



Stadtentwässerungsbetrieb
Landeshauptstadt Düsseldorf

RUHR-UNIVERSITÄT BOCHUM
Fakultät für Bau- und
Umweltingenieurwissenschaften
Lehrstuhl für Siedlungswasserwirtschaft
und Umwelttechnik
Prof. Dr.-Ing. M. Wichern



Abschlussbericht

Elimination organischer Spurenstoffe aus kommunalem Abwasser unter Einsatz reaktiver Pulveraktivkohle aus Trinkwasserwerken

Düsseldorf, Juli 2014

Im Auftrag des

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



Projektbearbeitung

Stadtentwässerungsbetrieb Düsseldorf (SEBD)

Dr. Bernd Pehl, Tec. Eng. Thomas Bendt

Ruhr-Universität Bochum (RUB)

Dipl.-Ing. Karen Clausen, Dr.-Ing. Manfred Lübken, Dr.-Ing. Marc Wichern

Institut für Energie- und Umwelttechnik e.V. Duisburg (IUTA)

MSc. Andrea Börgers, Dr. Jochen Türk

Projektbeteiligung

Stadtwerke Düsseldorf AG

Dr. Norbert Konradt

Dr. Hans-Peter Rohns

Kurzfassung

Innerhalb des Forschungsvorhabens wurde das Eliminationsverhalten von thermisch regenerierter Pulveraktivkohle aus dem Wasserwerk Düsseldorf-Holthausen gegenüber ausgewählten Mikroverunreinigungen im kommunalen Abwasser untersucht. Die Versuchsdurchführung erfolgte mittels Pulveraktivkohledosierung (10 und 20 mg_{PAK}/L) direkt in die Nitrifikationsstufe einer halbtechnischen Versuchskläranlage auf dem Gelände des Klärwerks Düsseldorf-Süd, die aus zwei voneinander unabhängigen, parallelen, baugleichen Reinigungsstraßen besteht. Ergänzend wurden die Auswirkungen der Aktivkohledosierung auf die nachfolgenden Schlammbehandlungsstufen, Faulung und Entwässerung, betrachtet.

Vorab wurde die Aufenthaltszeitverteilung von Mikroverunreinigungen in der halbtechnischen Anlage anhand von Tracerversuchen für verschiedene Zulauf- und Betriebsszenarien nachgebildet. Auf dieser Basis wurde mithilfe eines mathematischen Modells eine optimale Probenahmestrategie erarbeitet. Für eine Bewertung der Spurenstoffeliminationsleistung erwies sich die zeitgleiche Entnahme mengenproportionaler 72-Stunden-Mischroben in Zu- und Ablauf der Anlage als sinnvollste Variante, da in diesem Fall die Wiederfindungsrate im Ablauf am höchsten ist.

Die Ergebnisse der Spurenstoffanalytik zeigten, dass bereits bei einer direkten Dosierung von 10 mg_{PAK}/L in die Belebung der Teststraße eine signifikant bessere Elimination der Stoffe Carbamazepin ($59 \pm 9 \%$), Diclofenac ($57 \pm 9 \%$) und Metoprolol ($65 \pm 11 \%$) im Vergleich zur Referenzstraße (Carbamazepin: $19 \pm 10 \%$, Diclofenac: $42 \pm 12 \%$, Metoprolol: $27 \pm 4 \%$) erzielt werden konnte. Für Benzotriazol ($70 \pm 13 \%$) und Sulfamethoxazol ($43 \pm 18 \%$) ergab sich hingegen keine deutliche Steigerung der Elimination gegenüber der Referenzanlage (Benzotriazol: $66 \pm 14 \%$, Sulfamethoxazol: $40 \pm 15 \%$). Durch eine Erhöhung der PAK-Dosierung auf 20 mg_{PAK}/L konnten keine signifikanten Verbesserungen erzielt werden.

Die Untersuchungen zur Auswirkung der PAK-Dosierung auf die verschiedenen Stufen der Schlammbehandlung ergaben für die gesamte Betriebsdauer der Anlage eine Verbesserung des Schlammvolumenindexes auf im Mittel 122 mL/g_{TS}. Der Wert lag somit um 19 mL/g_{TS} geringer als der mittlere ISV der Referenzstraße. Labormaßstäbliche Entwässerungsversuche zeigten keine Unterschiede zwischen den Schlämmen beider Reinigungsstraßen auf.

Die Ergebnisse der anaeroben Batchversuche zum Verhalten der Mikroverunreinigungen in der Schlammfaulung zeigten für Benzotriazol, Diclofenac und Carbamazepin Konzentrationserhöhungen in der Wasserphase, wobei unklar bleibt, ob es sich um eine Rücklösung infolge Hydrolyse der Biomasse oder um eine tatsächliche Rücklösung über die PAK handelt. Die Konzentration von Sulfamethoxazol lag im Gegensatz zu den genannten Spurenstoffen nach den anaeroben Versuchen unter der Bestimmungsgrenze, so dass von einem vollständigen Abbau oder einer vollständigen Metabolisierung dieser Substanz ausgegangen werden kann. Die Metoprololkonzentration wurde in den Versuchen nur geringfügig erhöht.

Inhaltsverzeichnis

Kurzfassung	3
Inhaltsverzeichnis	I
Abbildungsverzeichnis	III
Tabellenverzeichnis	VI
Abkürzungs- und Symbolverzeichnis	VIII
1 Projektübersicht	1
1.1 Hintergrund und Aufgabenstellung	1
1.2 Versuchsabschnitte und durchgeführte Untersuchungen	2
2 Grundlagen	4
2.1 Eigenschaften von Belebtschlamm	4
2.1.1 Absetzverhalten	4
2.1.2 Entwässerungsverhalten	6
2.1.3 Verhalten im anaeroben Milieu	8
2.2 Aktivkohle	8
2.2.1 Herkunft	8
2.2.2 Eigenschaften	11
2.3 Betrachtete Mikroverunreinigungen	11
2.3.1 Diclofenac	11
2.3.2 Carbamazepin	11
2.3.3 Sulfamethoxazol	12
2.3.4 Benzotriazol	12
2.3.5 Metoprolol	12
2.3.6 Eliminationsleistungen aus der Literatur	13
3 Material und Methoden	15
3.1 Aufbau und Betrieb der Versuchsanlage	15
3.2 Analysemethoden	18
3.2.1 Routineanalytik	18
3.2.2 Mikroskopie	20
3.2.3 Spurenstoffanalytik	20
3.2.4 Reproduzierbarkeit der Schlammanalytik	24
3.3 Absetzversuche	26
3.3.1 Belebtschlamm der halbtechnischen Versuchsanlage	26

3.3.2	Aktivkohledosierung zum Belebtschlamm des Großklärwerkes Düsseldorf-Süd 26	
3.4	Entwässerungsversuche	27
3.5	Anaerobe Batchversuche zum Desorptionsverhalten	29
3.5.1	Erste Desorptionsuntersuchungen im anaeroben Milieu.....	29
3.5.2	Desorptionsversuche unter realen Trockenmassekonzentrationen.....	31
3.6	Mathematische Simulation	32
3.6.1	Tracerversuche	32
3.6.2	Simulation	35
4	Ergebnisse und Dokumentation	37
4.1	Arbeitspaket 1: Eliminationsleistung	37
4.1.1	Begleitparameter	37
4.1.2	Spurenstoffelimination.....	48
4.2	Arbeitspaket 2: Absetzeigenschaften	52
4.2.1	Beobachtungen	52
4.2.2	Ergebnisse und Auswertung.....	53
4.3	Arbeitspaket 3: Entwässerungseigenschaften	61
4.3.1	Zentrifugation	61
4.3.2	Kapillare Fließzeit.....	68
4.4	Arbeitspaket 4: Anaerobe Batchversuche.....	69
4.4.1	Erste anaerobe Batchversuche zum Desorptionsverhalten	69
4.4.2	Ergebnisse der Versuche unter realen Trockenmassekonzentrationen	76
4.5	Arbeitspaket 5: Mathematische Simulation.....	82
4.5.1	Ergebnisse der Tracerversuche	82
4.5.2	Simulationsergebnisse	84
5	Sonstige Erkenntnisse und Auffälligkeiten	92
6	Öffentlichkeitsarbeit	93
7	Schlussfolgerungen und Gesamtbetrachtung	94
8	Literaturverzeichnis.....	96
Anhang	102

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Absetzverhalten des belebten Schlammes im Standversuch nach Pflanz, 1966 (DWA, 2006)	5
Abbildung 2: Trinkwasseraufbereitung im Wasserwerk Holthausen nach dem Düsseldorfer Verfahren	8
Abbildung 3: Schema der Reaktivierungsanlage für die Aktivkohle des Wasserwerks Holthausen	9
Abbildung 4: Trockenbeete im Wasserwerk Düsseldorf-Holthausen.....	10
Abbildung 5: Prozentuale Entfernung ausgewählter Pharmaka mithilfe reaktivierter PAK aus der wässrigen Phase	10
Abbildung 6: Fließschema einer Reinigungsstraße der halbtechnischen Versuchsanlage	15
Abbildung 7: Ansicht der Versuchsanlage	15
Abbildung 8: Gradienten der verwendeten Analysenmethode am Q Trap 3200 System	22
Abbildung 9: Gradienten der verwendeten Analysenmethode am API 3000 System	22
Abbildung 10: Auswertung der Standardaddition durch Auftragung der Konzentrationen gegen die ermittelten Peakflächen mit linearer Regressionsgeraden, Geradengleichung und Bestimmtheitsmaß.....	24
Abbildung 11: links: Versuchsaufbau PAK-Dosiersversuche mit Belebtschlamm des Klärwerks Düsseldorf-Süd, Mitte: Belüftungsphase, rechts: Absetzphase während der Versuchsdurchführung	27
Abbildung 12: Heraeus Multifuge X3 F	28
Abbildung 13: Versuchsanlage zum anaeroben Batchversuch zur Prüfung des Desorptionsverhaltens von Spurenstoffen im anaeroben Milieu	32
Abbildung 14: Kalibriergerade zur Bestimmung der Salzkonzentration aus Leitfähigkeitsmessungen (links) (Böckmann, 2014) und Ermittlung einer geeigneten Wellenlänge zur Bestimmung der Extinktion im Photometer für Dragocolor (Uranin) (rechts)	33
Abbildung 15: Lösen des Tracers in Wasser und Einspeisung in die Versuchsanlage.....	34
Abbildung 16: Proben aus dem Ablauf der Nachklärung zur Bestimmung der Uraninkonzentration	35
Abbildung 17: links: Tagesgang des Zuflussvolumenstromes der Versuchskläranlage Düsseldorf, rechts: Simulierter Tagesgang eines Spurenstoffs im Zulauf der Versuchskläranlage, Düsseldorf (nach Langergraber et al., 2008).....	36
Abbildung 18: Links: <i>Aeolosoma</i> sp.; Rechts: <i>Nais</i> sp.	37
Abbildung 19: Vergleich der Belebtschlammbiozönosen mit dem Sörensen-Index.....	38
Abbildung 20: Ganglinien der Trockensubstanzgehalte während der gesamten Versuchszeit	39
Abbildung 21: Schlammvolumenindexentwicklung in den beiden Belebungsstufen	40
Abbildung 22: <i>Daphnia</i> sp. in Originaldichte im Nachklärbecken der Testanlage 2 (Beispielaufnahme)	41
Abbildung 23: TOC-Ganglinien über den gesamten Versuchszeitraum im Vergleich beider Anlagenabläufe	41

Abbildung 24: TOC-Eliminationsleistung über den gesamten Versuchszeitraum	42
Abbildung 25: Stickstoff-Ganglinien über den gesamten Versuchszeitraum im Vergleich beider Anlagenabläufe.....	43
Abbildung 26: Stickstoff-Eliminationsleistung über den gesamten Versuchszeitraum	43
Abbildung 27: Gesamtphosphorganglinien des Zulaufes und der Abläufe im Vergleich.....	45
Abbildung 28: Darstellung der unregelmäßigen Gesamtphosphatelimination	45
Abbildung 29: Abfiltrierbare Stoffe im Versuchsverlauf ab September 2013 bis zum 31.01.2014	46
Abbildung 30: Veranschaulichung der Absetzprozesse während der Versuchsdurchführung: links Referenzstraße, rechts Teststraße	53
Abbildung 31: Absetzkurven der Referenz- und Teststraße im Vergleich Juli und August 2013	54
Abbildung 32: Absetzkurven der Referenz- und Teststraße im Vergleich September und Oktober 2013	55
Abbildung 33: Absetzkurven der Referenz- und Teststraße im Vergleich November und Dezember 2013.....	56
Abbildung 34: Mittlere Absetzgeschwindigkeiten im unverdünnten und verdünnten Versuch (1:1).....	57
Abbildung 35: Schlammvolumina am ersten (links) und zweiten (rechts) Versuchstag (28.08. und 25.09.2013) in Prozent des Gesamtvolumens	58
Abbildung 36: Schlammvolumina am dritten (links, 05.11.2013), vierten (Mitte, 04.12.2013) und fünften (rechts, 11.12.2013) Versuchstag in Prozent des Gesamtvolumens	59
Abbildung 37: Entwässerbarkeit für Versuch A bei 3 Minuten Zentrifugationsdauer und verschiedenen Umdrehungszahlen (links) und bei 4.700 U/min (max.) und steigender Zentrifugationsdauer (rechts).....	62
Abbildung 38: Entwässerbarkeit für Versuch B bei 3 Minuten Zentrifugationsdauer und verschiedenen Umdrehungszahlen (links) und bei 4.700 U/min (max.) und steigender Zentrifugationsdauer (rechts).....	63
Abbildung 39: Entwässerbarkeit für Versuch C bei 3 Minuten Zentrifugationsdauer und verschiedenen Umdrehungszahlen (links) und bei 4.700 U/min (max.) und steigender Zentrifugationsdauer (rechts).....	64
Abbildung 40: Entwässerbarkeit bei einer max. Drehzahl von 4.700 U/min (Versuch D).....	65
Abbildung 41: Volumetrischer Feststoffgehalt bei verschiedenen Zentrifugationsdauern und Umdrehungsgeschwindigkeiten Versuch E (TS-Gehalt: Teststr.: 2,1 g/L, Referenzstr.: 2,1 g/L)	66
Abbildung 42: Volumetrischer Feststoffgehalt bei verschiedenen Zentrifugationsdauern und Umdrehungsgeschwindigkeiten Versuch F (TS-Gehalt: Teststr.: 2,1 g/L, Referenzstr.: 2,0 g/L)	66
Abbildung 43: Volumetrischer Feststoffgehalt bei verschiedenen Zentrifugationsdauern und Umdrehungsgeschwindigkeiten an Versuch G (TS-Gehalt: Teststr.: 2,0 g/L, Referenzstr.: 1,7 g/L).....	66

