszeitraum 49,70 %.

7.5 Vergleich Industriechemikalien

In der Stoffgruppe der Industrie-Chemikalien wurden die Proben auf die Mikroschadstoffe Benzotriazol, Terbutryn, Diuron und Isoproturon untersucht. Nicht nachgewiesen werden konnte Isoproturon. Daher wird dieser Mikroschadstoff nicht weiter betrachtet. Die gemessenen Konzentrationen im Zu- und Ablauf der Pilotanlage sowie eine Übersicht der Mittelwerte und Eliminationsraten der einzelnen Versuchsphasen zeigt Tabelle 7-6:

Tabelle 7-6: Zu- und Ablaufkonzentrationen der Industriechemikalien über den gesamtenVersuchszeitraum

Datum	Versuchs-phasen	Benzotriazol		Terbutryn		Diuron	
		Zulauf	Ablauf	Zulauf	Ablauf	Zulauf	Ablauf
		µg/l	µg/l	µg/l	µg/l	µg/l	µg/l
07.07.2015	1	5,20	0,20	0,14	0,03	< 0,05	< 0,05
09.07.2015		4,70	0,17	0,10	0,03	0,07	0,03
14.07.2015		5,40	0,29	0,14	0,03	0,11	0,03
Ø		5,10	0,22	0,13	0,03	0,09	0,03
Elimination		**95,69%**		**80,26%**		**71,91%**	
		82,62%					
24.07.2015	2	5,60	0,73	0,09	0,03	< 0,05	< 0,05
28.07.2015		4,00	0,43	0,12	0,03	0,06	0,03
30.07.2015		4,60	0,68	0,17	0,03	< 0,05	< 0,05
Ø		4,73	0,61	0,13	0,03	0,06	0,03
Elimination		**87,04%**		**80,31%**		**54,55%**	
		73,97%					
01.08.2015	3	6,80	1,20	0,15	0,03	0,03	0,03
03.08.2015		3,80	0,77	0,05	0,03	0,03	0,03
04.08.2015		10,00	0,88	0,11	0,03	0,03	0,03
Ø		6,87	0,95	0,10	0,03	0,03	0,03
Elimination		**86,17%**		**76,11%**		**0,00%**	
		81,14%					
07.08.2015	4	7,40	0,25	0,16	0,03	0,85	0,03
08.08.2015		5,70	0,14	0,12	0,03	0,37	0,03
09.08.2015		3,20	0,10	0,17	0,03	0,15	0,03
Ø		5,43	0,16	0,15	0,03	0,46	0,03
Elimination		**96,99%**		**83,33%**		**94,53%**	
		91,62%					

Benzotriazol

Innerhalb der Stoffgruppe der Industriechemikalien weist der Mikroschadstoff Benzotriazol die höchsten Zulaufkonzentrationen auf. Diese liegen im Versuchszeitraum zwischen 3,20 µg/l und 10,0 µg/l. Auch hier wurde die niedrigste Konzentration an einem Sonntag verzeichnet (09.08.2015). Benzotriazol wird als Frostschutzmittel, Entkalkungsmittel oder als Geschirrspülmittel verwendet und kann innerhalb der Stoffgruppe der Industriechemikalien mit 86-96% die höchsten Eliminationsraten aufweisen.

Bezogen auf die verwendeten PAK-Dosierungen lässt sich sagen, das auch bei der geringeren Dosiermenge von 15 mg/l Eliminationsraten von > 85 % werden können. Dies könnte sich bei einer später kostenspezifischen Betrachtung maßgeblich auf die zu erwartenden Kosten auswirken, da mit geringer Investition eine hohe Abbauleistung erzielt werden kann.

Terbutryn, Diuron

Terbutryn (Einsatz als Algizid in Dispersionsfarben) und Diuron (Fassadenanstrich) weisen in der Gesamtheit der Mikroschadstoffe nur sehr geringe Zulaufkonzentrationen auf. Diese liegen im Versuchszeitraum zwischen < 0,05 und 0,17 µg/l im Zulauf der Pi-

lotanlage. Durch den Einsatz der PAK können bei Terbutryn Eliminationsraten zwischen 74 und 83 % erreicht werden. Der Einfluss der PAK-Dosiermenge fällt in diesem Fall geringer aus, wie die Versuchsphasen 1 und 2 des Terbutryn zeigen. Hier ist die Eliminationsrate bei 50 mg PAK mit ermittelten 80,26 % sogar geringer als die Elimination von 80,31 % bei Einsatz von 15 mg PAK.

Bei der Industriechemikalie Diuron wurde in Versuchsphase 3 kein Abbau des Mikroschadstoffs verzeichnet. Es handelt sich möglicherweise um einen Mess- oder Analysefehler. In den weiteren Betrachtungen und Mittelwertbildungen werden diese Ausreißer nicht betrachtet.

Insgesamt beträgt die gemittelte Eliminationsrate über alle untersuchten Industriechemikalien im Versuchszeitraum 91,62 %.

7.6 Vergleich Arzneimittelrückstände

Die untersuchten Proben im Untersuchungszeitraum haben insgesamt 8 unterschiedliche Arzneimittelrückstände ergeben. Zur besseren Übersicht werden die Arzneimittel in Obergruppen unterteilt:

Im Folgenden werden die Arzneimittel der Obergruppen bezüglich der Konzentrationen verglichen und analysiert:

7.6.1 Schmerzmittel

In der Untergruppe der Schmerzmittel wurden die Mikroschadstoffe Diclofenac, Naproxen und Phenazon betrachtet und die gemessenen Daten ausgewertet. Die Ergebnisse sind in nachfolgender Tabelle 7-7 dargestellt

Tabelle 7-7 Zu- und Ablaufkonzentrationen der Schmerzmittel über den Versuchszeitraum

Datum	Versuchs-phasen	Diclofenac		Naproxen		Phenazon	
		Zulauf	Ablauf	Zulauf	Ablauf	Zulauf	Ablauf
		µg/l	µg/l	µg/l	µg/l	µg/l	µg/l
07.07.2015	1	2,40	0,07	0,83	0,03	0,08	0,03
09.07.2015		0,55	0,03	0,18	0,03	0,06	0,03
14.07.2015		1,10	0,03	0,37	0,03	0,07	0,03
Ø		1,35	0,04	0,46	0,03	0,07	0,03
Elimination		**97,04%**		**94,57%**		**63,59%**	
		85,06%					
24.07.2015	2	3,50	1,00	1,00	0,22	0,09	0,03
28.07.2015		1,80	0,56	0,78	0,17	< 0,05	< 0,05
30.07.2015		1,90	0,36	0,96	1,90	0,07	0,03
Ø		2,40	0,64	0,91	0,76	0,08	0,03
Elimination		**73,33%**		**16,42%**		**67,74%**	
		52,50%					
01.08.2015	3	2,40	0,98	1,20	0,47	0,07	0,03
03.08.2015		2,70	0,86	1,10	0,33	0,06	0,03
04.08.2015		1,20	0,48	0,40	0,13	0,08	0,03
Ø		2,10	0,77	0,90	0,31	0,07	0,03
Elimination		**63,17%**		**65,56%**		**64,95%**	
		64,56%					
07.08.2015	4	0,28	0,38	0,10	0,14	0,07	0,03
08.08.2015		0,15	0,03	0,08	0,03	0,08	0,03
09.08.2015		0,16	0,03	0,07	0,03	< 0,05	< 0,05
Ø		0,16	0,03	0,08	0,06	0,08	0,03
Elimination		**83,87%**		**22,76%**		**66,67%**	
		57,77%					

Diclofenac

Die Ergebnisse aus der Tabelle 7-7 zeigen, dass Diclofenac mit einer Durchschnittskonzentration im Zulauf von 1,67 µg/l im Versuchszeitraum die höchste Konzentration der drei Schmerzmitteln aufweist. Die ermittelten Eliminationsraten von Diclofenac liegen im Durchschnitt zwischen 63 und 97 %. Bei einer PAK-Dosierung von 50 mg/l (Versuchsphasen 1 und 4) können für diesen Mikroschadstoff deutlich höhere Eliminationsleitungen erzielt werden, als bei der geringeren Dosierung von 15 mg/l PAK in den Versuchsphase 2 und 3.

Naproxen, Phenazon

Die Konzentration von Naproxen wurde im Untersuchungszeitraum mit durchschnittlich 0,59 µg/l nachgewiesen und ist somit fast dreimal so niedrig wie die gemessene Konzentration von Diclofenac. Mit einer Zulaufkonzentration von 0,06 µg pro Liter im Zulauf der Pilotanlage, also knapp oberhalb der minimalen Bestimmungsgrenze, wurde Phenazon bestimmt. Damit weist Phenazon die mit Abstand geringste Konzentration der drei Schmerzmittel im Untersuchungszeitraum auf.

Insgesamt beträgt die gemittelte Eliminationsrate über alle untersuchten Schmerzmittel im Versuchszeitraum 57,77 %.

7.6.2 Betablocker

Die Untergruppe der Betablocker besteht im Rahmen der Pilotierung aus den Mikroschadstoffen Metoprolol, Atenolol, Bisoprolol und Sotalol. Die Darstellung der Analyseergebnisse ist in nachfolgender Tabelle 7-8 dargestellt:

Tabelle 7-8 Zu- und Ablaufkonzentrationen der Betablocker über den Versuchszeitraum

Datum	Versuchs-phasen	Metoprolol		Atenolol		Bisoprolol		Sotalol	
		Zulauf	Ablauf	Zulauf	Ablauf	Zulauf	Ablauf	Zulauf	Ablauf
		µg/l	µg/l	µg/l	µg/l	µg/l	µg/l	µg/l	µg/l
07.07.2015	1	2,00	0,03	0,13	0,03	0,29	0,03	0,21	0,03
09.07.2015		1,10	0,03	0,12	0,03	0,13	0,03	0,14	0,03
14.07.2015		2,00	0,05	0,12	0,03	0,25	0,03	0,24	0,03
Ø		1,70	0,03	0,12	0,03	0,22	0,03	0,20	0,03
Elimination		**98,04%**		**79,73%**		**88,81%**		**87,29%**	
		88,47%							
24.07.2015	2	2,60	0,10	0,16	0,03	0,32	0,03	0,34	0,03
28.07.2015		1,71	0,05	0,17	0,03	0,23	0,03	0,16	0,03
30.07.2015		2,50	0,09	0,11	0,03	0,35	0,03	0,29	0,03
Ø		2,27	0,08	0,15	0,03	0,30	0,03	0,26	0,03
Elimination		**96,51%**		**82,95%**		**91,67%**		**90,51%**	
		90,41%							
01.08.2015	3	2,00	0,21	0,11	0,03	0,28	0,03	0,24	0,03
03.08.2015		2,60	0,19	0,07	0,03	0,31	0,03	0,31	0,03
04.08.2015		2,50	0,13	0,11	0,03	0,29	0,03	0,30	0,03
Ø		2,37	0,18	0,10	0,03	0,29	0,03	0,28	0,03
Elimination		**92,54%**		**74,40%**		**91,48%**		**91,18%**	
		87,40%							
07.08.2015	4	2,00	0,03	0,10	0,03	0,26	0,03	0,29	0,03
08.08.2015		2,50	0,03	0,14	0,03	0,33	0,03	0,35	0,03
09.08.2015		1,10	0,03	0,11	0,03	0,14	0,03	0,09	0,03
Ø		1,87	0,03	0,12	0,03	0,24	0,03	0,24	0,03
Elimination		**98,66%**		**78,57%**		**89,73%**		**89,68%**	
		89,16%							

Innerhalb der Betablocker hat das Arzneimittel Metoprolol mit einer im Zulauf zur Pilotanlage gemessenen mittleren Konzentration von 2 µg/l der größte Anteil dieser Untergruppe.

7.6.3 Antibiotika, Antiepileptika, Psychopharmaka und Lipidsenker

Da die nachgewiesenen Konzentrationen der gemessenen Mikroschadstoffe dieser Untergruppen unterhalb von 1 µg/l liegen, werden diese Bereiche zusammenfassend dargestellt. Die Untergruppe der Antibiotika beinhaltet im Rahmen der Pilotierung die Mikroschadstoffe Clarithromycin und Sulfamethoxazol. In den anderen Untergruppen sind Carbamazepin, Oxazepam und Bezafibrat dargestellt.

Tabelle 7-9 Zu- und Ablaufkonzentrationen der Antibiotika, Antiepileptike,Psychopharmaka und Lipidsenker über den Versuchszeitraum

Datum	Versuchs-phasen	Antibiotika				Antiepileptika		Psychopharmaka		Lipidsenker	
		Clarithromycin		**Sulfamethoxazol**		**Carbamazepin**		**Oxazepam**		**Bezafibrat**	
		Zulauf	Ablauf	Zulauf	Ablauf	Zulauf	Ablauf	Zulauf	Ablauf	Zulauf	Ablauf
		µg/l	µg/l	µg/l	µg/l	µg/l	µg/l	µg/l	µg/l	µg/l	µg/l
07.07.2015	1	0.12	0.03	0.33	0.03	0.76	0.03	0.13	0.03	< 0,05	< 0,05
09.07.2015		0.08	0.03	< 0,05	< 0,05	0.46	0.03	0.84	0.03	0.11	0.03
14.07.2015		0.10	0.03	0.50	0.10	0.71	0.03	0.16	0.03	0.15	0.03
Ø		0.10	0.03	0.42	0.06	0.64	0.03	0.38	0.03	0.13	0.03
Elimination		**75.17%**		**84.94%**		**96.11%**		**93.36%**		**80.77%**	
		80.05%									
24.07.2015	2	< 0,05	< 0,05	0.67	0.24	1.10	0.08	0.20	0.03	0.51	0.18
28.07.2015		0.12	0.03	0.31	0.09	0.55	0.03	0.12	0.03	0.51	0.17
30.07.2015		0.17	0.03	0.35	0.15	0.73	0.07	0.18	0.03	0.80	0.03
Ø		0.15	0.03	0.44	0.16	0.79	0.06	0.17	0.03	0.61	0.13
Elimination		**82.76%**		**64.21%**		**92.86%**		**85.00%**		**79.40%**	
		73.48%									
01.08.2015	3	0.15	0.03	0.26	0.14	0.66	0.09	0.15	0.03	0.54	0.16
03.08.2015		0.17	0.03	0.45	0.24	0.95	0.10	0.23	0.56	0.44	0.12
04.08.2015		0.08	0.03	0.22	0.16	1.00	0.11	0.21	0.03	0.03	0.09
Ø		0.13	0.03	0.31	0.18	0.87	0.10	0.18	0.03	0.34	0.12
Elimination		**81.39%**		**41.94%**		**88.54%**		**86.11%**		**63.68%**	
		61.66%									
07.08.2015	4	0.09	0.03	0.18	0.03	0.69	0.03	0.17	0.03	< 0,05	< 0,05
08.08.2015		0.09	0.03	0.30	0.05	0.94	0.05	0.20	0.03	< 0,05	< 0,05
09.08.2015		0.07	0.03	0.10	0.03	0.46	0.03	0.09	0.03	< 0,05	< 0,05
Ø		0.08	0.03	0.19	0.03	0.70	0.03	0.15	0.03	-	-
Elimination		**69.39%**		**81.91%**		**95.02%**		**83.52%**		**-**	
		75.65%									

Die größten Eliminationsraten weiß das Antiepileptika Carbamezepin auf. Hier können innerhalb der Versuchsreihen zwischen 89 und 96 % des Wirkstoffs abgebaut werden. Die schlechteste Abbauleistung dieser Darstellung weist das Antibiotika Sulfamethoxazol in Versuchsphase 3 mit 42 % auf.

7.6.4 Eliminationsraten der einzelnen Stoffgruppen

Nachdem in den vorangegangenen Kapiteln die Analyseergebnisse bezüglich der Zu- und Ablaufwerte der einzelnen Stoffgruppen und gegeben falls sogar ihre Untergruppen erläutert und diskutiert wurde, ist nachfolgend eine Zusammenfassung in Abbildung 7-9 dargestellt:

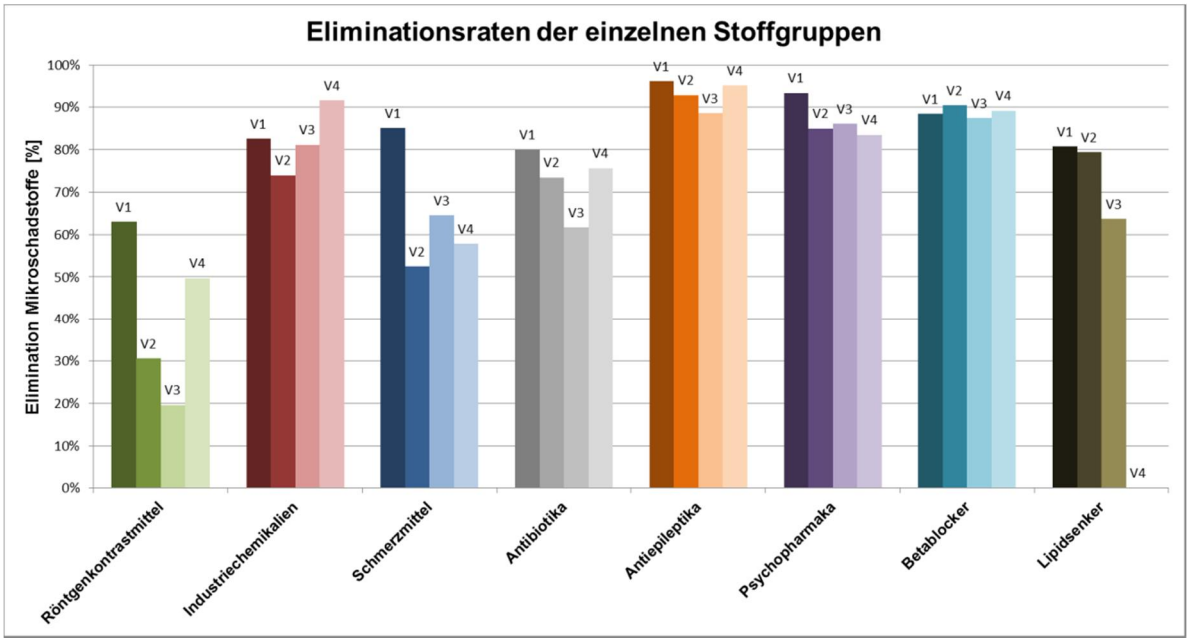

Abbildung 7-9: Eliminationsraten nach Stoffgruppen

7.7 Erreichung des Reinigungsziels der Leitparameter

Eine Übersicht der Eliminationsraten von sechs ausgewählten Leitparametern stellt Tabelle 7-10 dar. Die Auswahl der Mikroschadstoffe orientierte sich dabei an den Vorgaben des Kompetenzzentrums für Mikroschadstoffe. Als Reinigungsziel ist eine Elimination von ca. 80 % der Leitparamater anzustreben. Dabei wird nach dem Kompetenzzentrum von der Abbauleistung zwischen Zulauf biologische Stufe und Ablauf 4. Reinigungsstufe ausgegangen. In dem hier untersuchten Fall wurde der Ablauf Biologie und Ablauf der 4. Reinigungsstufe in Relation gesetzt. Die hier ermittelten Ergebnisse stellen also den schlechteren Fall dar, da davon auszugehen ist, dass während des Aufenthaltes des Abwassers in der Biologie auch bereits eine Eliminationsleistung der Leitparameter erbracht wird.

Des Weiteren werden in der Matrix in nachfolgender Tabelle 7-10 die Stoffgruppe der Röntgenkontrastmittel nicht mitbetrachtet. Gemäß Kompetenzzentrum ist eine Aufnahme von Röntgenkontrastmitteln in das Screeningprogramm ist zur Bewertung des Kläranlagenablaufs sinnvoll, jedoch nicht zur Bewertung von aus Aktivkohle- oder auf Ozon basierenden Verfahren, da Röntgenkontrastmittel mittel PAK oder Ozon nur in geringem Maße entfernbar sind („Anleitung zur Planung und Dimensionierung von Anlagen zur Mikroschadstoffelimination, Kompetenzzentrum für Mikroschadstoffe, März 2015). Ein Einbezug der Röntgenkontrastmittel würde daher durch die geringen Eliminationsraten den Durchschnitt verzerren.

Tabelle 7-10: Elimination 6 ausgewählter Leitparametern

Eliminationsraten der 6 ausgewählten Mikroschadstoffe [%]							
	Benzo-triazol	Diclo-fenac	Meto-prolol	Carbama zepin	Terbutryn	Sulfametho-xazol	Ø
Versuchs-phase 1: 25 m³/h 50 mg/l PAK	96	97	98	96	80	85	92
Versuchs-phase 2: 25 m³/h 15 mg/l PAK	**87**	**74**	**97**	**93**	**80**	**64**	**83**
Versuchs-phase 3: 40 m³/h 15 mg/l PAK	86	63	93	89	76	42	75
Versuchs-phase 4: 40 m³/h 50 mg/l PAK	97	84	99	95	83	82	90
Gesamter Zeitraum:	92	80	97	93	80	68	

Legende	80 - 100 %	60 - 80%	30 - 60 %	0 - 30 %

In Tabelle 7-10 sind die 6 Leitparameter mit den jeweiligen Eliminationsraten (Zulauf/Ablauf 4. Reinigungsstufe), sowie die berechneten Durchschnittswerte je Parameter (unten) und auch je Versuchsreihe (hinten) dargestellt.

Die höchsten Eliminationsraten konnten für die Mikroschadstoffe Carbamazepin (Antiepileptika) und Metoprolol (Betablocker) mit durchschnittlich 93 und 97 % ermittelt werden. Auch die anderen Parameter erreichen über alle Versuchsphasen betrachtet durchschnittliche Eliminationsraten von größer 80 %. Lediglich Sulfamethoxazol kann mit 68 % Eliminationsleistung die geforderten 80 % nicht erreichen.

Betrachtet man die durchschnittlichen Eliminationsraten in Abhängigkeit der Versuchsphase, so ist erkennbar, dass Versuchsphase 1 für alle untersuchten Mikroschadstoffe die höchste Elimination aufweist. Dies ist auf die längere Verweilzeit zurückzuführen, die aus der geringen hydraulischen Belastung resultiert. Zusätzlich wird in Versuchsphase 1 die höhere PAK-Dosiermenge verwendet.
Die geringste Elimination wird in Versuchsphase 3 erreicht. In dieser Versuchsreihe wird neben der hohen hydraulischen Belastung zusätzlich wenig PAK dosiert. Es sind also die schlechtesten Voraussetzungen kombiniert.

Die Versuchsphasen 2 und 4 können mit 83 % und 90 % durchschnittlicher Abbauleistung die Anforderungen an das Reinigungsziel erfüllen. Da in Versuchsphase 2 mit einem erkennbar geringeren Einsatz an PAK ähnlich gute Ergebnisse erzielt werden, wird diese Versuchsphase als Vorzugsvariante betrachtet. Dieser Ansatz deckt sich auch mit der Betrachtung der PAK-Beladung aus Tabelle 7-2 und Tabelle 7-3, worin deutlich

wird, dass die Aktivkohle in Versuchsphase 2 die bestmögliche Beladung innerhalb der Studie erreicht.

7.8 Standardanalytik

Im Rahmen der Standardanalytik werden Parameter wie der chemische Sauerstoffbedarf, gemessen als Gesamt-CSB (C_{CSB}) und gelöster CSB (S_{CSB}), die abfiltrierbaren Stoffe (AFS), Trübung und Schwarzgrad untersucht und anschließend diskutiert.

Hintergrund dieser Betrachtung ist es, zusätzlich zur Elimination von Mikroschadstoffen auch Aussagen treffen zu können über die Elimination von inertem Rest-CSB, wie in Kapitel 1.1 beschrieben. Weiterhin werden mögliche Zusammenhänge zwischen der hydraulischen Belastung und dem PAK-Abtrieb untersucht. Der PAK-Abtrieb wird vorrangig über die Messung der abfiltrierbaren Stoffe bilanziert. Zusätzlich wird anhand der Messdaten untersucht, ob eine nachgeschaltete Filtration nach der Actiflo®Carb-Anlage positive Auswirkungen auf Ablaufwerte der Pilotanlage hat.

7.8.1 Chemischer Sauerstoffbedarf (CSB)

Die vorangegangene Machbarkeitsstudie hat gezeigt, dass der CSB im Ablauf der KA Herford durch den Einsatz von PAK messbar verringert werden kann. Nachfolgend sind in Abbildung 7-10 die Zu- und Ablaufkonzentrationen von Gesamt CSB (C_{CSB}) und gelöstem CSB (S_{CSB}) für die unterschiedlichen Versuchsphasen der Pilotanlage dargestellt.

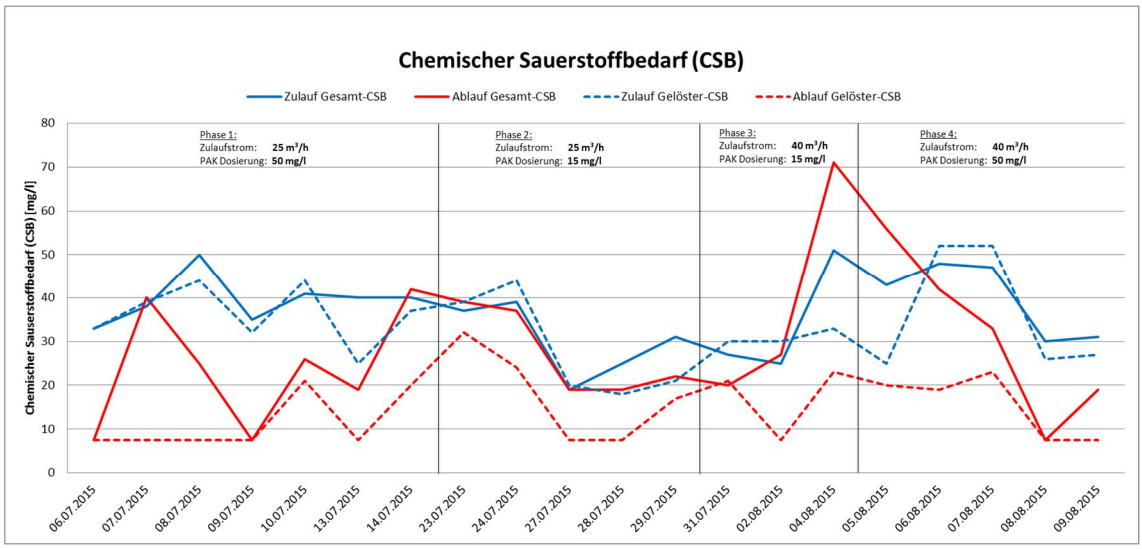

Abbildung 7-10: Chemischer Sauerstoffbedarf (CSB) über den gesamten Versuchszeitraum

Der Gesamt-CSB im Zulauf der Pilotanlage (Ablauf Kläranlage) liegt im gesamten Versuchszeitraum zwischen ca. 20 und 50 mg/l und somit unterhalb des Überwachungswertes von 65 mg/l. Auch der gelöste CSB liegt in etwa in der gleichen Größenordnung. Es ist daher davon auszugehen, dass ein Feststoffabtrieb aus der biologischen Stufe der Kläranlage (Biostyr) keine nennenswerte Rolle spielt.