Abbildung 44: Darstellung des volumetrischen Feststoffgehaltes nach der Zentrifugation von Belebtschlamm der Referenzstraße angereichert mit definierten PAK-Mengen. Test- und Referenzstraße (undotiert) als Vergleichswert	67
Abbildung 45: Darstellung der spezifischen kapillaren Fließzeit der einzelnen Versuche und Gegenüberstellung des TS-Gehaltes der Proben	68
Abbildung 46: Gegenüberstellung der Start- und Endkonzentrationen der Mikroverunreinigungen Benzotriazol, Carbamazepin, Diclofenac, Metoprolol und Sulfamethoxazol aus den anaeroben Batchversuche der Versuchsreihe 1 (mesophil: 36 °C, VD = 25 Tage).....	71
Abbildung 47: Gegenüberstellung der Start- und Endkonzentrationen der Mikroverunreinigungen Benzotriazol, Carbamazepin, Diclofenac, Metoprolol und Sulfamethoxazol aus den anaeroben Batchversuche der Versuchsreihe 2 (thermophil: 55 - 56 °C, VD = 25 Tage)	73
Abbildung 48: Gegenüberstellung der Start- und Endkonzentrationen der Mikroverunreinigungen Benzotriazol, Carbamazepin, Diclofenac, Metoprolol und Sulfamethoxazol aus den anaeroben Batchversuche der Versuchsreihe 3 (mesophil: 36 °C, VD = 38 Tage).....	74
Abbildung 49: Faulgasbildungskurve zum Versuch 1.....	77
Abbildung 50: Faulgasbildungskurve zum Versuch 2.....	79
Abbildung 51: Faulgasbildungskurve zum Versuch 3.....	80
Abbildung 52: C Kurven (links) der Versuche 1 bis 4 und F Kurven (rechts) der Versuche 1 bis 4 mit NaCl Tracer. Versuch 1: $Q_{zu} = 1,6 \text{ m}^3/\text{h}$, Versuch 2: $Q_{zu} = 2,5 \text{ m}^3/\text{h}$, Versuch 3: $Q_{zu} = 0,7 \text{ m}^3/\text{h}$, Versuch 4: $Q_{zu} = 1,6 \text{ m}^3/\text{h}$, 4,8 m^3/h interne Rezirkulation, 0,8 m^3/h Rücklaufschlamm	82
Abbildung 53: Konzentrationskurve (links) und F Kurve (rechts) von Versuch 4 mit Uranin als Tracer.....	83
Abbildung 54: C Kurve (links) und F Kurve (rechts) von Versuch 6 mit Uranin als Tracer	84
Abbildung 55: Modell der Versuchskläranlage Düsseldorf	84
Abbildung 56: Kalibrierung des Modells anhand der C (links) und anhand der F Kurven (rechts) von Versuch 4 und 5 mit einem Zufluss von 1,6 m^3/h und interner Rezirkulation sowie Schlammrückführung.....	85
Abbildung 57: Validierung des Modells der Versuchskläranlage Düsseldorf anhand der C Kurve (links und anhand der F Kurve (rechts) von Versuch 6	85
Abbildung 58: Simulierte Spurenstoffkonzentration im Zu- und Ablauf der Versuchskläranlage Düsseldorf für Szenario 1 bei einem konstanten Volumenstrom von 1,3 m^3/h	88
Abbildung 59: Wiederfindungsrate des Spurenstoffs im Ablauf der Versuchskläranlage Düsseldorf über die Zeit	88
Abbildung 60: Ausgebaute Rotoren der Rücklaufschlammumpfen der halbtechnischen Versuchsanlage. Links: Rotor der Referenzstraße ohne sichtbare Verschleißerscheinungen. Rechts: Rotor der Teststraße mit deutlichen Abrasionsspuren.	92

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Metallgehalte der reaktivierten Pulveraktivkohlen	11
Tabelle 2: Eliminationsleistungen ausgewählter Mikroverunreinigungen durch Pulveraktivkohle	13
Tabelle 3: Betriebsdaten der halbtechnischen Versuchsanlage Düsseldorf	16
Tabelle 4: Leitparameter mit CAS-Nummern und Summenformeln	20
Tabelle 5: Standardmethode der beschleunigten Lösemittlextraktion der Leitsubstanzen aus Klärschlamm	21
Tabelle 6: Massenübergänge der Verifizierung (V) und der Quantifizierung (Q)	23
Tabelle 7: Instrumentelle Validierungsdaten der Analysenmethode	23
Tabelle 8: Messunsicherheiten der Analytik von Kläranlagenabläufen mittels LC-MS/MS	24
Tabelle 9: Dreifachbestimmung der Standardaddition der Klärschlammproben der Testanlage vom 30.12.2013	25
Tabelle 10: Dreifachbestimmung der Standardaddition der Klärschlammproben der Kontrollanlage vom 30.12.2013	25
Tabelle 11: Dreifachbestimmung der Standardaddition des Faulschlammes der Batchversuche vom 07.03.2014	25
Tabelle 12: Zusammenfassung der Randbedingungen zu den jeweiligen Entwässerungsversuchen	28
Tabelle 13: Zusammenfassung Randbedingungen der am LSU durchgeführten anaeroben Batchversuche zur Desorption	30
Tabelle 14: Übersicht der Versuchseinstellungen der Tracerversuche in Düsseldorf	34
Tabelle 15: Parameter zur Berechnung der Tagesgänge für die Versuchskläranlage Düsseldorf	36
Tabelle 16: Trockensubstanzgehalte der halbtechnischen Versuchsanlage	39
Tabelle 17: Glühverluste der halbtechnischen Versuchsanlage	39
Tabelle 18: Trockensubstanzgehalte der halbtechnischen Versuchsanlage	40
Tabelle 19: Ergebniszusammenfassung der TOC und DOC Ergebnisse	42
Tabelle 20: Ergebniszusammenfassung der Stickstoffelimination	44
Tabelle 21: Ergebniszusammenfassung der AFS-Messungen der halbtechnischen Versuchsanlage	46
Tabelle 22: Gegenüberstellung TOC-Entwicklung des Zeitraumes ohne PAK-Dosierung von März 2013 bis 21.05.2013 und des Zeitraumes mit PAK-Dosierung, vom 01.06.2013 bis 31.01.2014	47
Tabelle 23: Gegenüberstellung DOC-Entwicklung des Zeitraumes ohne PAK-Dosierung von März 2013 bis 21.05.2013 und des Zeitraumes mit PAK-Dosierung, vom 01.06.2013 bis 31.01.2014	47
Tabelle 24: Zusammengefasste Resultate bei einer PAK-Dosierung von 10 mg/L PAK	49
Tabelle 25: Zusammengefasste Resultate bei einer PAK Dosierung von 20 mg/L PAK	50
Tabelle 26: Betrachtung der Absetzbarkeit je Versuch bezogen auf die Schlammvolumenanteile	60

Tabelle 27: Zusammenfassung der untersuchten Standardparameter im Verlauf der anaeroben Batchversuche.....	70
Tabelle 28: Faulschlammcharakterisierung des 1. anaeroben Batchversuches am 23.01.2014	76
Tabelle 29: Faulversuch CBL 1	78
Tabelle 30: Faulschlammcharakterisierung des 2. anaeroben Batchversuch am 30.01.2014	78
Tabelle 31: Faulschlammcharakterisierung des 3. anaeroben Batchversuch am 03.02.2014	79
Tabelle 32: Faulversuch CBL 2	80
Tabelle 33: Vergleich der Faulgasausbeuten zwischen den Sekundärschlämmen mit und ohne PAK.....	81
Tabelle 34: Faulversuch CBL 3	81
Tabelle 35: Zeiträume der Probenahme im Ablauf für die Szenarien 1 bis 3.....	86
Tabelle 36: Probenahmezeiträume für Szenario 4 mit dynamischem Tagesgang.....	87
Tabelle 37: Wiederfindungsraten eines Spurenstoffs in verschiedenen Probenahmezeiträumen für Szenario 1 bei einem Volumenstrom von 1,3 m ³ /h.....	89
Tabelle 38: Wiederfindungsraten eines Spurenstoffs in verschiedenen Probenahmezeiträumen für Szenario 2 bei einem Volumenstrom von 1,3 m ³ /h.....	89
Tabelle 39: Wiederfindungsraten bei zeit- und mengenproportionaler Probenahme für Szenario 4 mit sich täglich wiederholendem Tagesgang und einem mittlerem Zulaufvolumenstrom von $Q_m = 1,3 \text{ m}^3/\text{h}$	90
Tabelle 40: Wiederfindungsraten bei Erhöhung der Spurenstoffkonzentration.....	90

Abkürzungs- und Symbolverzeichnis

A	Oberfläche [m ²]
AFS	Abfiltrierbare Stoffe
AOP	Advanced Oxidation Processes (erweiterte Oxidation)
AP	Arbeitspaket
ASE	beschleunigte Lösemittelextraktion (accelerated solvent extraction)
ASM3	Activated Sludge Model No. 3
BG	Bestimmungsgrenze
BSB ₅	Biochemischer Sauerstoffbedarf nach 5 Tagen in mg/L O ₂
B _{TS}	BSB ₅ -Schlammbelastung [kg _{BSB} /(kg _{TS} ·d)]
CAS	Chemical Abstracts Service
CBL	Chemisch-Biologische Laboratorien
CO ₂	Kohlendioxid
CSB	Chemischer Sauerstoffbedarf in mg/L O ₂
CST	capillary suction time
DOC	gelöster, organisch gebundener Kohlenstoff in mg/L
ESI	Elektrospray-Ionisation
EW	Einwohnerwerte
GAK	granulierte Aktivkohle
GV	Glühverlust in %TR
HPLC	High-performance liquid chromatography (Hochleistungsflüssigkeitschromatographie)
ISV	Schlammvolumenindex
IUTA	Institut für Energie- und Umwelttechnik e. V.
KA	Kläranlage
LC-MS/MS	Flüssigkeitschromatographie- Tandem-Massenspektrometrie
LSU	Lehrstuhl für Siedlungswasserwirtschaft und Umwelttechnik
LOG-POW	logarithmisch Oktanol-Wasser-Verteilungskoeffizient
MKULNV	Ministerium für Klimaschutz, Umwelt, Landwirtschaft, Natur- und Verbraucherschutz des Landes Nordrhein-Westfalen
MP	Mischprobe
MRM	Multiple Reaction Monitoring
MSR	Mess- und Regelungstechnik
MW	Mittelwert
N _{ges}	Gesamt-Stickstoffgehalt, Summe aus anorganischem und organisch gebundenem Stickstoff in mg/L
NH ₄ -N	Ammoniumstickstoff in mg/L
NO ₂ -N	Nitritstickstoff in mg/L
NO ₃ -N	Nitratstickstoff in mg/L
NRW	Nordrhein-Westfalen
NWG	Nachweisgrenze

oTS	organische Trockensubstanz
PAK	Pulveraktivkohle
PEC	predicted effect concentration
P _{ges}	Gesamtposphor in mg/L
PNEC	predicted no effect concentration
PO ₄ -P	ortho-Phosphat
QC	Qualitätssicherung (Quality Control)
RS	Rücklaufschlamm
RUB	Ruhr-Universität Bochum
RZ	Rezirkulation
SEBD	Stadtentwässerungsbetrieb Düsseldorf
SPE	Festphasenextraktion (Solid phase extraction)
TKN	Kjeldahl-Stickstoff in mg/L
TN _b	gesamt gebundener Stickstoff
TOC	gesamter, organisch gebundener Kohlenstoff in mg/L
TR	Trockenrückstand in %
TR _e	Endfeststoffgehalt nach Entwässerung in %
TS	Trockensubstanzgehalt in g/L
TW	Trockenwetter
U	Erweiterte Unsicherheit
u	Gesamte kombinierte Standardunsicherheit
UV	Ultraviolett
VD	Versuchsdauer
VE	Voll entsalzt
WDF	Wiederfindungsrate

1 Projektübersicht

1.1 Hintergrund und Aufgabenstellung

Vom Stadtentwässerungsbetrieb Düsseldorf wurden im Jahr 2010 Laborversuche über die Auswirkung der Dosierung von reaktiverer Pulveraktivkohle des Wasserwerks Holthausen, die als Wertstoff bei der Regeneration von Aktivkohlegranulat anfällt, auf die Belebtschlammbiozönose der biologischen Abwasserreinigung durchgeführt. Es wurden dabei zwei baugleiche Laborkläranlagen parallel betrieben, wovon eine mit einer Pulveraktivkohledosierung versehen wurde. Die zweite Versuchsanlage diente als Referenzstufe ohne Aktivkohledosierung. Es erfolgte eine Prüfung des Eliminationsverhaltens ausgewählter Referenzspurenstoffen Diclofenac und Carbamazepin. Als wesentliche Ergebnisse dieser Laborversuche lassen sich zusammenfassen:

- Die Belebtschlammbiozönose sowie die Stickstoff- und die vermehrte biologische Phosphorelimination werden nicht beeinflusst.
- Die durchschnittliche Elimination erhöht sich für Carbamazepin von 27,1 % (Referenzstraße) auf 73,5 % bei einer Zulaufkonzentration von etwa 3 µg/L.
- Die durchschnittliche Elimination erhöht sich für Diclofenac von 47,2% (Referenzstraße) auf 76,6 % bei einer Zulaufkonzentration von etwa 3 µg/L.
- Eine zusätzliche DOC-Elimination findet in einer Größenordnung von bis zu 1 mg/L statt und ist nach den Versuchsergebnissen nicht signifikant.

Nach Durchführung dieser ersten grundlegenden Laborversuche schien der Einsatz von reaktiverer Pulveraktivkohle aus Wasserwerken eine erfolgversprechende Möglichkeit zu sein, die Elimination organischer Spurenstoffe aus Klärwerksabläufen signifikant zu verbessern, die zudem ohne Umbaumaßnahmen kurzfristig umsetzbar sein könnte.