Bei einer Betrachtung des gelösten CSB im Ablauf der Pilotanlage liegt die Konzentration unabhängig von den Versuchsphasen unterhalb der Zulaufwerte zwischen ca. 7,5

und 32 mg/l. Eine Elimination an gelöstem CSB fand somit während des gesamten Versuchszeitraums über alle Versuchsphasen statt.

Bei einer Betrachtung des Gesamt-CSB im Ablauf der Pilotanlage ist zu erkennen, dass vor allem in den Versuchsreihen mit einer hydraulischen Belastung von 40 m³/h, die Ablaufkonzentrationen zum Teil oberhalb der des Zulaufs liegen. Bei der Auswertung dieser Messungen errechnen sich dadurch negative Eliminationsraten, wie in Tabelle 7-11 dargestellt.

Eine mögliche Ursache für die erhöhte Ablaufkonzentration an Gesamt-CSB kann ein Abtrieb der PAK aus der Pilotanlage sein. Im nachfolgenden wird auf dieses Thema näher eingegangen.

Eine Auflistung der einzelnen Messergebnisse sowie die CSB-Eliminationsraten stellt folgende Tabelle 7-11 dar. Die Daten beruhen auf den Messungen durch das externe Labor.

Tabelle 7-11: Mess- und Analysewerte der CSB Elimination

	Analytik externes Labor							
	Gesamt CSB				Gelöster CSB			
	Zulauf	**Ablauf**	**Ablauf (für Diagramm)**	**Elimination**	**Zulauf**	**Ablauf**	**Ablauf (für Diagramm)**	**Elimination**
	mg/l	**mg/l**	**mg/l**	**%**	**mg/l**	**mg/l**	**mg/l**	**%**
Versuchsreihe 1	33	< 15	7.5	77	33	< 15	7.5	77
	38	40	40	-5	39	< 15	7.5	81
	50	25	25	50	44	< 15	7.5	83
	35	< 15	7.5	79	32	< 15	7.5	77
	41	26	26	37	44	21	21	52
	40	19	19	53	25	< 15	7.5	70
	40	42	42	-5	37	20	20	46
			Medianwert	**50.00**			Medianwert	**76.56**
			Mittelwert	**40.67**			Mittelwert	**69.40**
Versuchsreihe 2	37	39	39	-5	39	32	32	18
	39	37	37	5	44	24	24	45
	19	19	19	0	20	< 15	7.5	63
	25	19	19	24	18	< 15	7.5	58
	31	22	22	29	21	17	17	19
			Medianwert	**5.13**			Medianwert	**45.45**
			Mittelwert	**10.55**			Mittelwert	**40.66**
Versuchsreihe 3	27	20	20	26	30	21	21	30
	25	27	27	-8	30	< 15	7.5	75
	51	71	71	-39	33	23	23	30
			Medianwert	**-8.00**			Medianwert	**30.30**
			Mittelwert	**-7.10**			Mittelwert	**45.10**
Versuchsreihe 4	43	56	56	-30	25	20	20	20
	48	42	42	13	52	19	19	63
	47	33	33	30	52	23	23	56
	30	< 15	7.5	75	26	< 15	7.5	71
	31	19	19	39	27	< 15	8	72
			Medianwert	**29.79**			Medianwert	**63.46**
			Mittelwert	**25.15**			Mittelwert	**56.52**

Zum Vergleich der einzelnen Versuchsreihen wurde der Mittelwert sowie der Median der Eliminationsraten berechnet. Wie zuvor beschrieben sind negative Eliminationsraten möglich, da der Gesamt-CSB im Ablauf aufgrund von PAK-Abtrieb größer ist als im Zulauf der Pilotanlage. Die Gründe hierfür können sowohl eine zu hohe PAK-Konzentration im System, eine zu geringe FHM bzw. FM Dosierung als auch eine zu hohe hydraulische Belastung sein.

Die nachfolgende Abbildung 7-11 visualisiert nochmals die in Tabelle 7-11 den Mittelwert der Eliminationsraten des Gesamt-CSB in Abhängigkeit der einzelnen Versuchsreihen.

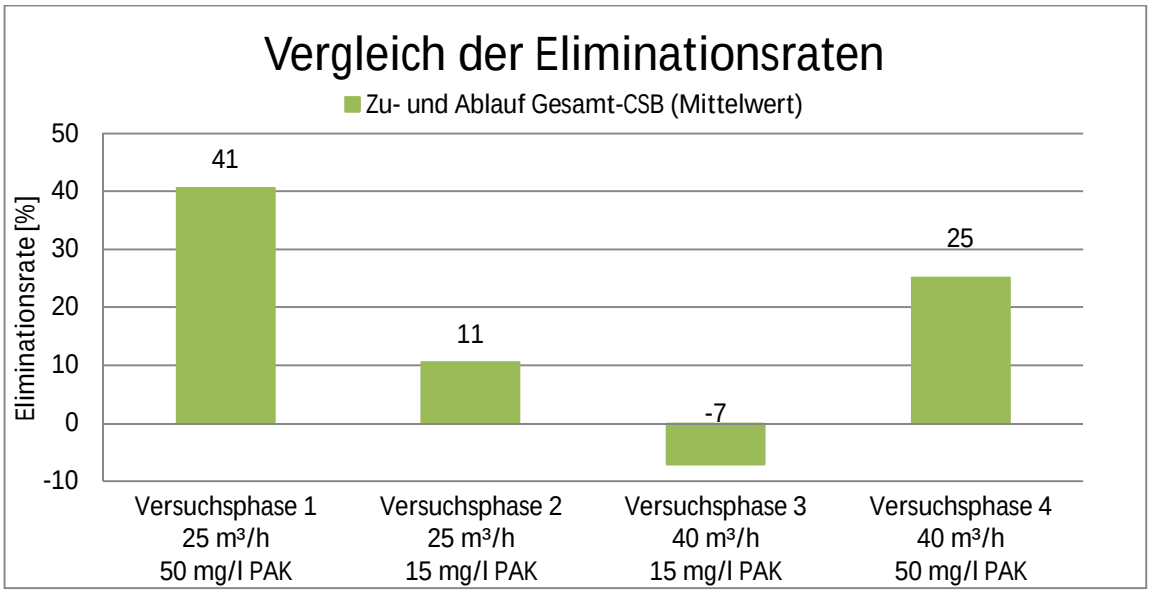

Abbildung 7-11: Eliminationsraten des Gesamt-CSB der einzelnen Versuchsreihen

Die Ergebnisse zeigen, dass die höchste Eliminationsrate mit ca. 41 % bei Versuchsreihe 1 vorlag. Dieses Ergebnis ist auf die Kombination aus dem geringem Zulaufstrom (25 m³/h) und der hohen PAK-Dosierung von 50 mg/l zurückzuführen. Mit einem Gesamtvolumen der Anlage von ca. 12,5 m³ ergibt das eine Verweilzeit der PAK von 30 min. Die zweitbeste Eliminationsrate mit ca. 25 % wurde in Versuchsreihe 4 erzielt. Der Unterschied zu Versuchsreihe 1 liegt in der höheren hydraulischen Belastung und der daraus resultieren kürzeren Verweilzeit. Die Versuchsreihe 3 weist das schlechteste Ergebnis mit einer Eliminationsrate von -7 % auf. Durch die niedrige PAK-Dosierung (15 mg/l) in Kombination mit einem hohen Zulaufstroms (40 m³/h) und der damit verbundenen geringen Verweilzeit von ca. 19 min ist eine geringe Eliminationsrate zu erwarten. Aufgrund des PAK-Abtrieb aus der Pilotanlage ist der Gesamt-CSB des Ablaufs höher als der des Zulaufs.

Die nachfolgende Abbildung zeigt die Eliminationsraten des gelösten CSB im Ablauf bezogen auf den Gesamt-CSB im Zulauf der Pilotanlage in Abhängigkeit der einzelnen Versuchsreihen:

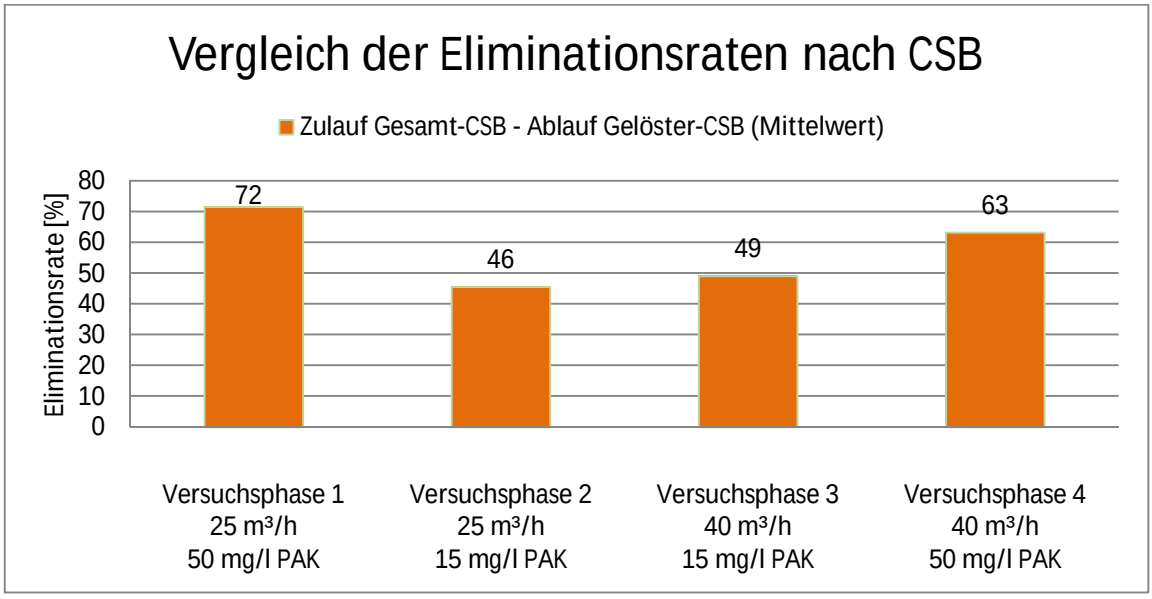

Abbildung 7-12: Eliminationsraten des CSB bezogen auf den Gesamt-CSB im Zulauf und den Gelösten-CSB im Ablauf - bezogen auf den Mittelwert der einzelnen Versuchsreihen

Die Ergebnisse zeigen, dass die höchste Eliminationsrate mit ca. 72 % bei Versuchsreihe 1 vorlag. Dieses Ergebnis ist deckungsgleich zu Abbildung 7-11 und ist auf die Kombination aus dem geringem Zulaufstrom (25 m³/h) und der hohen PAK-Dosierung von 50 mg/l zurückzuführen. Die zweitbeste Eliminationsrate mit ca. 63 % wurde ebenfalls in Versuchsreihe 4 erzielt. Die Versuchsreihe 2 weist das geringste Ergebnis mit einer Eliminationsrate von 46 % auf.

Die deutlich erhöhten Eliminationsraten aus der Bilanz von Gesamt-CSB und gelösten CSB gegenüber den Werten von ausschließlich Gesamt-CSB lassen sich auf die Filtration zurückführen. Als Konsequenz hieraus lässt sich ableiten, dass die erhöhten CSB Ablaufwerte bzw. die schlechten Eliminationsraten nahezu ausschließlich auf einen PAK-Abtrieb zurückzuführen sind.

Die Ergebnisse der vier Versuchsreihen zeigen, dass die Mengendosierung der PAK einen höheren Einfluss auf die Eliminationsrate aufweist als der Zulaufvolumenstrom. Sowohl in Versuchsreihe 1 mit 25 m³/h als auch in Versuchsreihe 4 mit 40 m³/h weisen die Eliminationsraten im Mittel ca. 63 bis 72 % auf und sind damit deutlich höher als die der beiden anderen Versuchsreihen mit der geringen PAK-Dosierung von 15 mg/l. Das bedeutet, dass die Verweilzeit einen geringeren Einfluss auf die Reduzierung des CSB-Wertes aufweist als die Höhe an PAK, die zudosiert wird.

Aufgrund dieser Problematik wurde ab Mitte der Versuchsreihe 2 ein Trommelfilter nachgeschaltet.

7.8.2 Abfiltierbare Stoffe (AFS) und Trommelfilter

Wie im vorangegangen Kapitel dargestellt, wird davon ausgegangen, dass ein erheblicher Anteil an Gesamt-CSB durch den Abtrieb von PAK hervorgerufen wird. Grundsätzlich gibt es unterschiedlichste Methoden, um Pulveraktivkohle im Ablauf einer Kläranlage zurückzuhalten. Im Rahmen der Pilotierung wurde auf einen Trommelfilter zurückgegriffen, welcher im Teilstromverfahren in den Ablauf der Pilotanlage implementiert wird. Dieser ist in Kapitel 5.4 beschrieben.

Wie bereits erläutert, erfolgt die Bilanzierung der PAK über die AFS, daher werden im Folgenden die abfiltrierbaren Stoffe über alle 4 Versuchsphasen betrachtet.

Durch den Einsatz von PAK können Abfiltrierbare Stoffe reduziert werden. Die Ergebnisse der Untersuchungen und Messungen zur Reduzierung der AFS sind in Abbildung 7-13 dargestellt.

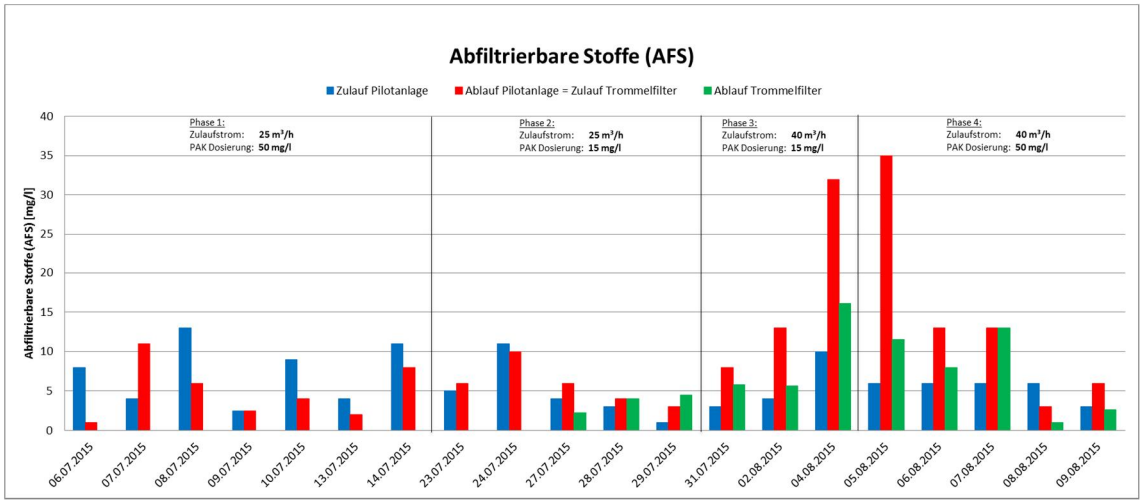

Abbildung 7-13: Abfiltierbare Stoffe

Das Diagramm stellt die Zu- und Ablaufkonzentrationen der AFS der Pilotanlage dar (blaue und rote Balken). Ab Mitte der Versuchsphase 2 wurde zusätzlich ein Trommelfilter dem Ablauf der Pilotanlage nachgeschaltet (grüner Balken).

Die Ergebnisse zeigen, dass in den Versuchsphasen 1 und 2, d.h. bei einem Zulaufvolumenstrom von 25 m³/h, die Zulaufkonzentration der AFS höher sind als die im Ablauf der Pilotanlage.

Bei 40 m³/h Zulaufvolumenstrom (Versuchsphasen 3 und 4) sind die Ablaufkonzentrationen der AFS höher als im Zulauf. Diese höheren Ablaufkonzentrationen im Ablauf der Pilotanlage sind darauf zurückzuführen, dass durch den höheren Zulaufvolumenstrom von 40 m³/h PAK in den Ablauf der Pilotanlage gelangt ist.

Durch den nachgeschalteten Trommelfilter werden die Konzentrationen von AFS im Ablauf jedoch wieder reduziert, so dass im Endeffekt eine Gesamtreduzierung von AFS zu verzeichnen ist.

AFS gegenüber CSB

Wie schon bereits in Kapitel 7.8.1 in Zusammenhang mit der Betrachtung des CSB dargestellt, wird deutlich, dass die Filtration der Abwasserprobe einen starken Effekt auf die zu erzielbare Eliminationsleistung und die Bilanzierung von CSB und Mikroschad-

stoffe hat. Wie durch die Differenz zwischen Abbildung 7-11 und Abbildung 7-12 erkennbar ist, kann durch den Einsatz des Filters die CSB Elimination um 35 % gesteigert werden.

Aus technischer Sicht ist daher die Implementierung einer Filtration nach der PAK-Anlage sinnvoll, um einerseits einen PAK-Abtrieb in die Vorflut zu verhindern und andererseits die Effekte der CSB Reduzierung zu nutzen.