Daher wurde eine vorhandene Technikumsanlage instand gesetzt, um die Ergebnisse aus den Laborkläranlagen zu verifizieren und das Verfahren im halbtechnischen Maßstab auch unter in Bezug auf die Nährstoffelimination kontrollierten Bedingungen auf Anwendbarkeit und Wirksamkeit zu prüfen. Neben den Untersuchungen zur Elimination der ausgewählten Spurenstoffe Benzotriazol, Carbamazepin, Diclofenac, Metoprolol und Sulfamethoxazol aus der wässrigen Phase war darüber hinaus zu prüfen, welchen Einfluss die PAK-Dosierung auf die Entwässerbarkeit und die anaerobe Stabilisierung des Klärschlammes nimmt und inwieweit die Rücklösung von Spurenstoffen im Verfahren der anaeroben Schlammstabilisierung eine Rolle spielt.

1.2 Versuchsabschnitte und durchgeführte Untersuchungen

Das Projekt gliedert sich in sechs Arbeitspakete. Es folgt eine kurze Beschreibung der einzelnen Arbeitspakete.

Arbeitspaket 1: Anlagenbetrieb und verfahrenstechnische Untersuchung der Spurenstoffeliminationsleistung

Inhalt dieses Arbeitspaketes war der Betrieb der halbtechnischen Versuchsanlage sowie die Dosierung der regenerierten Pulveraktivkohle in eine der Reinigungsstraßen. Im direkten Vergleich sollte über die Differenz der Spurenstoffkonzentrationen im Ablauf der ansonsten identisch betriebenen, parallelen Reinigungsstraßen die Eliminationsleistung der regenerierten PAK bestimmt werden. Die PAK wurde in Konzentrationen von 10 und 20 mg_{PAK}/L dosiert. Der parallele Betrieb der beiden Reinigungsstraßen wurde systematisch mithilfe chemischer und mikrobiologischer Analysen kontrolliert.

Arbeitspaket 2: Standversuche zum Absetzverhalten des Belebtschlamm-/Aktivkohlegemisches

Ziel dieses Arbeitspaketes war die Ermittlung des Einflusses der regenerierten PAK auf die Absetzeigenschaften des Belebtschlammes. Zu diesem Zweck wurde regelmäßig der Schlammvolumenindex beider Reinigungsstraßen bestimmt und zusätzlich die Absetzgeschwindigkeit dokumentiert. Ergänzend zu den Untersuchungen mit dem Belebtschlamm aus der halbtechnischen Versuchsanlage wurde Belebtschlamm der Belebungsbecken des Klärwerks Düsseldorf-Süd mit verschiedenen Mengen Aktivkohle versetzt und der Absetzvorgang beobachtet.

Arbeitspaket 3: Qualitative Untersuchung der Entwässerbarkeit

Innerhalb dieses Arbeitspaketes sollte der Einfluss der direkten PAK-Dosierung auf die Entwässerungseigenschaften von Belebtschlamm aufgezeigt werden. Die Versuche wurden mithilfe einer Becherglaszentrifuge im Labormaßstab durchgeführt und dienten zur Ermittlung des erzielbaren Endfeststoffgehalts.

Arbeitspaket 4: Anaerobversuche zur Ermittlung des Desorptionsverhaltens von an Aktivkohle adsorbierten Spurenstoffen in der Schlammfäulung

Zur Feststellung möglicher Desorptionsvorgänge von Mikroverunreinigungen unter anaeroben Bedingungen wurden sowohl am Biogasversuchsstand des Lehrstuhls für Siedlungswasserwirtschaft und Umwelttechnik (RUB) als auch anschließend in den Laboratorien (CBL) des Stadtentwässerungsbetriebs Düsseldorf anaerobe Batchversuche durchgeführt. Dabei wurden die gelöst vorliegenden Mikroverunreinigungen im Schlammwasser vor und im Anschluss an die Batchversuche analysiert. Zum Teil wurden ergänzend die Mikroverunreinigungen auf den Feststoffen betrachtet.

Arbeitspaket 5: Mathematische Simulation

Im Rahmen dieses Arbeitspaketes wurde eine optimierte Strategie zur Probenahme anhand der Aufenthaltszeitverteilung der Mikroverunreinigungen entwickelt. Auf der halbtechnischen Versuchskläranlage wurden dazu Tracerversuche mit NaCl und Uranin durchgeführt. Die Ergebnisse der Tracerversuche dienten zur Kalibrierung eines Simulationsmodells der Versuchskläranlage Düsseldorf.

Arbeitspaket 6: Dokumentation der Ergebnisse

Nach Abschluss der praktischen Arbeiten wurden die erzielten Ergebnisse in einem Abschlussbericht zusammengefasst.

2 Grundlagen

2.1 Eigenschaften von Belebtschlamm

2.1.1 Absetzverhalten

Die Fähigkeit der Sedimentation von Belebtschlamm ist ein relevanter Parameter für den Kläranlagenbetrieb und abhängig von den physikalischen Eigenschaften des Schlammes. Ein wichtiger Kennwert ist in diesem Zusammenhang der Wassergehalt ω_w , da dieser ausschlaggebend ist für Konsistenz, Dichte, Viskosität und Volumen des Klärschlammes. Der Wassergehalt von Belebtschlamm bzw. Überschussschlamm liegt in der Regel über 99 %. Komplementär zum Wassergehalt ω_w steht der Trockenrückstand TR, der das Maß für die Trockenmasse bezogen auf die Gesamtschlammgesamtmasse darstellt. Sowohl Wassergehalt als auch Trockenrückstand werden in der Einheit Gewichtsprozent (%) bezogen auf die Schlammmenge angegeben. Bei Belebtschlämmen wird aufgrund des hohen Wasseranteils im Allgemeinen der Trockensubstanzgehalt zur Bezifferung des Feststoffgehaltes herangezogen. In diesem Fall wird die Feststoffmenge auf ein Schlammvolumen bezogen und in kg/m^3 bzw. g/L angegeben. Zur Beurteilung der Absetzeigenschaften von Belebtschlamm wird der Schlammvolumenindex ISV herangezogen. Dieser wird über einen Absetzvorgang unter definierten Bedingungen (DIN EN 14702-1, 2010) ermittelt. Ein Liter Belebtschlamm wird in einem Standzylinder für 30 Minuten belassen, anschließend der Schlammspiegel abgelesen und auf den Trockensubstanzgehalt der Probe bezogen. Der Schlammvolumenindex wird in mL/g bzw. L/kg angegeben und liegt in der Regel zwischen 80 und 120 mL/g . Ein niedriger ISV bezeichnet ein gutes Absetzverhalten des Schlammes, während ein $\text{ISV} > 150 \text{ mL/g}$ auf Blähschlamm hinweist, wodurch der Absetzvorgang behindert wird (Kopp, 2009). Der Absetzvorgang des Belebtschlammes läuft nicht gleichförmig ab, sondern lässt sich in vier Phasen einteilen (Braha und Groza, 2006):

- discrete settling
- flocculent discrete settling and zone settling
- hindered settling
- channeling and compression

Braha und Groza (2006) beschreiben den Absetzvorgang mit seinen Phasen wie nachfolgend erläutert. Während des discrete settling setzen sich die im Wasser schwebenden Feststoffe auf Grund geringer Neigung zur Koagulation unbeeinflusst voneinander ab. Es gibt keine Flockenbildung, eine Fest-Flüssig-Phasentrennung findet nicht statt und die Sinkgeschwindigkeit ist nur von der Dichte sowie der spezifischen Partikelgröße abhängig. Kennzeichnend für das flocculent discrete settling ist eine Ausbildung von Flockenkonglomeraten. Dabei ballen sich die Feststoffe zusammen und verändern dadurch ihre Größe und Sinkgeschwindigkeit. Infolgedessen nimmt das Absetztempo rapide zu und eine deutliche Grenze zwischen Schlamm und Klarwasser, Schlammspiegel genannt, wird sichtbar. Signifikant für diese Phase ist die trotz zunehmenden Absetzens gewissermaßen konstante Sinkgeschwindigkeit, dem zone settling. Das behinderte Absetztempo (hindered settling) wird von einem aufstei-

genden Wasserstrom ausgelöst. Zuerst sinkt der Schlamm Spiegel konstant weiter ab, nach einiger Zeit jedoch behindern sich die absinkenden Schlammflocken bedingt durch ihre Nähe zueinander gegenseitig. Folglich verengt sich der Fließquerschnitt für das nach oben drängende Wasser, der Strom wird schneller und die Absetzgeschwindigkeit nimmt ab. Nach einiger Zeit bildet sich am Boden eine steigende Schlammschicht. Nachfolgende Flocken weisen eine geringere Sinkgeschwindigkeit auf, so dass sich die Absetzgeschwindigkeit des Schlamm Spiegels immer mehr verringert. Man spricht dabei von einem reduzierten Absinken. In der vierten und damit letzten Phase im Absetzprozess gehen die Strukturen der einzelnen Flocken komplett verloren und das Absinken des Schlamm Spiegels kommt beinahe vollständig zum Erliegen. Durch eine weiterführende Verdichtung infolge des Schlamm eingewichtes wird das im Schlamm befindliche Wasser nach oben verdrängt (channeling). Folglich nimmt das Porenvolumen des Schlammes ab und er verdichtet sich (compression).

Für eine Veranschaulichung des zeitlichen Verlaufs eines solchen Absetzvorganges lassen sich die einzelnen Phasen der Sedimentation mittels einer Absetzkurve auch graphisch darstellen (siehe Abbildung 1). Um die Sinkgeschwindigkeiten eines solchen Prozesses zu repräsentieren, werden bei dieser Darstellung die Absetzhöhe h und die Zeit t betrachtet. Die nachfolgende Abbildung zeigt eine solche Absetzkurve mit den vier bedeutenden Phasen, die für das Absetzverhalten von belebtem Schlamm charakteristisch sind.

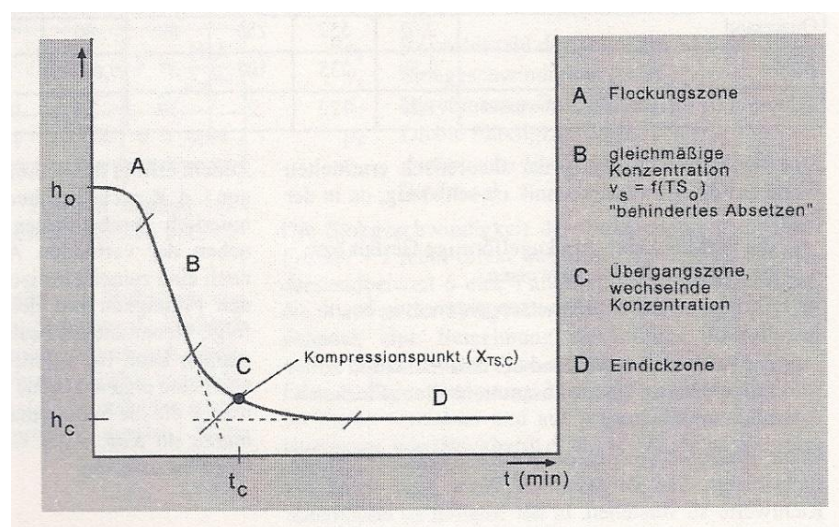


Abbildung 1: Absetzverhalten des belebten Schlammes im Standversuch nach Pflanz, 1966 (DWA, 2006)

In der Flockungszone nimmt die Sinkgeschwindigkeit nur langsam zu. Kennzeichnend durch ihren beinahe linearen Verlauf stellt die zweite Phase das behinderte Absetzen dar. Infolge eines zunächst vorherrschenden Gleichgewichts zwischen abwärts drängendem Schlammflockenstrom und aufwärts strömendem Wasser sinkt der Schlamm Spiegel nahezu konstant ab. Nach einer gewissen Zeit behindern sich die Flockengebilde jedoch so stark, dass die Sinkgeschwindigkeit abnimmt, reduziertes Absetzen eintritt und es abschließend zur vollständigen Eindickung kommt (DWA, 2006).

Die Fragestellung innerhalb dieses Projektes befasst sich mit der Auswirkung der Dosierung von PAK in das Belebungsbecken auf die Absetzeigenschaften von Belebtschlamm. In der Literatur sind einige Beispiele zu finden, die sich mit den Auswirkungen von PAK befassen, die Direktdosierung ins Belebungsbecken wurde bisher aber ausschließlich untergeordnet betrachtet. Im Zuge der Phase II des Projektes „Elimination von Arzneimittelrückständen in kommunalen Kläranlagen“ wurden Absetzversuche mit Belebtschlamm aus drei verschiedenen Kläranlagen durchgeführt (Arge, 2013). Es wurde eine Aktivkohleeinlagerung in den Belebtschlamm von ca. 8 % der Trockensubstanz angegeben, die zu verbesserten Schlammabsetzeigenschaften führten (Arge, 2013). Ergebnisse aus Laborversuchen innerhalb des Projektes „Ertüchtigung kommunaler Kläranlagen, insbesondere kommunaler Flockungsfiltrationsanlagen durch den Einsatz von Aktivkohle“ (Bornemann und Pinnekamp, 2012) zeigten, dass der ISV sich bei einem PAK-Anteil von 10 % bezogen auf den TS-Gehalt des Belebtschlammes um 7 – 8 % verbesserte. Eine generelle Verbesserung der Absetzeigenschaften wurde bereits von Bosch et al. (1976) und Brendel (1997) aufgezeigt. Diese Entwicklung wurde durch erste Ergebnisse des Projektes „PAK-Dosierung in die Belebung“ auf der Abwasserreinigungsanlage Flos in Wetzikon bestätigt. Bei einer PAK-Dosierung von 18 mg_{AK}/L lag der ISV der Teststraße dort deutlich unter dem der Referenzstraße (VSA, 2013).