8 ZUSAMMENFASSUNG

Pöyry errichtete im Zeitraum vom 06.07.2015 bis 09.08.2015 eine Pilotanlage auf der KA Herford. Ziel dieser Pilotierung war es, mittels Actiflo®Carb-Verfahren, Aussagen über die Reduzierung von Mikroschadstoffen und inerten Rest-CSB innerhalb dieser 4. Reinigungsstufe treffen zu können. In Abstimmung mit dem Betrieb wurden dazu vier verschiedene Versuchseinstellungen gewählt und während der Pilotierung durchgeführt. Dabei lagen die Unterschiede der Versuchsphasen maßgeblich in der Höhe der Dosiermenge an Pulveraktivkohle und der hydraulischen Beschickung der Pilotanlage. Jede der vier Versuchsphasen dauerte in etwa eine Woche.

Die Ergebnisse der vier Versuchsphasen hinsichtlich der Eliminierung von Mikroschadstoffen und Rest-CSB wurden im Anschluss ausgewertet und einander gegenübergestellt. Die betrachteten Mikroschadstoffe wurden zuvor durch ein Screening anhand der vorliegenden Konzentration im Abwasser ausgewählt und ermittelt.

Das Reinigungsziel gemäß Kompetenzzentrum für Mikroschadstoffe soll durch das Erreichen einer Elimination von rund 80 % der Mikroschadstoffe sichergestellt werden. Ein Vergleich der durchschnittlichen Eliminationsraten der ausgewählten Mikroschadstoffen in den vier Versuchsphasen zeigt, dass die angestrebten 80 % Elimination bereits bei einem Einsatz von 15 mg/l PAK und einer hydraulischen Belastung von 25 m³/h erreicht werden können. Versuchsphase 2 ist daher aufgrund des geringen und somit kostengünstigen Einsatzes von PAK bei gleichzeitiger Sicherstellung des Reinigungsziels die wirtschaftlichste Vorzugsvariante dieser Pilotierung. Höhere Eliminationsraten von bis zu 92% (in Versuchsphase 1) sind auch erzielbar, gehen aber mit höheren Kosten durch größere PAK-Dosiermengen einher und sind daher weniger wirtschaftlich.

Auch die Betrachtung der Eigenschaften der eingesetzten PAK über die vier Versuchsphasen führt zum gleichen Schluss. Bei der Bestimmung der Parameter PAK-Alter und PAK-Beladung ergibt sich, dass in Versuchsphase 2 die größte PAK-Beladung kg_{CSB}/kg_{PAK} erzielt werden kann. Die Absorptionseigenschaften der Aktivkohle können unter diesen Versuchseinstellungen bestmöglich ausgeschöpft werden.

Neben den Mikroschadstoffen werden in Anlehnung an die Eigenschaften der Aktivkohle die Paramater chemischer Sauerstoffbedarf (CSB) und abfiltiertbare Stoffe betrachtet und bewertet. Der Fokus wurde dabei auf die Implementierung einer Filtration gelegt. So konnte ermittelt werden, dass sich die Eliminationsraten von Gesamt-CSB (unfiltriert) zu gelöstem CSB (filtriert) durch Filtration um ca. 35% steigern lassen. Es kann somit nachgewiesen werden, dass die schlechteren Eliminationsraten im unfiltrierten Fall vorrangig auf einen Abtrieb von PAK im System zurückzuführen sind. Der Einbau einer Filtration kann daher als sinnvoll bewertet werden.

Als Ergebnis der gesamten Pilotierung und Auswertung der Versuchsergebnisse lässt sich festhalten, dass durch die Dosierung von 15 mg/l PAK und einer hydraulischen Belastung von 25 m³/h das Reinigungsziel von durchschnittlich 80% Elimination über die ausgewählten Mikroschadstoffe erreicht werden kann. Auch der inerte Rest-CSB kann um mindestens 45 % verringert werden. Die Implementierung eines Filters wird emp-

fohlen, da dies sowohl positiven Einfluss auf die Elimination des Rest-CSB als auch auf einen ungewollten Abtrieb an PAK aus dem System hat.

LITERATURVERZEICHNIS

ABEGGLEN, C. (2013): *VSA-Plattform "Verfahrenstechnik Mikroverunreinigungen" – Aktivkohle*, veröffentlicht unter: http://www.micropoll.ch/verfahren/aktivkohle/pak/betriebenergiekosten, eingesehen am 09.09.2013

ABEGGLEN C., SIEGRIST H. (2012): *Mikroverunreinigungen aus kommunalem Abwasser - Verfahren zur weitergehenden Elimination auf Kläranlagen*, Bundesamt für Umwelt, Bern, 2012

ABEGGLEN, C., ESCHER B., HOLLENDER, J., KOEPKE, S., ORT, C., PETER, A., SIEGRIST, H., VON GUNTEN, U., ZIMMERMANN, S, KOCH, M., NIEDERHAUSER, P., SCHÄRER, M., BRAUN, C., GÄLLI, R., JUNGHANS, M., BROCKER, S., MOSER, R., RENSCH, D. (2009):*Ozonung von gereinigtem Abwasser*, Schlussbericht Pilotversuch Regensdorf, Eawag, AWEL ZH, BAFU, BMG Engineering, Hunziker Betatech AG, Dübendorf / Zürich / Bern / Schlieren / Winterthur, 2009

Alpha Umwelttechnik AG (2012): *Untersuchung zur Elimination von Mikroverunreinigungen aus kommunalem Abwasser mittels PAK in einem Actiflo®-Carb und durch Ozon auf der ARA Schönau, Cham (GVRZ)*, Technologieförderungsprojekt, Alpha Umwelttechnik AG, 2012.

Arge „Forschung Spurenstoffe NRW“ – MIKROFlock (2012): *Projekt Nr. 5: Ertüchtigung kommunaler Kläranlagen, insbesondere kommunaler Flockungsfiltrationsanlagen durch den Einsatz von Aktivkohle*, xxx, 2012, Abschlussbericht zum Forschungsvorhaben AZ IV+7+042 600 001E, Aachen / Wuppertal, 2012

ATEMIS GmbH (2011): *Spurenstoffelimination mittels Aktivkornkohle im Ablauf des Klärwerks Gütersloh-Putzhagen*. Konzeptstudie, September 2011

aquaconsult Ingenieur GmbH (2004): *Anlagentechnischen Untersuchung zur Herkunft schwer abbaubarer CSB-Verbindungen*, Studie, 2004

Bergische Universität Wuppertal (2008): *Entwicklung und Erprobung einer kathodischen Nano-Filtrations-membran für die reduktive Behandlung und Filtration von wasserunlöslichen Farbstoffen und Farbpigmenten zur Aufbereitung von Textilabwasser mit dem Ziel der Wasserkreislaufführung sowie dem Nachweis der Abbauprodukte aus der aufeinanderfolgenden reduktiven und oxidativen Behandlung farbiger Abwässer (Projekt REDUCOL)*. Bergische Universität Wuppertal, Fachbereich C und D, Analytische Chemie, Sicherheitstechnik/Umweltchemie, 2008

Bergische Universität Wuppertal (2007): *Prozessanalyse und Untersuchung der Möglichkeiten produktionsintegrierter Umweltschutzmaßnahmen mit dem Ziel der Gewässerentlastung am Beispiel der Textilveredlung*. Forschungsprojekt, Bergische Universität Wuppertal, Fachbereich D, Abteilung Sicherheitstechnik, Fachgebiet Sicherheitstechnik/Umweltchemie, 2007

BOLLE, F. W., PINNEKAMP, J., ZIMMERMANN, G., JAGEMANN, P., THÖLE, D. (2011): *Aktenzeichen V-7-042 600 003 Energiebedarf von Verfahren zur Elimination von organischen Spurenstoffen - Phase I*, Forschungsinstitut für Wasser- und Abfallwirtschaft (FiW) e.V. an der RWTH Aachen, Institut für Siedlungswasserwirtschaft der RWTH Aachen, Pöyry Deutschland GmbH, Emschergenossenschaft / Lippeverband, Ruhrverband, Aachen / Essen, 2011

VAN CLEWE, B.: *Abwässer der Textilindustrie/Wollverarbeitung und Nahrungsmittelindustrie*, Konferenz-Einzelbericht (B-3), Colloquium Produktintegrierter Umweltschutz, 1997

VAN CLEWE, B., MARZINKOWSKI, M. (1999):*Innerbetriebliche Abwasserteilstrombehandlung mit einem Membranverfahren zur Schließung von Wasserkreisläufen*, Gerhard van Clewe GmbH & Company KG, 1999

DAHLEM Beratende Ingenieure GmbH & Co. Wasserwirtschaft KG (2012): *Studie zur Spurenstoffelimination auf dem Gruppenklärwerk Paderborn-Sande*, Abschlussbericht, Essen, 2012

EAWAG (2010): *Einsatz von Pulveraktivkohle zur Elimination von Mikroverunreinigungen aus kommunalem Abwasser*, Eawag - Eidgenössische Anstalt für Wasserversorgung, Abwasserreinigung und Gewässerschutz, Wasserforschungs-Institut des ETH-Bereichs, Dübendorf, Schweiz, September 2010

GASSEN, M (2000).: *Prozeßstabilität und Kosten der Biofiltration am Beispiel der Kläranlage Herford*, 18. Bochumer Tagung, Hydro-Ingenieure GmbH, Düsseldorf, 2000

GROMBACH, P.; HABENER, K.; MERKL, G.; TRÜEB, E.U. (2000): *Handbuch der Wasserversorgungstechnik*, 3.Auflage, München, 2000, ISBN 3-486-26394-3

Grontmij GmbH (2012): *Einbindung einer Anlage zur Spurenstoffelimination mittels Aktivkohle in die Abwasserfiltration der Kläranlage Neuss Ost*, Machbarkeitsstudie, 2012

GROßLINDEMANN, F. (2013): Ozonung zur Mikroschadstoff- und CSB-Elimination auf der Kläranlage Herford, Bachelorarbeit am Lehrstuhl für Siedlungswasserwirtschaft und Umwelttechnik der Ruhruniversität Bochum, Essen, 2013

GRÜNEBAUM, T., HERBST, H., KEYSER, C., LYKO, S., TÜRK, J. (2012): *Elimination von Keimen und Bakterien in kommunalen Kläranlagen Mikroschadstoffelimination mit Ozon: Beispiele für Kläranlagen*, 2. Fachsymposium Mikroschadstoffe.NRW, Düsseldorf, 21.06.2012

GRÜNEBAUM, T.(2011): Untersuchungs- und Entwicklungsvorhaben im Bereich Abwasser zum Themenschwerpunkt - Elimination von Arzneimitteln und organischen Spurenstoffen: Entwicklung von Konzeptionen und innovativen, kostengünstigen Reinigungsverfahren - Schlussbericht Phase 1 „Elimination von Arzneimittelrückständen in kommunalen Kläranlagen“, gerichtet an das MKULNV NRW, Vergabenummer 08-058/1, Bezug: IV-7-042 600 001F, 2011

Herforder Abwasser GmbH (1999): *Kläranlage Herford*, Infobroschüre, Herford, 1999

Hochschule Ostwestfalen-Lippe (2013): *Bericht über die Durchführung von Becherglasversuchen zur Aufnahme von adsorptionsisothermen verschiedener Aktivkohlen mit Abwasser aus dem Ablauf der Kläranlage Herford*, Labor für Siedlungswasserwirtschaft, Hochschule Ostwestfalen-Lippe, Detmold, Juli 2013

Hollender, J. (2009): *Kontinuierliche Entfernung von Spurenstoffen aus Abwasser mit Ozon: Vorstellung einer Pilotstudie und Auswahl biologischer und chemischer Methoden zur Beurteilung der Eliminationseffizienz*, 22. Berliner Wasserwerkstatt Kolloquium des Kompetenzzentrums Wasser Berlin Entfernung von anthropogenen Spurenstoffen aus dem urbanen Wasserkreislauf - Vorstellung und Diskussion von technischen Optionen, Berlin, 30.06.2009

Hydro-Ingenieure GmbH (1994a): *Neubau der Abwasserreinigung der Kläranlage Herford*, Band 1 Erläuterungsbericht, Düsseldorf, 1994

Hydro-Ingenieure GmbH(1994b): *Neubau der Abwasserreinigung der Kläranlage Herford*, Band 2 Klärtechnische Berechnung, Düsseldorf, 1994

IVASHECHKIN, P. (2006): *Elimination organischer Spurenstoffe aus kommunalem Abwasser*, Dissertation, Rheinisch-Westfälischen Technischen Hochschule Aachen, 2006

KIEßLING, A., MATTHES, M. (1992):*Textil-Fachwörterbuch*, Schiele & Schön Verlag, 1992

Knollmann GmbH (2013): *Ertüchtigung der Zentralkläranlage Rietberg zur Elimination von Spurenstoffen*, Machbarkeitsstudie, Ingenieurgesellschaft Dr. Knollmann mbH, 2013

KÜMMERER, K. (2010): *Neuartige Spurenstoffe im Wasser*, Hydrologie und Wasserbewirtschaftung, Heft 6, 349-359

KURZMANN, G.E.; FEUERSTACKE, E.; GILBERT, E.; HOELSCHER, W.B.; LEITZKE, O.; MEULI, K.; REICHELT, W.; ROENNEFAHRT, K.W.; SCHWARZ, K.; SMODIS, C.; SUPPAN, F.; VOß, K; WABNER, D. (1984): *Ozonanwendungen in der Wasseraufbereitung*, 1. Auflage, Grafenau, 1984, ISBN 3-88508-918-1

LAWA (2005): *Leitlinien zur Durchführung dynamischer Kostenvergleichsrechnungen (KVR-Leitlinien) in der Wasserwirtschaft / KVR-Leitlinien*, LAWA-Unterausschuss Wirtschaftlichkeitsfragen (Hrsg.), Berlin, 2005

LE GOAZIOU, Y (2011): *Pilotversuch ActifloCarb, Vorstellung und Ergebnisse*, Alpha Umwelttechnik, Präsentation im Rahmen der VSA / Swisssmem Fachtagung, 24.06.2011

Mertsch, V., Herbst, H., Schäfer, S. (2012): *Kosten zur Reduzierung der Gewässerbelastung in NRW Ergebnisse eines F+E Projektes zum Thema: Betriebs- und volkswirtschaftliche Kosten bei der Elimination von Mikroschadstoffen bei der kommunalen Abwasserbehandlung mittels Aktivkohle und Ozon*, 2. Fachsymposium Mikroschadstoffe.NRW, Düsseldorf, 21.06.2012

METZGER (2010): *Einsatz von Pulveraktivkohle zur weitergehenden Reinigung von kommunalem Abwasser*, Oldenburg Industrieverlag München, Berlin, 2010

METZGER, S.; Kapp, H. (2005): *Aktivkohlebehandlung von biologisch gereinigtem Abwasser im Klärwerk Steinhäule*. DWA Landesverbandstagung Baden Württemberg, Friedrichshafen, 2005

MIELCKE, J., MEYER C. (2013): *Laborbericht Projekt: 13N0209 KA Herford*, Xylem Water Solutions GmbH, Herford, 2013

OWL Umweltanalytik GmbH (2011): *Untersuchungsbefund, Zentralkläranlage Herford*, Prüfbericht, OWL Umweltanalytik GmbH, 20.05.2011

OWL Umweltanalytik GmbH (2012): *Untersuchungsbefund, Zentralkläranlage Herford*, Prüfbericht, OWL Umweltanalytik GmbH, 28.06.2012

PINNEKAMP, J.; MERKEL, W. (2008): *Senkung des Anteils organischer Spurenstoffe in der Ruhr durch zusätzliche Behandlungsstufen auf kommunalen Kläranlagen – Güte-und Kostenbetrachtung*, Abschlussbericht zum Forschungsvorhaben des Ministeriums für Umwelt und Naturschutz, Landwirtschaft und Verbraucherschutz NRW, MUNLV, 2008

ROSENWINKEL, K.-H. (2004): *Untersuchungen zur Abwasserzusammensetzung sowie zur Leistungsfähigkeit des Filtermaterials auf der KA Herford*, Bericht, Institut für Siedlungswasserwirtschaft und Abfalltechnik der Leibniz Universität Hannover (ISAH), September 2004

ROSENWINKEL, K.-H. (2007): *Bericht zur Untersuchung zu erhöhten CSB-Ablaufwerten der KA Herford*, Bericht, Institut für Siedlungswasserwirtschaft und Abfalltechnik der Leibniz Universität Hannover (ISAH), Januar 2007

SAAKE, M. (2005): *Kläranlage Herford Anlagenspezifische Untersuchungen zur Herkunft schwer abbaubarer CSB-Verbindungen*, Aqua Consult Ingenieur GmbH, Hannover

SCHÄFER, S., SIEVERS, M. (2006): *Schlammbehandlung mit Ozon – Übersicht von Anwendungen und zukünftiges Optimierungspotential*, Chemie Ingenieur Technik, Nr. 78, 1224

SCHMITT, C.K.: *Möglichkeiten zur Entfernung polarer organischer Spurenstoffe*, Forum Wasseraufbereitung 2006, Karlsruhe, 21.11.2006

SIEGRIST, H. (2013): *Energieverbrauch für die weitergehene Spurenstoffelimination - Maßnahmen zur Reduktion*, 31. Bochumer Workshop Klimaschutz und Energiewende Welchen Beitrag liefert der Abwassersektor, Bochum, 05.09.2013

TCHOBANOGLOUS, G., BURTON, F.L., STENSEL, H.D (2003): *Wastewater Engineering*, 4. Auflage, New York, 2003, ISBN 0-07-041878-0.