2.1.2 Entwässerungsverhalten

Bei der Entwässerung von Klärschlamm handelt es sich physikalisch ebenfalls um eine Fest-Flüssigtrennung (DWA-M 383, 2008). Sie dient in erster Linie der Volumenreduzierung und somit der Reduktion der zu entsorgenden Klärschlammmenge. Die Entwässerungsergebnisse verschiedener Kläranlagen variieren stark in Abhängigkeit von der Abwasserzusammensetzung, dem Abwasserreinigungsverfahren und dem gewählten Verfahren zur Schlammbehandlung (Kopp, 2009). Die Entwässerbarkeit eines Klärschlammes hängt von verschiedenen Faktoren ab. So lässt sich ein Schlamm schlechter entwässern, je mehr kolloidale Teilchen enthalten sind und je geringer der Korndurchmesser oder je feinflockiger die Schlammstruktur ist (Baumgart et al., 2007). Der entscheidende Faktor ist der Anteil an freiem Wasser, der im Schlamm enthalten ist. Im Allgemeinen werden die nachfolgend aufgeführten Wasserbindungen im Klärschlamm unterschieden (Kopp, 2009).

- Freies Wasser: keine Bindung an Schlammpartikel
- Gebundenes Wasser
 - Zwischenraumwasser: durch Kapillarkräfte zwischen Partikeln in der Flocke gehalten
 - Oberflächenwasser: durch Adhäsionskräfte gebunden
 - Zellinnenwasser: Zellflüssigkeit und inneres Kapillarwasser
 - Chemisch gebundenes Wasser, auch als Kristallwasser (Hydratwasser) bezeichnet und durch Ionenbindungen gebunden
 - In Hydrogelen gebundenes Wasser

Während das gebundene Wasser nur durch thermische Verfahren entfernt werden kann, ist das freie Wasser durch Eindickung und maschinelle Entwässerung abtrennbar (DWA-M 383, 2008). Durch statische Eindickung ohne die Zugabe von Konditionierungsmitteln können Trockenrückstände von TR >7 % erzielt werden. Die maschinelle Entwässerung ermöglicht Endfeststoffgehalte von TR >45 % beim Einsatz von Filterpressen und entsprechenden Zusatzstoffen (DWA-M 383, 2008).

Ein weiterer Parameter, der zur Bewertung der Entwässerbarkeit herangezogen werden kann, ist die kapillare Fließzeit (CST, englisch: capillary suction time). Sie ist ein Anhaltswert für die Wasserabgabegeschwindigkeit nach DIN EN 14701-1 (2006) und ist nach DWA-M 383 (2008) ein weitergehender Kennwert der Entwässerung. Die Entwässerung wird bei diesem Verfahren durch die Saugwirkung erreicht, die durch die Kapillarwirkung eines standardisierten Filterpapiers auf den Schlamm ausgeübt wird. Das Ergebnis der CST-Messung wird in Sekunden angegeben. Ein geringerer CST-Wert spricht dabei für eine bessere Entwässerbarkeit des Schlammes (ATV, 1992; DWA-M 383, 2008). Das Messergebnis ist vom Feststoffgehalt der Schlammprobe abhängig, daher wird der ermittelte CST-Wert zur besseren Vergleichbarkeit auf den TR bezogen und als spezifischer CST/TR in [s/%] angegeben (DWA-M 383, 2008). Liegt der Wert für die spezifische kapillare Fließzeit $CST/TR \leq 30$ s/%, kann von einem gut entwässerbarem Schlamm und bei $CST/TR \geq 150$ s/% von einem schlecht entwässerbarem Schlamm ausgegangen werden (Kopp, 2001; Bischofsberger et al., 2005). Eine andere Möglichkeit ist es, den CST-Wert direkt auf den Trockenstoffgehalt zu beziehen (Denkert, 1988).

Innerhalb dieses Projektes sollte die Auswirkung der Dosierung von Pulveraktivkohle auf die Entwässerbarkeit von Belebtschlamm untersucht werden. In der Literatur sind die Auswirkungen der Aktivkohledosierung auf die nachfolgenden Behandlungsstufen, wie bereits unter 2.1.1 angesprochen, bisher eher untergeordnet betrachtet worden. Im Zuge des Projektes „Energiebedarf von Verfahren zur Elimination von organischen Spurenstoffen – Phase I“ wurde auf der Kläranlage Böblingen-Sindelfingen eine PAK-Dosierung von 10 g/m³ direkt in das Belebungsbecken untersucht. Der mittlere TR-Gehalt im entwässerten Schlamm entspricht dabei nach Biebersdorf et al. (2012) mit 32 % den jahreszeitlichen Schwankungen des Vorjahres. Es ergibt sich lediglich eine 9 %-ige Steigerung einer zu entsorgenden Schlammmasse durch den anfallenden Mehrschlamm aus der PAK-Dosierung (Biebersdorf et al., 2012). DeWalle und Chian (1977) führen in ihrer Arbeit an, dass die Zugabe von PAK ins Belebungsbecken zu diversen Verbesserungen führt, wobei explizit eine verbesserte Schlammmentwässerung und eine Erhöhung der Leistungskapazität der Entwässerungsverfahren aufgeführt werden. Im Zuge einer Untersuchung zur Auswirkung von Nanomaterialien auf die Schlammmentwässerung wurden von Boyle und Evans (2013) Versuche mit PAK durchgeführt, bei denen ebenfalls positive Auswirkungen festgestellt wurden, welche jedoch nicht genauer präzisiert wurden.

2.1.3 Verhalten im anaeroben Milieu

Zu dem Verhalten von bereits an Aktivkohle adsorbierten Mikroverunreinigungen im anaeroben Milieu liegen zum gegenwärtigen Zeitpunkt wenige Erkenntnisse vor. Lediglich innerhalb des Projektes „Einsatz von Pulveraktivkohle zur Elimination von Mikroverunreinigungen aus kommunalem Abwasser“ wurde dieses Phänomen von Zwickenpflug et al. (2010) am Rande untersucht, wobei die Ergebnisse keine Desorption in der Faulung vermuten ließen. Zurzeit wird innerhalb des Projektes „Untersuchungen zum Spurenstoffbindungsverhalten von Pulveraktivkohle unter anaeroben Bedingungen“ im Rahmen des Kompetenzzentrums Spurenstoffe Baden-Württemberg das Desorptionsverhalten im anaeroben Milieu genauer betrachtet. Ergebnisse dieses Projektes liegen zum gegenwärtigen Zeitpunkt jedoch noch nicht vor. Das Verhalten von Mikroverunreinigungen im anaeroben Milieu ohne vorherigen Aktivkohleneinfluss wurde dagegen an verschiedener Stelle bereits betrachtet. So gelang zum Beispiel Carballa et al. (2007) zu der Erkenntnis, dass Carbamazepin sowohl unter thermophilen als auch unter mesophilen Verhältnissen nach einer Aufenthaltszeit von 10 und 20 Tagen im anaeroben Reaktor nicht reduziert wird, während für Diclofenac unter mesophilen Bedingungen eine Reduktion von 42 – 78 % und unter thermophilen 63 – 82 % ermittelt wurde. Für Sulfamethoxazol betrug die Reduktion in allen Fällen zwischen 98 – 100 %.

2.2 Aktivkohle

2.2.1 Herkunft

Die für die Untersuchungen verwendete Pulveraktivkohle stammt aus dem Prozess der Trinkwasseraufbereitung durch die Stadtwerke Düsseldorf AG.

Die Wasseraufbereitung, die aus Rohwasser zu 75 % aus Rheinuferfiltrat und 25 % Grundwasser erfolgt, schließt nach dem Düsseldorfer Verfahren die Schritte Ozonung und Aufreinigung mittels Aktivkohlegranulat ein (siehe Abbildung 2).

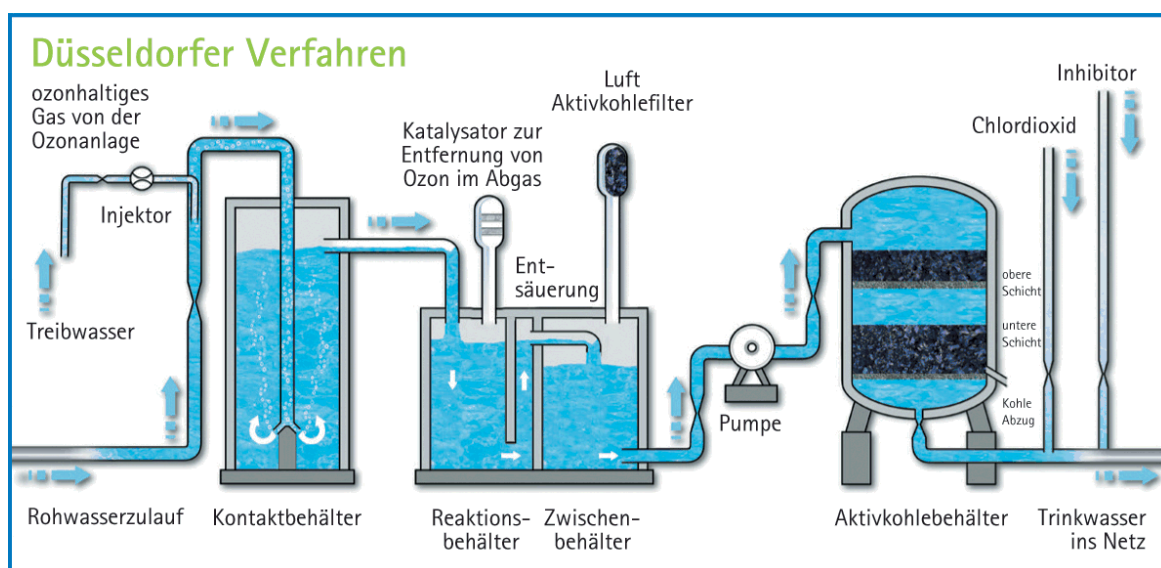


Abbildung 2: Trinkwasseraufbereitung im Wasserwerk Holthausen nach dem Düsseldorfer Verfahren

Verwendet werden hierzu 1.900 m³ Aktivkohlegranulat aus Lagerstätten in den USA und in China in bis zu 42 Filtern. Dieses Granulat findet für etwa fünf Monate Verwendung in den Filtern der Wasseraufbereitung und wird nach noch nicht erschöpfender Beladung ausgespült und thermisch reaktiviert (siehe Abbildung 3).

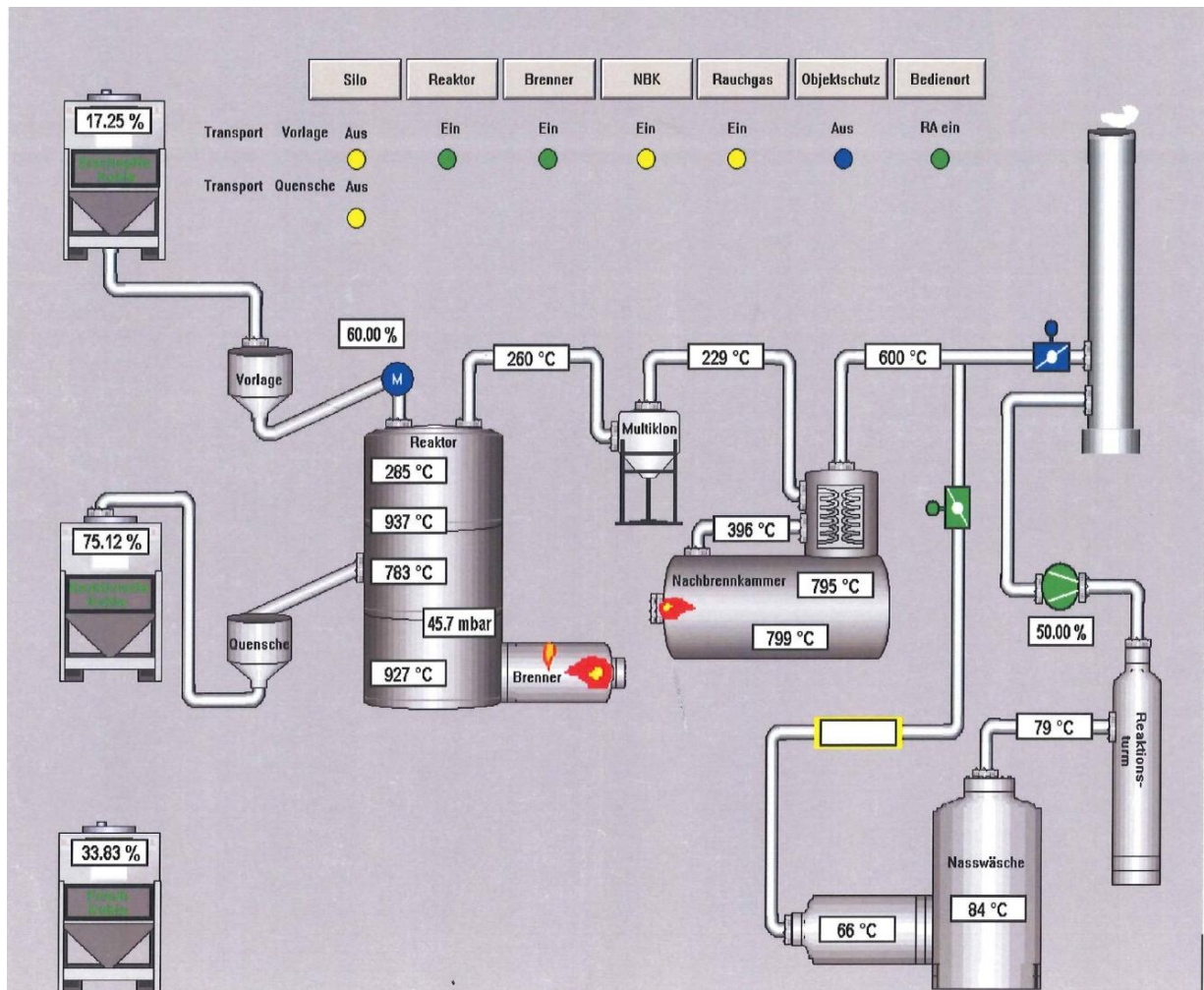


Abbildung 3: Schema der Reaktivierungsanlage für die Aktivkohle des Wasserwerks Holthausen

Während der thermischen Reaktivierung werden die aus dem aufbereiteten Trinkwasser adsorbierten Substanzen wieder desorbiert und anschließend thermisch zersetzt. Es erfolgt im weiteren Verlauf eine Reaktivierung durch Wasserdampf. Als Ausgleich für den Abbrand bei der Regeneration und Abriebverluste bei Spülvorgängen in der Größenordnung 10-15 % werden jährlich rund 700 m³ Frischkohle zugesetzt.