STOWA (2009):*Nageschakeldezuiveringstechniekenop de AWZI Leiden Zuid-West – Verkenningactief-kooladsorptie en geavanceerdeoxidatietechnieken*, Rapport 33, ISBN: 978.90.5773.453.3, StichtingToegepastOnderzoekWaterbeheer, Amersfoort, Niederlande, 2009

TRAUTER, J. (1999):*Modifikation textiler Prozesse sowie Einsatz neuer und verbesserter Verfahren zur Eliminierung von Laststoffen aus dem Abwasser der Textilveredelung*, Abschlussbericht zum Deutsch-Brasilianischen Gemeinschaftprojekt, Institut für Textil- und Verfahrenstechnik, Denkendorf, 1999

TU Dortmund (2008): *Untersuchungen zum Eintrag und zur Elimination von gefährlichen Stoffen in kommunalen Kläranlagen - Phase 3*. Abschlussbericht. Technische Universität Dortmund, Fakultät Chemie- und Bioingenieurwesen, Lehrstuhl Umwelttechnik, März 2008

VeoliaWater Solutions & Technologies (): *Actiflo ® Mikrosandunterstützte Flockung und Sedimentation*, http://www.vws-aquantis.com/aquantis/ressources/documents/1/4781,Actiflo.pdf, eingesehen am 19.07.2013

VeoliaWater Solutions & Technologies (): *Actiflo®Verfahren*, http://www.vws-aquantis.com /de/loesungen/Actiflo/, eingesehen am 19.07.2013

Verband Schweizer Abwasser- und Gewässerschutzfachleute (2013): *Plattform Mikroverunreinigungen – Reaktionsprodukte der Ozonung*,
veröffentlicht unter: http://www.micropoll.ch/fileadmin/user_upload/Redaktion/Dokumente/ Ozonung_Reaktionsprodukte.pdf, eingesehen am 01.08.2013

Westfälisches Umwelt Zentrum (2013): *Ergebnisse eines Säulenversuches mit Kornaktivkohle und einem Kläranlagenablauf zur Bestimmung der erzielbaren Restkonzentration und der Adsorptionskapazität für den Parameter CSB*, Westfälisches Umwelt Zentrum, Höxter, September 2013

WILHELM, S (2008): *Wasseraufbereitung*, 7.Auflage, Trier, 2008, ISBN 978-9-540-25163-7

GESETZE UND RICHTLINIEN

COM (2011) 876: *Vorschlag für eine RICHTLINIE DES EUROPÄISCHEN PARLAMENTS UND DES RATES zur Änderung der Richtlinien 2000/60/EG und 2008/105/EG in Bezug auf prioritäre Stoffe im Bereich der Wasserpolitik*, Europäische Kommission, i.d.F. vom 31.01.2012

OGewV: *Verordnung zum Schutz der Oberflächengewässer (Oberflächengewässerverordnung - OGewV)*, Bundesministeriums der Justiz, i.d.F. vom 20.07.2011

RICHTLINIE 2008/105/EG: *Richtlinie über Umweltqualitätsnormen im Bereich der Wasserpolitik und zur Änderung und anschließenden Aufhebung der Richtlinien des Rates 82/176/EWG, 83/513/EWG, 84/156/EWG, 84/491/EWG und 86/280/EWG sowie zur Änderung der Richtlinie 2000/60/EG*,
das Europäische Parlament und der Rat der Europäischen Union, i.d.F. vom 16.12.2008

TABELLEN- UND BILDVERZEICHNIS

8.1 Tabellenverzeichnis

Tabelle 2-1: Allgemeine Anlagenkenndaten Kläranlage Herford 7
Tabelle 3-1: Kostenvergleichrechnung nach LAWA 12
Tabelle 5-1: Systemleistungen der Actiflo®Carb-Anlage 20
Tabelle 5-2: Behältervolumen der Actiflo®Carb-Anlage 20
Tabelle 6-1: Versuchsprogramm der Actiflo®Carb-Anlage 25
Tabelle 6-2: untersuchte Parameter: Eigenanalytik 29
Tabelle 6-3: untersuchte Parameter: externes Labor 29
Tabelle 6-4: Untersuchte Mikoschadstoffe inkl. zugehöriger Stoffgruppe 30
Tabelle 7-1: Ermittlung PAK-Alter 37
Tabelle 7-2: PAK-Beladung in Bezug auf den gelösten CSB (Eigenanalytik) 38
Tabelle 7-3: Gegenüberstellung von berechneten Parametern 39
Tabelle 7-4 Zulaufkonzentrationen in µg/l der untersuchten Mikroschadstoffe zur Pilotanlage 40
Tabelle 7-5: Zu- und Ablaufkonzentrationen sowie Eliminationsraten der einzelnen Röntgenkontrastmittel über den gesamten Versuchszeitraum 46
Tabelle 7-6: Zu- und Ablaufkonzentrationen der Industriechemikalien über den gesamtenVersuchszeitraum 48
Tabelle 7-7 Zu- und Ablaufkonzentrationen der Schmerzmittel über den Versuchszeitraum 50
Tabelle 7-8 Zu- und Ablaufkonzentrationen der Betablocker über den Versuchszeitraum 51
Tabelle 7-9 Zu- und Ablaufkonzentrationen der Antibiotika, Antiepileptike,Psychopharmaka und Lipidsenker über den Versuchszeitraum 52
Tabelle 7-10: Elimination 6 ausgewählter Leitparametern 54
Tabelle 7-11: Mess- und Analysewerte der CSB Elimination 56

8.2 Abbildungsverzeichnis

Abbildung 2-1: Schemaplan, Kläranlage Herford [Quelle: Hydro Ingenieure, 2000] 8
Abbildung 3-1: Mögliche Einbindung einer PAK-Anlage in eine Kläranlage 11
Abbildung 3-2: Möglicher Aufbau eine PAK-Anlage als Actiflo®-Carb auf der KA Herford 11
Abbildung 4-1: Verfahrensschema des Actiflo-Carb-Verfahrens [Quelle: Veolia Water Solutions & Technologies] 14
Abbildung 4-2: TURBOMIX™ aus Pilotanlage 15
Abbildung 4-3: Draufsicht auf Lamellenabscheider aus Pilotanlage (links), Klarwasserüberlauf mit Zackenwehr (rechts) 15
Abbildung 4-4: Hydrozyklon aus Pilotanalge 16
Abbildung 4-5: Schlammaustrag in Pilotanlage 16
Abbildung 5-1: Fließschema der Pilotanlage 18
Abbildung 5-2: Zulaufpumpstation auf mobilen Rollwagen 19
Abbildung 5-3: Trailer der Actiflo®Carb-Anlage 19
Abbildung 5-4: Lager- und Dosiersystem AK-DOSxs für die PAK-Anlage 21
Abbildung 5-5: PAK-Dosiersystem AK-DOS 22
Abbildung 5-6: Trommelfilter HDF501-1FP der Firma Hydrotech 23
Abbildung 5-7: Spritzdüsen zur Selbstreinigung der Filterfläche 23
Abbildung 5-8: Funktionsprinzip eines Trommelfilters [Quelle: http://www.water-proved.de/de/Downloads/Hydroetch_Downloads/Brochure-HDF-DE-080415.pdf] 24
Abbildung 6-1: Darstellung des Versuchaufbaus des JAR-Tests während der Inbetriebnahme der Pilotanlage zur Optimierung der Dosiermenge an FM und FHM 26
Abbildung 6-2 Filtrierstation mit Edelstahl-Filtrationsgerät 31
Abbildung 6-3: Aufbau Filtrationsgerät 32
Abbildung 6-4: Darstellung Küvetten-Test 32
Abbildung 6-5: Proben aus Kontakttank (links) und Rücklauf (rechts) 33
Abbildung 6-6 Trübungsmessgerät 2100N der Firma HACH Lange 34
Abbildung 6-7: Multimeter Multiline P4 34
Abbildung 7-1: PAK-Konzentration 36
Abbildung 7-2 Elimination von Benzotriazol 41
Abbildung 7-3: Elimination von Diatrizoat (Amidotrizoat) 42
Abbildung 7-4: Elimination von Iomeprol 42
Abbildung 7-5: Elimination von Iopamidol 43
Abbildung 7-6: Elimination von Diclofenac 43

Abbildung 7-7 Elimination von Metoprolol 44
Abbildung 7-8: Eliminationsraten von 6 ausgewählten Mikroschadstoffen 45
Abbildung 7-9: Eliminationsraten nach Stoffgruppen 53
Abbildung 7-10: Chemischer Sauerstoffbedarf (CSB) über den gesamten Versuchszeitraum 55
Abbildung 7-11: Eliminationsraten des Gesamt-CSB der einzelnen Versuchsreihen 57
Abbildung 7-12: Eliminationsraten des CSB bezogen auf den Gesamt-CSB im Zulauf und den Gelösten-CSB im Ablauf - bezogen auf den Mittelwert der einzelnen Versuchsreihen58
Abbildung 7-13: Abfiltierbare Stoffe 59