Das Reaktivat wird unter Zugabe von Frischkohle danach wieder in die Filter eingespült. Die Verluste an Granulat fallen zum größten Teil als reaktivierte Pulveraktivkohle an, die aus dem Prozess ausgeschleust, sedimentiert und in Trockenbeeten (siehe Abbildung 4) durch Drainage und Verdunstung getrocknet wird. Hinzu kommen Sedimente aus Spülvorgängen der Oberschicht, die höhere Eisen- und Mangangehalte zeigen.



Abbildung 4: Trockenbeete im Wasserwerk Düsseldorf-Holthausen

Der getrocknete Kohleschlamm wird derzeit mit etwa 400 t/a als Wirtschaftsgut in der Industrie wiederverwendet.

Eine aus ähnlichem Prozess stammende, aufgemahlene Aktivkohle ist nach Haist-Gulde et al. (2012) in der Lage, Pharmaka aus der wässrigen Phase zu absorbieren (siehe Abbildung 5).

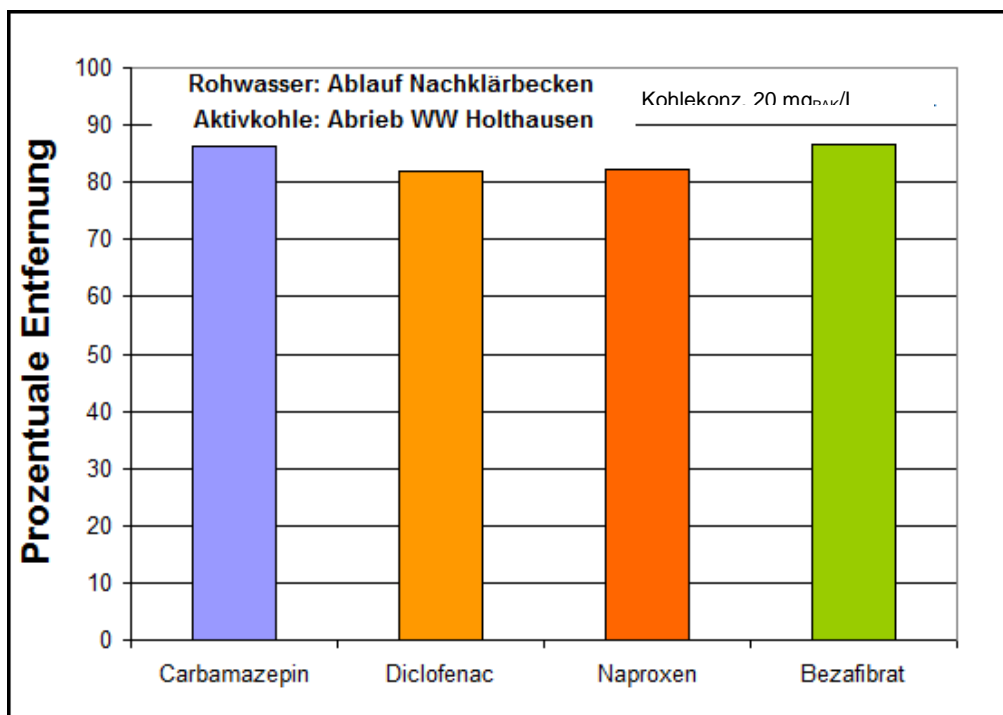


Abbildung 5: Prozentuale Entfernung ausgewählter Pharmaka mithilfe reaktiverter PAK aus der wässrigen Phase

2.2.2 Eigenschaften

Die Charakterisierung der reaktivierten Pulveraktivkohle durch die Stadtwerke Düsseldorf AG lieferte folgende Ergebnisse (siehe Tabelle 1):

Brennwert: 23 MJ/kg (Braunkohle: 10, Steinkohlen: 29–32,7)

AOX: 210 mg/kg

PCB: nicht bestimmbar

Tabelle 1: Metallgehalte der reaktivierten Pulveraktivkohlen

Metallgehalt in mg/kg _{TS}	Trockenbeet, 14.03.2011	Becken 3, 14.03.2011	Trockenbeet, 10.02.2011	Becken 3, 10.02.2011	Klärbecken, 16.02.2000	Klärbecken, 30.10.2008
Blei	0	0	0	1,5	2,26	5,12
Cadmium	0	0	0	0	0	0,98
Chrom	16,7	24,4	14,3	31,4	24,6	21,7
Eisen	4.800	5.700	5.330	7.650	-	-
Kupfer	670	878	279	1.110	1.020	974
Mangan	3.910	1.840	1.360	3.940	0	0
Nickel	24,1	21	14,5	29,6	33,9	41
Quecksilber	0	0	0	0	1,39	0
Zink	25,2	22,2	14,2	40	37,4	59,2

2.3 Betrachtete Mikroverunreinigungen

2.3.1 Diclofenac

Das Pharmazeutikum Diclofenac gehört in die Gruppe der Analgetika und dient zur Behandlung von Schmerzen (Fahlenkamp et al., 2006). Es handelt sich um das am meisten verordnete Arzneimittel dieser Gruppe, das im Jahr 2000 in fast 60 % aller Anwendungen nicht-steroidaler Analgetika eingesetzt wurde (Reddersen, 2004). Dabei verlassen ungefähr 70 % des Wirkstoffes den Körper unverändert und im Kläranlagenablauf finden sich Konzentrationen von bis zu ca. 1,8 µg/L wieder (Zwickenpflug et al., 2010) Der deutsche Jahresverbrauch von Diclofenac wurde im Jahr 2007 auf 90 t/a beziffert (Meißner, 2008). Die Elimination in konventionellen Kläranlagen wird als schlecht bis mittel beschrieben. Zippel et al. (2010) weisen auf eine Elimination in (Labor-) Kläranlagen kleiner 10 % nach 90 Tagen hin. Der Log-POW-Wert liegt zwischen 4,5-4,8 (Çeçen und Aktaş, 2012) und ist somit größer als 3, was auf eine Umweltrelevanz hindeutet. Auch Götz et al. (2012) und Feldmann (2005) verweisen auf das ökotoxikologische Gefährdungspotential von Diclofenac. Zudem wird Diclofenac als trinkwasserrelevanter Stoff aufgeführt.

2.3.2 Carbamazepin

Bei Carbamazepin handelt es sich um ein Antiepileptikum, was somit in die Stoffgruppe der Pharmazeutika fällt (Fahlenkamp et al., 2006). Das Medikament ist weit verbreitet und gelangt in großen Mengen ins kommunale Abwasser. Im Kläranlagenzulauf finden sich Kon-

zentrationen von Carbamazepin in der Größenordnung von 0,2 bis 0,7 µg/L wieder. (Zwickenpflug et al. 2010; Bornemann und Pinnekamp, 2012). Der Rückhalt oder Abbau in der Kläranlage ist aufgrund hoher Persistenz sehr gering (vgl. Zippel et al., 2010) und die Halbwertszeit liegt bei ca. 5 Jahren (Zippel et al., 2010). Aufgrund der Persistenz wird die Substanz als trinkwasserrelevanter Stoff geführt. Carbamazepin weist einen Log-POW-Wert von 2,45 (Ternes und Joss, 2006; Hanisch et al., 2002) bis 3,05 (Fahlenkamp et al., 2006) auf, was auf ein erhöhtes Bioakkumulations- und ökotoxikologisches Potential hinweist. Des Weiteren wurde nach Fahlenkamp et al. (2006) ein PEC/PNEC-Verhältnis größer 1 mit einem PNEC-Wert von 2,5 µg/L festgestellt, was ebenfalls als ökotoxikologisch bedenklich gilt. Aus diesen Gründen ist Carbamazepin als Indikatorstoff geeignet.

2.3.3 Sulfamethoxazol

Bei dem Pharmazeutikum Sulfamethoxazol handelt es sich um ein Antibiotikum, welches vor allem in häusliches und Krankenhausabwasser über Ausscheidungen und unsachgemäße Entsorgung gelangt. Jährlich werden in Deutschland ca. 54 t des Antibiotikums verbraucht, wobei 25-50 % des Wirkstoffs innerhalb von 24 wieder über den Urin ausgeschieden werden. Dabei handelt es sich allerdings nur zu 20 % um unverändertes Sulfamethoxazol, den restlichen Teil bilden Metabolite (Clara et al., 2010). Im Kläranlagenzulauf finden sich Konzentrationen von ca. 0,35-0,62 µg/L des Wirkstoffes wieder (Liebig, 2005; Thomann, 2013). Der Log-POW-Wert wird mit $0,887 \pm 0,419$ für Sulfamethoxazol angegeben. Der Rückhalt in der Kläranlage für Sulfamethoxazol liegt bei etwa 67 % (Carballa et al., 2004). Sulfamethoxazol ist toxisch für die aquatische Umwelt und aufgrund des hohen Verbrauches und der relativ hohen Konzentrationen als Indikatorstoff geeignet (Liebig, 2005).

2.3.4 Benzotriazol

Benzotriazol ist eine Industriechemikalie, die sowohl im häuslichen als auch im gewerblichen Abwasser vorkommt. Die Chemikalie befindet sich in Korrosionsschutzzubereitungen, als Silberschutz in Haushaltsreinigungsmitteln, in Kühlflüssigkeit etc.. In Deutschland werden jährlich ca. 70 t/a Benzotriazol alleine in Geschirrspülmitteln verwendet (Will et al., 2013). Der Hauptanteil des Einsatzes der Chemikalie liegt jedoch im Korrosions- und Frostschutz sowie in der Flugzeugenteisung. Im Kläranlagenzulauf finden sich Konzentrationen von 5,2 bis 8,2 µg/L wieder (Thomann, 2013) und der Abbau in einer Kläranlage beträgt ca. 10 % (Abegglen und Siegrist, 2012). Mit der Einstufung in die Wassergefährdungsklasse 1 gilt Benzotriazol als schwach wassergefährdend. Bei einem Log-POW-Wert von 1,4 ist kein erhöhtes Bioakkumulationspotential zu erwarten (Will et al., 2013). Aufgrund der sehr hohen Konzentrationen im Zulauf der Kläranlage und der geringen Abbaubarkeit könnte Benzotriazol als Indikatorstoff bei einer Spurenanalytik aufgeführt werden.

2.3.5 Metoprolol

Das als Spurenstoff im Abwasser vorkommende Pharmazeutikum Metoprolol gehört in den Anwendungsbereich der Betarezeptorblocker. Als Haupteintragsquellen können das häusliche und Klinikabwasser ausgemacht werden, wo es über Ausscheidungen und unsachgemäße Entsorgung eingetragen wird. Im Kläranlagenzulauf befinden sich ca. 1,8 µg/L des Pharmazeutikums Metoprolol und der Abbau in im Reinigungsprozess beläuft sich auf ca.

20 % (Luo et al., 2014). Der kalkulierte log POW-Wert von Metoprolol liegt bei $1,789 \pm 0,355$ bei einem pH-Wert von 7 (Fahlenkamp et al., 2006). Sattelberger (1999) bezeichnet Metoprolol als ubiquitär verbreitete Kontamination von Oberflächengewässern und aufgrund der Umwelttoxizität des Stoffes ist es sinnvoll dieses Pharmazeutikum als einen zusätzlichen Indikatorstoff aufzunehmen.

2.3.6 Eliminationsleistungen aus der Literatur

In der nachfolgenden Tabelle sind Eliminationsleistungen der ausgewählten Mikroverunreinigungen für Verfahren mit Pulveraktivkohle aufgeführt.

Tabelle 2: Eliminationsleistungen ausgewählter Mikroverunreinigungen durch Pulveraktivkohle

Stoff	Dosierung	Verfahrensvariante	Rückführung	Eliminationsleistung	Quelle	
Carbamazepin	5 mg/L	nachgeschaltet	mit	62%	Arge (2011)	
	10 mg/L	nachgeschaltet	ohne	80 - 90 %	Zwickenpflug et al. (2010); Fahlenkamp et al. (2006); Metzger und Kapp (2008); Arge (2013); Metzger et al. (2012)	
		nachgeschaltet	mit	90%	Zwickenpflug et al. (2010); Arge (2011)	
		in Überstau Flockung		58%	Bornemann und Pinnekamp (2012)	
	15 mg/L	in Belebung		ohne	90%	Arge (2013)
					90 - 95 %	Pinnekamp (2011); Arge (2011)
				mit	97%	Zwickenpflug et al. (2010)
	20 mg/L	in Überstau Flockung			82 - 90 %	Bornemann und Pinnekamp (2012)
		nachgeschaltet	mit		92%	Arge (2011)
		nachgeschaltet	ohne		95 - 97 %	Metzger und Kapp (2008); Metzger et al. (2012)
	30 mg/L	in Belebung			95%	Zwickenpflug et al. (2010)
		nachgeschaltet	ohne		94%	Metzger et al. (2012)
40 mg/L	in Überstau Flockung			89%	Bornemann und Pinnekamp (2012)	
Diclofenac	5 mg/L	nachgeschaltet	mit	66%	Arge (2011)	
	10 mg/L	nachgeschaltet	ohne	64 - 90 %	Zwickenpflug et al. (2010); Fahlenkamp et al. (2006); Metzger und Kapp (2008); Arge (2013)	
		nachgeschaltet	mit		86 - 88%	Arge (2011); Zwickenpflug et al. (2010)
		in Überstau Flockung			52%	Bornemann und Pinnekamp (2012)
	15 mg/L	in Belebung			71%	Zwickenpflug et al. (2010)
		nachgeschaltet	mit		95 - 98%	Zwickenpflug et al. (2010)
		nachgeschaltet	ohne		90%	Arge (2013)
	20 mg/L	in Überstau Flockung			78 - 90 %	Bornemann und Pinnekamp (2012)
		nachgeschaltet	mit		92%	Arge (2011)
		nachgeschaltet	ohne		94 - 95%	Metzger und Kapp (2008); Metzger et al. (2012)
	30 mg/L	in Belebung			90-92%	Pinnekamp (2011)
		nachgeschaltet	ohne		95%	Metzger et al. (2012)
40 mg/L	in Überstau Flockung			89%	Bornemann und Pinnekamp (2012)	

2 Grundlagen

Metoprolol	5 mg/L	nachgeschaltet	mit	78%	Arge (2011)
	10 mg/L	nachgeschaltet	ohne	86 - 95 %	Fahlenkamp et a. (2006); Metzger und Kapp (2008); Metzger et al. (2012); Arge (2013)
		nachgeschaltet	mit	87%	Arge (2011)
		in Überstau Flockung		63%	Bornemann und Pinnekamp (2012)
	15 mg/L	in Belegung		90%	Pinnekamp (2011)
		nachgeschaltet	ohne	90%	Arge (2013)
		nachgeschaltet	mit	97%	Arge (2011)
	20 mg/L	in Überstau Flockung		82 - 93 %	Bornemann und Pinnekamp (2012)
		nachgeschaltet	mit	97%	Arge (2011)
		nachgeschaltet	ohne	95 - 98 %	Metzger und Kapp (2008)
40 mg/L	in Überstau Flockung		91%	Bornemann und Pinnekamp (2012)	
Sulfamethoxazol	5 mg/L	nachgeschaltet	mit	3%	Arge (2011)
	10 mg/L	nachgeschaltet	ohne	10 - 80 %	Metzger et al. (2012); Arge (2013); Zwickenpflug et al. (2010)
		nachgeschaltet	mit	50 - 78 %	Zwickenpflug et al. (2010):
		in Überstau Flockung		8%	Bornemann und Pinnekamp (2012); Arge (2011)
	15 mg/L	in Belegung		28%	Zwickenpflug et al. (2010)
		nachgeschaltet	mit	87 - 94 %	Zwickenpflug et al. (2010); Arge (2011)
		nachgeschaltet	ohne	90%	Arge (2013)
	20 mg/L	in Überstau Flockung		45 - 58 %	Bornemann und Pinnekamp (2012)
		nachgeschaltet	mit	93%	Arge (2011)
		nachgeschaltet	ohne	45%	Metzger et al. (2012)
	30 mg/L	in Belegung		37%	Zwickenpflug, et al. (2010)
		nachgeschaltet	ohne	92%	Metzger et al. (2012)
	40 mg/L	in Überstau Flockung		67%	Bornemann und Pinnekamp (2012)
Benzotriazol	5 mg/L	nachgeschaltet	mit	58%	Arge (2011)
	10 mg/L	nachgeschaltet	ohne	67 - 95%	Zwickenpflug et al. (2010); Metzger und Kapp (2012); Arge (2013)
			mit	83 - 99%	Zwickenpflug, B. (2010)
		in Überstau Flockung		60%	Bornemann und Pinnekamp (2012)
	15 mg/L	in Belegung		81%	Zwickenpflug, et al. (2010)
		nachgeschaltet	mit	90 - 99 %	Arge (2011); Zwickenpflug, et al. (2010)
	20 mg/L	in Überstau Flockung		70%	Bornemann und Pinnekamp (2012)
		nachgeschaltet	mit	89%	Arge (2011)
		nachgeschaltet	ohne	92%	Metzger et al. (2012)
	30 mg/L	in Belegung		94%	Zwickenpflug, et al. (2010)
		nachgeschaltet	ohne	95%	Metzger et al. (2012)
40 mg/L	in Überstau Flockung		93%	Bornemann und Pinnekamp (2012)	

3 Material und Methoden

3.1 Aufbau und Betrieb der Versuchsanlage

Die halbtechnische Versuchsanlage auf dem Gelände des Klärwerkes Düsseldorf-Süd besteht aus zwei voneinander unabhängigen, baugleichen, parallelen Reinigungsstraßen. Die Straßen bestehen jeweils aus einem Belebungs- und anschließendem Nachklärbecken. Das Belebungsbecken besitzt pro Reinigungsstraße ein Volumen von 39 m³, wobei davon 25 % oder 50 % dieses Volumens mithilfe von Bohlen flexibel abgetrennt werden können. Innerhalb dieses Projektes wurde die Anlage mit 50 % Denitrifikationsvolumen nach dem Prinzip der vorgeschalteten Denitrifikation betrieben. Der Zulauf zum Nitrifikationsteil des Beckens wurde durch Unterströmen der Bohlenwand realisiert. Die Nitrifikationsbecken sind mit jeweils acht Membran-Tellerbelüftern ausgestattet, die von der Firma GVA – Gesellschaft für Verfahren der Abwassertechnik mbH & Co. KG bereitgestellt wurden. Die Nachklärbecken weisen jeweils ein Volumen von 6,5 m³ auf. Ein Fließschema der Anlage ist in Abbildung 6 und einige Ansichten der Anlage sind in Abbildung 7 dargestellt.

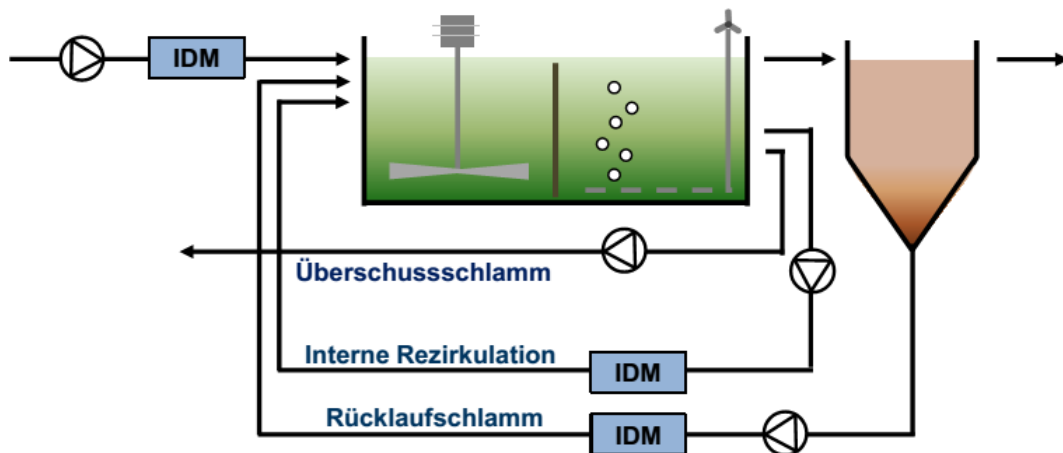


Abbildung 6: Fließschema einer Reinigungsstraße der halbtechnischen Versuchsanlage



Abbildung 7: Ansicht der Versuchsanlage

Die Anlage wurde mit einem konstanten Zulauf von 1,3 m³/h und einem Rückführverhältnis von 5 betrieben. Die interne Rezirkulation wurde in etwa auf mittlerer Höhe an der Stirnseite des Nitrifikationsbeckens abgezogen und vorne in das Denitrifikationsbecken geführt. Der Volumenstrom der Rezirkulation betrug konstant 5,2 m³/h. Der Rücklaufschlammvolumenstrom wurde auf 1,3 m³/h eingestellt, wodurch sich ein Rücklaufverhältnis von 1 ergab. Der Abzug des Überschussschlammes wurde über einen automatischen Kugelhahn an der Beckensohle des Nitrifikationsbeckens geregelt und war an den Trockensubstanzgehalt im Belebungsbecken gekoppelt. Dabei wurden die Kugelhähne über das Prozessleitsystem WAGO so programmiert, dass sie sich, sofern der TS-Wert den Sollwert 2,5 kg/m³ übersteigt (Zu Beginn 3,3 g/m³), für maximal eine Minute öffneten. Diese Überprüfung fand alle zehn Minuten statt. Der Sauerstoffgehalt im Nitrifikationsbecken wurde ebenfalls über das Prozessleitsystem geregelt. Die Regelung wurde durch Öffnen und Schließen der Luftventile realisiert. Der Sauerstoffgehalt wurde dabei kontinuierlich in beiden Nitrifikationsbecken von LDO Sonden der Firma Hach Lange erfasst. Stieg dieser über 2,7 mg_{O₂}/L wurde das Luftventil weiter geschlossen. Sank der Sauerstoffgehalt unter 2,0 mg_{O₂}/L, dann wurde es weiter geöffnet, was eine stärkere Luftzufuhr zur Folge hatte. Da die Belüftung beider Straßen über ein gemeinsames Gebläse stattfand, resultierte diese Regelung in einen antizyklisch schwankenden Sauerstoffgehalt um den Wert 2,0 mg_{O₂}/L. Beim Zulauf zur halbtechnischen Versuchsanlage handelte es sich um kommunales Abwasser aus dem Ablauf der Vorklärbecken des Klärwerks Düsseldorf Süd. Dieses Abwasser ist bezogen auf die TOC-Fracht durch einen hohen industriellen Anteil geprägt.

In der nachfolgenden Tabelle sind alle relevanten Betriebsgrößen der Anlage zusammengefasst.

Tabelle 3: Betriebsdaten der halbtechnischen Versuchsanlage Düsseldorf

Verfahren	Vorgeschaltete Denitrifikation							
Beckenvolumen	39 m ³							
Anteil Denitrifikation	50 %							
Zulaufvolumenstrom	konstant 1,3 m ³ /h							
Mittlere Zulaufwerte	TOC 180 mg/L		TNb 69 mg/L			P _{ges} 7,4 mg/L		
TS-Gehalt	2,5 g/L (begonnen mit 3,3)							
Schlammalter	zwischen 17 und 25 Tagen							
Rücklaufverhältnis	1							
Rückführverhältnis	5							
Mittlere Ablaufwerte	Teststraße				Referenzstraße			
	NH ₄ -N 0,4 mg/L	NO ₃ -N 4,3 mg/L	P _{ges} 2,0 mg/L	TOC 13,1 mg/L	NH ₄ -N 0,4 mg/L	NO ₃ -N 3,6 mg/L	P _{ges} 2,5 mg/L	TOC 14,1 mg/L
Betriebstemperatur	ca. 16 – 24 °C							

Die Inbetriebnahme der Anlage erfolgte zum 1. März 2013. Die anschließende Einlaufphase beider Straßen lief bis Mitte Mai 2013 und wurde – wie auch über die Gesamtdauer des Projektes - durch die Analytik auf den TOC, Ammonium- und Nitratstickstoff und Gesamtphosphor sowie Nitrit aus den Abläufen der beiden Nachklärungen und durch die Analytik auf den TOC und den TNb sowie Gesamtphosphor aus dem Ablauf der Vorklärung des Großklärwerkes, was dem Zulauf beider Straßen der halbtechnischen Anlage entspricht, begleitet. Die TOC-Analytik erfolgte in den Chemisch-Biologischen Laboratorien des Stadtentwässerungsbetriebes nach DIN, die Analytik auf die Nährstoffe (Stickstoffparameter und Phosphor) ebenfalls dort mit Hilfe der entsprechenden Betriebsmethoden (Hach-Lange-Messverfahren). Darüber hinaus wurden das mikroskopische Schlammbild und die Schlammcharakteristik mehrfach pro Woche geprüft und dokumentiert. Die Befunde der Mikroorganismen im Belebtschlamm sind in Anhang K zusammengefasst.

Mit der Aktivkohledosierung für die erste PAK-Zielkonzentration von $10 \text{ g}_{\text{PAK}}/\text{m}^3$ wurde im Mai 2013 begonnen. Dazu wurde aus dem z.T. stichfest angelieferten Material in einem Rührkessel eine Suspension erzeugt, aus dem mittels einer Schlauchpumpe ein kontinuierlicher Massenstrom in das Belebungsbecken der Messstraße dosiert wurde.

Nach einer weiteren Einlaufzeit zur Einstellung einer konstanten Konzentration an Pulveraktivkohle in der Messstraße wurde Mitte Juni mit den regelmäßigen Probenahmen zur Ermittlung der Spurenstoffkonzentrationen begonnen. Probenahmen wurde nur bei Trockenwetter durchgeführt; als Kriterium für „Trockenwetter“ wurde eine mittlere Tagesabwassermenge von $< 90.000 \text{ m}^3$ über den Probenahmezeitraum im Großklärwerk festgelegt. Die Probenahme erfolgte mittels automatisierter Dauerprobenahmeschränke in auf $4 \text{ }^\circ\text{C}$ thermostatisierte Glasgefäße, um Probengutverluste durch Adsorption an Gefäßwänden zu vermeiden. Die Analysen der Spurenstoffe Benzotriazol (Industriechemikalie, Korrosionsinhibitor), Diclofenac (Schmerzmittel), Carbamazepin (Antiepileptikum), Metoprolol (Betablocker) und Sulfamethoxazol (Antibiotikum) wurde an das Institut für Energie- und Umwelttechnik e.V. (IUTA), Bliersheimer Straße 60, D-47229 Duisburg, das über validierte Analyseverfahren verfügt, vergeben. Die Ergebnisse der insgesamt 12 Messungen bei einer PAK-Konzentration von $10 \text{ g}_{\text{PAK}}/\text{m}^3$ sind unter anderem in Anhang L gelistet.

Mitte September wurde nach Abschluss der ersten Messreihe die PAK-Dosierung für eine Zielkonzentration von $20 \text{ g}_{\text{PAK}}/\text{m}^3$ in der Belebung erhöht. Erste Spurenstoffkonzentrationsbestimmungen erfolgten noch im September und insgesamt wurden 15 Messungen bei der verdoppelten PAK-Konzentration durchgeführt. Die Ergebnisse sind in Anhang L aufgeführt.

3.2 Analysemethoden

3.2.1 Routineanalytik

Mit der Routineanalytik sollten der Betrieb der halbtechnischen Anlagen überwacht und dokumentiert werden, sowie Auswirkungen durch technische Ausfälle beschrieben werden können. Darüber hinaus sollte eine ständige Vergleichbarkeit zwischen den Betriebszuständen der Testanlage und der Kontrollanlage gewährleistet sein. Hierzu wurden verschiedene einzuhaltende Kriterien überwacht.

In der Einfahrphase sollten die folgenden Kriterien eingestellt und in der Testphase dann eingehalten werden:

- a Kohlenstoffelimination > 85 % und TOC < 20 mg/L
- b Stickstoffelimination für anorganisch gebundenen Stickstoff > 80 % und $N_{\text{anorg.ggeb.}}$ < 15 mg/L
- c Für die Phosphorelimination wurden die Qualitätskriterien ausgesetzt, da keine geregelte P-Elimination vorgesehen war
- d Die Eliminationsleistungen für TOC und $N_{\text{anorg.ggeb.}}$ dürfen in der Test- und Kontrollanlage um nicht mehr als 15 % voneinander abweichen (Bendt, 2012).

Die Zu- und Abläufe der halbtechnischen Anlagen wurden mittels 24-Stunden-Mischprobe überwacht. Die Nitritbestimmung erfolgte aus wöchentlich durchgeführten Stichproben. Belebtschlammproben wurden zu gleichen Teilen aus der Denitrifikationszone und der belüfteten Zone gezogen. Aus dem Zulauf beider Anlagen sowie aus dem Ablauf der Vorklärung des Klärwerkes Düsseldorf-Süd wurde täglich der TOC bestimmt und arbeitstäglich Gesamtphosphor und TN_b untersucht. Die Anlagenabläufe wurden arbeitstäglich über die Parameter Ammonium-Stickstoff, Nitrat-Stickstoff, Gesamtphosphor, TOC, DOC (Glasfaserfilter GF6) und abfiltrierbare Stoffe überwacht. Neben den Online-Messungen auf Sauerstoff und TS in den Belebungsbecken wurden zweimal wöchentlich die Trockensubstanz sowie wöchentlich Glühverlust, Schlammvolumen und Schlammvolumenindex bestimmt.

Für die Überwachung der Betriebsfunktionen der Kontroll- und Testanlage wurden folgende Analysenverfahren angewendet:

Nitrat in den Anlagenabläufen:

Betriebsmethode, Hach Lange, LCK 339 mit einem Messbereich von 0,23 bis 13,5 mg/L NO_3-N , Qualitätssicherung und Kontrolle durch ADDISTA LCA 703: $6,0 \pm 0,4$ mg/L NO_3-N ,

Nitrit in den Anlagenabläufen:

Betriebsmethode, Hach Lange, LCK 341 mit einem Messbereich von 0,015 bis 0,6 mg/L NO_2-N , Qualitätssicherung und Kontrolle durch ADDISTA LCA 707: $0,3 \pm 0,03$ mg/L NO_2-N ,

Ammonium im Zulauf:

Betriebsmethode, Hach Lange, LCK 303 mit einem Messbereich von 2,0 bis 47,0 mg/L NH_4-N , Qualitätssicherung und Kontrolle durch ADDISTA LCA 703: $25 \pm 1,5$ mg/L NH_4-N ,

Ammonium in den Abläufen:

Betriebsmethode, Hach Lange, LCK 304 mit einem Messbereich von 0,015 bis 2,0 mg/L NH₄-N, Qualitätssicherung und Kontrolle durch ADDISTA LCA 700: 1,0 ±0,1 mg/L NH₄-N,

Gesamtstickstoff TN_b im Zulauf:

Betriebsmethode, Hach Lange, LCK 338 mit einem Messbereich von 20 bis 100 mg/L TN_b, Qualitätssicherung und Kontrolle durch ADDISTA LCA 708: 60 ±6 mg/L TN_b,

Gesamtphosphor im Zulauf:

Betriebsmethode, Hach Lange, LCK 350 mit einem Messbereich von 2,0 bis 20,0 mg/L PO₄-P, Qualitätssicherung und Kontrolle durch ADDISTA LCA 708: 10 ±1 mg/L PO₄-P,

Gesamtphosphor in den Abläufen:

Betriebsmethode, Hach Lange, LCK 349 mit einem Messbereich von 0,05 bis 1,5 mg/L PO₄-P, Qualitätssicherung und Kontrolle durch ADDISTA LCA 704: 1,0 ±0,1 mg/L PO₄-P und

Betriebsmethode, Hach Lange, LCK 348 mit einem Messbereich von 0,5 bis 5,0 mg/L PO₄-P, Qualitätssicherung und Kontrolle durch ADDISTA LCA 700: 2,0 ±0,2 mg/L PO₄-P,

Die Durchführung aller genannten Betriebsmethoden erfolgte mit dem Hach-Lange-Fotometer Xion 500.

TOC und DOC in den Zu- und Abläufen der halbtechnischen Kläranlagen:

Anleitung zur Bestimmung des gesamten organischen Kohlenstoffs (TOC) und des gelösten organischen Kohlenstoffs (DOC), DIN EN 1484 Teil 3, 40. Lieferung, 1998 (DIN EN 1484-3, 1998), Die TOC-Messungen erfolgten mit den Shimadzu TOC-V_{CPN} und Analytik Jena multi N/C 2000.

Abfiltrierbare Stoffe in den Anlagenabläufen:

Bestimmung der abfiltrierbaren Stoffe und des Glühverlustes, Summarische Wirkungs- und Stoffkenngrößen, DIN 38 409 Teil 2, 18. Lieferung, 1987 (DIN 38 409-2, 1987),

Bestimmung der Trockensubstanz von belebten Schlämmen der biologischen Reinigungsstufen:

Bestimmung des Gesamttrockenrückstandes, des Filtrattrockenrückstandes und des Glührückstandes, DIN 38 409 Teil 1-2, 18. Lieferung, 1987 (DIN 38 409-1, 1987; DIN 38 409-12, 1987)

Bestimmung des Glühverlustes der Trockensubstanz von belebten Schlämmen der biologischen Reinigungsstufen:

Bestimmung des Gesamttrockenrückstandes, des Filtrattrockenrückstandes und des Glührückstandes, DIN 38 409 Teil 1-2, 18. Lieferung, 1987 (DIN 38 409-1, 1987; DIN 38 409-12, 1987).

Bestimmung des Schlammvolumenindex belebter Schlämme:

Teil 1: Bestimmung der Absetzbarkeit (Bestimmung des Schlammvolumens und des Schlammvolumenindex), DIN EN 14702-1,79. Lieferung, 2010 (DIN EN 14702-1, 2010)

3.2.2 Mikroskopie

Mikroskopische Untersuchungen wurden zwischen der Einfahrphase und dem Ende der Versuche einmal pro Woche für beide biologischen Reinigungsstraßen durchgeführt. Ziel war es, die Belebtschlammbiozönose stabil zu halten und Bläh- bzw. Schwimmschlammbildung früh zu erkennen und zu vermeiden. Darüber hinaus wurden die Beobachtungen auf schlammfressende Organismen fokussiert. Auch die Vergleichbarkeit der Belebtschlämme sollte dokumentiert werden. Hierfür wurden die Belebtschlammorganismen bestimmt und in ihren Häufigkeiten dokumentiert. Die spätere Auswertung erfolgte über den Sørensen-Vergleichsindex (Sørensen, 1948). Die Abundanzbestimmung erfolgte nach der Norm „Bestimmung des Saprobienindex in Fließgewässern“, DIN 38410-1, Teil 1, 62. Lieferung 2005 (DIN 38410-1, 2005) und die Bestimmung der Mikroorganismen unter anderem nach Berger, Foissner und Kohmann (DIN 38410, 1997).

3.2.3 Spurenstoffanalytik

Im Rahmen des Projektes ist die Analytik der Spurenstoffe durch das Institut für Energie- und Umwelttechnik e. V. (IUTA) in Duisburg durchgeführt worden. Zur Charakterisierung der Prozesse wurden sowohl Wasser- als auch Klärschlammproben untersucht. In allen Proben sind die Industriechemikalie 1*H*-Benzotriazol, das Antiepileptikum Carbamazepin, das Analgetikum Diclofenac, der Betablocker Metoprolol und das Antibiotikum Sulfamethoxazol untersucht worden (siehe Tabelle 4). Die Auswahl der Stoffe orientiert sich an den bereits im Rahmen des Projektes „Elimination von Arzneimitteln und organischen Spurenstoffen: Entwicklung von Konzeptionen und innovativen, kostengünstigen Reinigungsverfahren - Elimination von Arzneimittelrückständen in kommunalen Kläranlagen“ zur Prozessoptimierung analysierten Stoffen (Arge, 2013). Alle hier untersuchten Stoffe sind in Kläranlagenabläufen im Bereich von ca. 0,5 µg/L bis hin zu mehr als 10 µg/L nachweisbar.

Tabelle 4: Leitparameter mit CAS-Nummern und Summenformeln

Substanz	CAS-Nummer	Summenformel
1 <i>H</i> -Benzotriazol	59-05-2	C ₂₀ H ₂₂ N ₈ O ₅
Carbamazepin	298-46-4	C ₁₅ H ₂₂ N ₂ O
Diclofenac	15307-86-5	C ₁₄ H ₁₁ Cl ₂ NO ₂
Metoprolol	37350-58-6	C ₁₅ H ₂₅ NO ₃
Sulfamethoxazol	723-46-6	C ₁₀ H ₁₁ N ₃ O ₃ S

Probenvorbereitung der Wasserproben

Die Extraktion der Wasserproben erfolgt nach Druckfiltration mit anschließender Festphasenextraktion (SPE – solid phase extraction). Dazu wird 1 L der Probe auf einen pH-Wert von 3 eingestellt und mit internem Standard versetzt. Die Festphasenextraktion erfolgt über

Oasis HLB Kartuschen der Firma Waters auf einem automatischen Probenvorbereitungssystem GX 821 (Gilson international).

Das Eluat wird unter Stickstoffstrom bis zur Trockene eingengt und mit 1 mL der mobilen Phase aufgenommen, über einen Spritzenfilter filtriert und auf zwei HPLC-Vials verteilt.

Parallel zu den Wasserproben werden eine QC Probe und eine Blindwertprobe aufgearbeitet. Für die QC Probe wird 1 L VE-Wasser mit jeweils 100 ng der in Tabelle 4 erwähnten Substanzen und dem internen Standard versetzt.

Probenvorbereitung der Klärschlammproben

Die flüssigen Klärschlammproben werden zunächst gewogen und zentrifugiert (4.000 U/min ca. 10 Minuten, Zentrifuge: CR422, Jonau). Die Wasserphase wird dekantiert, das Gewicht der Schlammphase bestimmt und die Schlammphase der Gefriertrocknung (beta 1-16 LDG 2-m Martin Christ Gefriertrocknungsanlagen GmbH) zugeführt. Die Proben werden auf -20 °C vorgefroren und bei einem Vakuum von 1,030 kPa und 10 °C getrocknet. Nach Erreichen dieser Produkttemperatur wird der Druck für zwei Stunden auf 0,001 kPa eingestellt und so nachgetrocknet. Das Lyophilisat (Trockensubstanz) wird gewogen.

Die Extraktion der Schlammproben erfolgt mittels beschleunigter Lösemittelextraktion (ASE - accelerated solvent extraction) bei einer Temperatur von 100 °C zu einem Druck von 100 bar (Dionex ASE200, Thermo Fischer GmbH). Die Extraktionsparameter sind in Tabelle 5 zu finden. Dazu werden im ersten Schritt 400 mg des gefriergetrockneten Klärschlammes eingewogen und mit Internem Standard versetzt.

Tabelle 5: Standardmethode der beschleunigten Lösemittelextraktion der Leitsubstanzen aus Klärschlamm

Extraktionsparameter	
Lösemittel	Methanol
Extraktionszyklen	1
Statische Extraktionsdauer	15 min
Spülvolumen	10 %
Spüldauer	150 s
Füllmaterial	Sand

Die Analyse erfolgt entsprechend der nachfolgend beschriebenen Analysenmethode. Anhand der Analyseergebnisse wird eine Standardadditionsreihe der Klärschlammprobe hergestellt. Dazu werden jeweils 400 mg der Klärschlammprobe abgewogen und mit 0, 1-, 2-, 3-, 4- und 5-facher Konzentration aller untersuchten Substanzen dotiert. Der methanolische Extrakt der ASE wird wie das Eluat der Wasserproben unter Stickstoffstrom bis zur Trockene eingengt und mit 1 mL Starteluent aufgenommen.

Die abgetrennte Wasserphase der Klärschlammproben wird wie vorab beschrieben vorbereitet.

Analysenmethoden

Nach der Probenvorbereitung erfolgt die Messung der Analyten mittels LC-MS/MS entweder am Q Trap 3200 Massenspektrometer (AB Sciex) mit einer Shimadzu Prominence LC-20

(Fa. Shimadzu) oder am API 3000 gekoppelt mit einer 1100 HPLC Anlage der Firma Agilent. Die Trennung der Analyten erfolgt auf einer Synergi 4u Polar –RP 80A Trennsäule der Firma Phenomenex. Als mobile Phasen werden Wasser und Acetonitril mit jeweils 0,1 % Ameisensäure verwendet. Die Ionisierung erfolgt mittels Elektrospray-Ionisation (ESI) im positiven Messmodus. Die Flussrate beträgt 350 µL/min und das Injektionsvolumen 20 µL. Der Lösemittelgradient des Q Trap Systems ist in Abbildung 8, der des API Systems in Abbildung 9 angegeben.

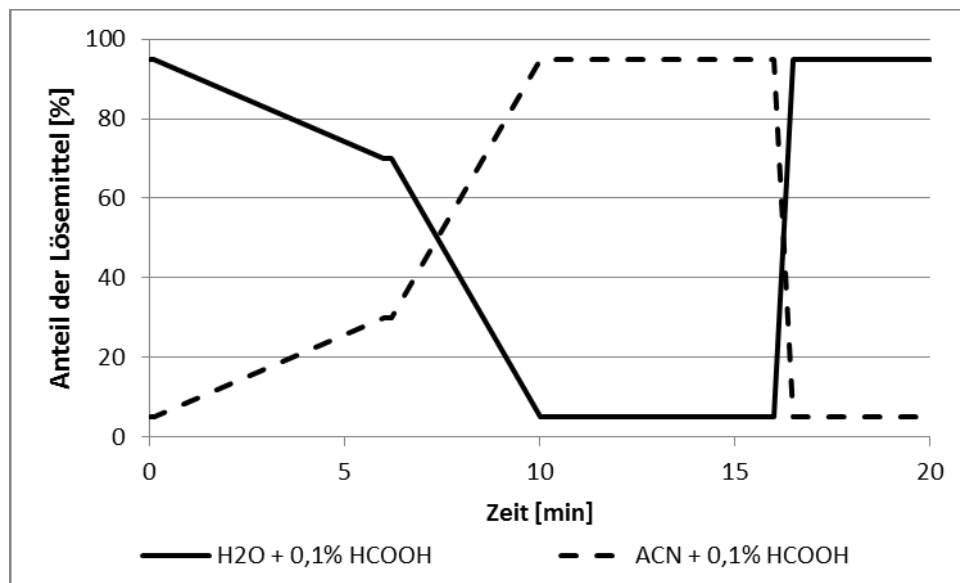


Abbildung 8: Gradienten der verwendeten Analysenmethode am Q Trap 3200 System

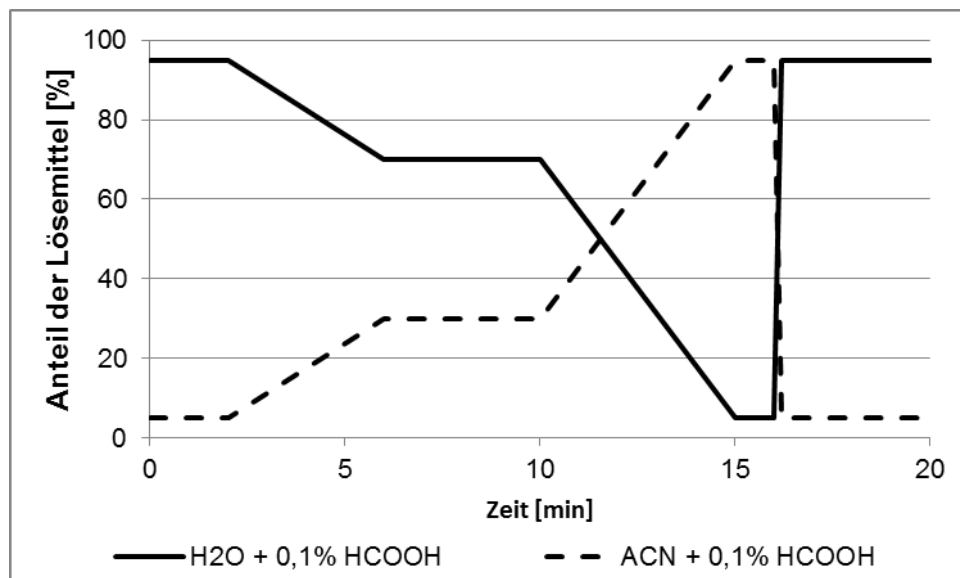


Abbildung 9: Gradienten der verwendeten Analysenmethode am API 3000 System

Die detektierten Massenübergänge (MRM) der einzelnen Substanzen sind in Tabelle 6 angegeben.

Tabelle 6: Massenübergänge der Verifizierung (V) und der Quantifizierung (Q)

Substanz	Q Trap 3200		API 3000	
	MRM 1 (Q) m/z	MRM 2 (V) m/z	MRM 1 (Q) m/z	MRM 2 (V) m/z
1H-Benzotriazol	120 □ 65	120 □ 92	120 □ 65	120 □ 92
Carbamazepin	237 □ 194	237 □ 165	237 □ 194	237 □ 192
Diclofenac	296 □ 214	296 □ 151	296 □ 215	296 □ 250
Metoprolol	269 □ 116	269 □ 56	269 □ 116	269 □ 56
Sulfamethoxazol	254 □ 156	254 □ 92	254 □ 156	254 □ 92

Die Bestimmungsgrenze (BG) wird tagesaktuell anhand des untersten Kalibrationspunktes der linearen Regression ermittelt. Die instrumentellen Validierungsdaten der Analysenmethode mit Nachweisgrenzen (NWG), Bestimmungsgrenzen und der mittleren Wiederfindungsrate (WDF) der QC-Proben sind in Tabelle 7 zu finden. Proben die außerhalb des linearen Arbeitsbereiches liegen werden entsprechend der zu erwartenden Konzentration verdünnt und erneut gemessen.

Tabelle 7: Instrumentelle Validierungsdaten der Analysenmethode

Substanz	Instrumentelle NWG [ng/mL]	Tagesaktuelle BG [ng/mL]	WDF [%]
1H-Benzotriazol	0,23	0,2	86
Carbamazepin	0,04	0,1	112
Diclofenac	0,04	0,1	95
Metoprolol	0,04	0,1	104
Sulfamethoxazol	0,18	0,2	105

Unter Einbeziehung des aufgearbeiteten Probenvolumens ergeben sich somit in Reinstwasser Bestimmungsgrenzen von < 1 ng/L für die einzelnen Analyten.

Die Auswertung erfolgt mit der Software Analyst oder MultiQuant (AB Sciex). Dazu werden die Peakflächenverhältnisse der einzelnen Komponenten zu dem internen Standard gegen die Konzentration aufgetragen und eine mit 1/x gewichtete lineare Regressionsgerade berechnet. Zusätzlich wird eine Wiederfindungsrate anhand der QC Probe bestimmt und das Ergebnis entsprechend korrigiert. Das Endergebnis wird in µg/L auf 2 signifikante Stellen gerundet angegeben.

Zur Auswertung der Klärschlammproben wird zunächst die Trockenmasse des Schlamms bestimmt. Die ermittelten Peakflächen werden gegen die im Vorfeld bestimmten Konzentrationen der Standardaddition aufgetragen (siehe Abbildung 10). Aus der linearen Regressionsgeraden ergeben sich Steigung, Achsenabschnitt und Bestimmtheitsmaß (R^2). Der Schnittpunkt der Regressionsgeraden entspricht der Peakfläche der Konzentration der Schlammprobe. Die aus der flüssigen Phase stammende Konzentration in der Trockenmasse wird aus dem Ergebnis herausgerechnet. Die Angabe des Ergebnisses erfolgt in ng/g TS.

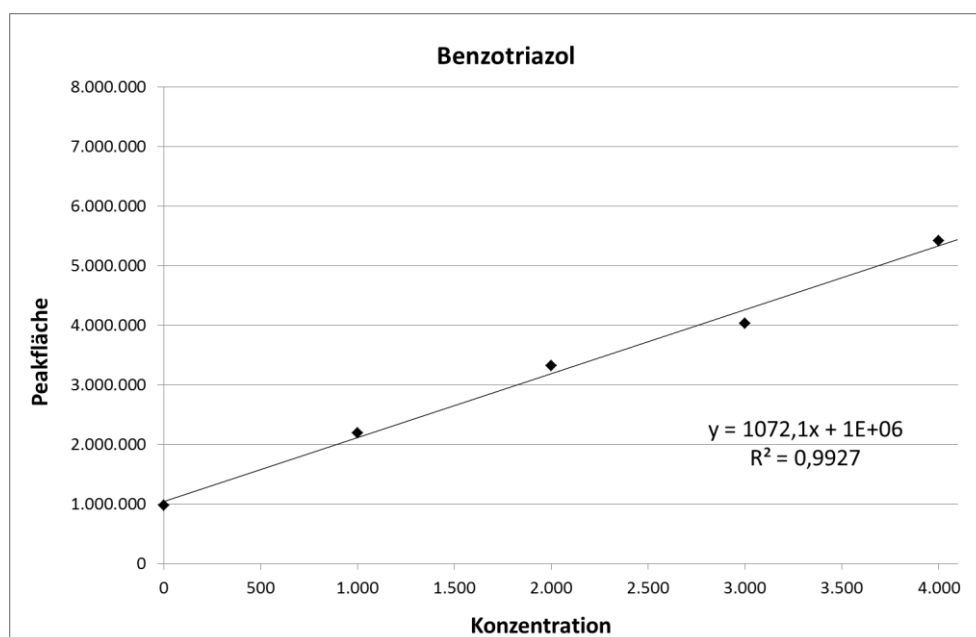


Abbildung 10: Auswertung der Standardaddition durch Auftragung der Konzentrationen gegen die ermittelten Peakflächen mit linearer Regressionsgeraden, Geradengleichung und Bestimmtheitsmaß

Messunsicherheitsabschätzung der Wasseranalytik

Zur Abschätzung der Messunsicherheit in Kläranlagenabläufen mittels LC-MS/MS wurden die Reproduzierbarkeit der Kalibration, Standardabweichungen der Wiederfindungsraten der QC Proben, die Probenvorbereitung, Verdünnungsfehler, Ungenauigkeiten der Waage, die Reinheit der verwendeten Standards und die Genauigkeit des automatischen Probenvorbereitungssystems in die Berechnung einbezogen. Eine Auflistung der Standardunsicherheiten (u) und der erweiterten Unsicherheiten (U) mit einem k -Faktor von 2 sind in Tabelle 8 zu finden.

Tabelle 8: Messunsicherheiten der Analytik von Kläranlagenabläufen mittels LC-MS/MS

Substanz	Gesamte kombinierte Standardunsicherheit u [%]	Erweiterte Unsicherheit U [%]
1H-Benzotriazol	±18	±35
Carbamazepin	±18	±36
Diclofenac	±15	±29
Metoprolol	±14	±27
Sulfamethoxazol	±9,1	±18

3.2.4 Reproduzierbarkeit der Schlammanalytik

Zur Bestimmung der Reproduzierbarkeit der Analytik der Schlammproben ist eine Dreifachbestimmung von mehreren Proben (Schlamm der Testanlage, Schlamm der Kontrollanlage, Faulschlamm) durchgeführt worden. Die Ergebnisse sind in den Tabellen 9 bis 11 zusammengefasst.

3 Material und Methoden

Tabelle 9: Dreifachbestimmung der Standardaddition der Klärschlammproben der Testanlage vom 30.12.2013

Substanz	1. Messung [ng/g TS]	2. Messung [ng/g TS]	3. Messung [ng/g TS]	Mittelwert [ng/g TS]	Relative Standard- abweichung [%]
1H-Benzotriazol	40.000	28.000	27.000	31.667	±23
Carbamazepin	2.100	1.200	1.000	1.433	±41
Diclofenac	1.900	1.300	1.100	1.433	±29
Metoprolol	4.600	3.100	2.900	3.533	±26
Sulfamethoxazol	520	590	520	543	±7,4

Tabelle 10: Dreifachbestimmung der Standardaddition der Klärschlammproben der Kontrollanlage vom 30.12.2013

Substanz	1. Messung [ng/g TS]	2. Messung [ng/g TS]	3. Messung [ng/g TS]	Mittelwert [ng/g TS]	Relative Standard- abweichung [%]
1H-Benzotriazol	470	540	850	620	±33
Carbamazepin	36	27	25	29	±20
Diclofenac	65	150	n. a.	108	±56
Metoprolol	42	51	57	50	±15
Sulfamethoxazol	< 10	23	< 10	23	-

Tabelle 11: Dreifachbestimmung der Standardaddition des Faulschlammes der Batchversuche vom 07.03.2014

Substanz	1. Messung [ng/g TS]	2. Messung [ng/g TS]	3. Messung [ng/g TS]	Mittelwert [ng/g TS]	Relative Standard- abweichung [%]
1H-Benzotriazol	9.500	11.000	15.000	11.833	±24
Carbamazepin	880	1.100	1.300	1.093	±19
Diclofenac	2.800	2.700	2.200	2.567	±13
Metoprolol	1.800	2.400	4.000	2.733	±42
Sulfamethoxazol	< 50	< 50	< 50	-	-

3.3 Absetzversuche

3.3.1 Belebtschlamm der halbtechnischen Versuchsanlage

Zur Bestimmung des Schlammvolumenindexes wurde wöchentlich, beginnend mit Start der Aktivkohledosierung, in beiden Reinigungsstraßen der halbtechnischen Versuchsanlage der ISV im Labor des Stadtentwässerungsbetriebes Düsseldorf nach DIN EN 14702-1 (2010) ermittelt.

Zusätzlich wurden direkt vor Ort in der Zeit vom 24.06.2013 bis 16.12.2013 weitere Absetzversuche nach DIN EN 14702-1(2010) durchgeführt, in denen vor allem die Absetzgeschwindigkeit genauer betrachtet wurde (Lauterbach, 2014). Zu diesem Zweck wurden zwei Standzylinder aus Kunststoff (1.000 mL) am Rand des Belebungsbeckens aufgestellt. Dadurch war ein zeitnahes Absetzen nach der Entnahme des Belebtschlammes realisierbar. Die Belebtschlammproben wurden zu gleichen Teilen aus der Denitrifikations- und Nitrifikationszone entnommen und vor Versuchsbeginn in einem Glasgefäß durch leichtes Schwenken homogenisiert. Diese Mischprobe wurde in den Standzylinder überführt und dort ungestört für 30 Minuten belassen. Die Schlammspiegelhöhe wurde in den ersten zehn Minuten des Versuches alle 2 Minuten und danach alle 5 Minuten aufgezeichnet. Lag das Schlammvolumen nach 30 Minuten über 250 mL, wurde der Versuchsablauf erneut mit 500 mL Belebtschlamm und 500 mL Ablauf des Nachklärbeckens durchgeführt.

3.3.2 Aktivkohledosierung zum Belebtschlamm des Großklärwerkes Düsseldorf-Süd

Für die zweite Versuchsreihe dieses Arbeitspakets wurden jeweils Mischproben bestehend aus gleichen Teilen (2 Liter) aus den Nitrifikations- und Denitrifikationszonen aller vier Belebungsbecken der Kläranlage Düsseldorf-Süd angefertigt. Eine Mischprobe hatte somit ein Volumen von 16 Litern. Die Probenahme fand am frühen Morgen statt und im Anschluss daran wurden die Mischproben direkt in das Labor des Lehrstuhls für Siedlungswasserwirtschaft und Umwelttechnik an der RUB transportiert, so dass die Absetzversuche noch am selben Tag durchgeführt werden konnten. Dort angekommen wurde der Schlamm in ein großes Becherglas überführt und kontinuierlich gerührt. Aus diesem Becherglas wurde nach und nach der Schlamm für die einzelnen Versuche entnommen und in 1-Liter Standzylinder gefüllt. Für die Versuche mit PAK-Dosierung wurde die erforderliche Menge PAK (5 mg_{PAK}/L, 10 mg_{PAK}/L, 20 mg_{PAK}/L und 40 mg_{PAK}/L) mit einer Analysewaage abgewogen und dem Belebtschlamm hinzugefügt. Um eine ausreichende Einbindung der PAK in den Belebtschlamm zu gewährleisten, wurden alle Proben vor Beginn des Absetzvorgangs 30 Minuten belüftet. Der Versuchsaufbau sowie Bilder aus Belüftungs- und Absetzphase sind in Abbildung 11 dargestellt.

Während des 30-minütigen Absetzversuches wurde für die Dauer der ersten zehn Minuten wieder alle zwei Minuten ein Wert für die Schlammspiegelhöhe abgelesen und im Anschluss daran nur noch alle 5 Minuten. Es wurde jeweils immer ein Versuch mit und ohne PAK-Dosierung parallel durchgeführt, um eine Verschlechterung des Absetzverhaltens durch die Versuchsdauer als Einflussfaktor ausschließen zu können.

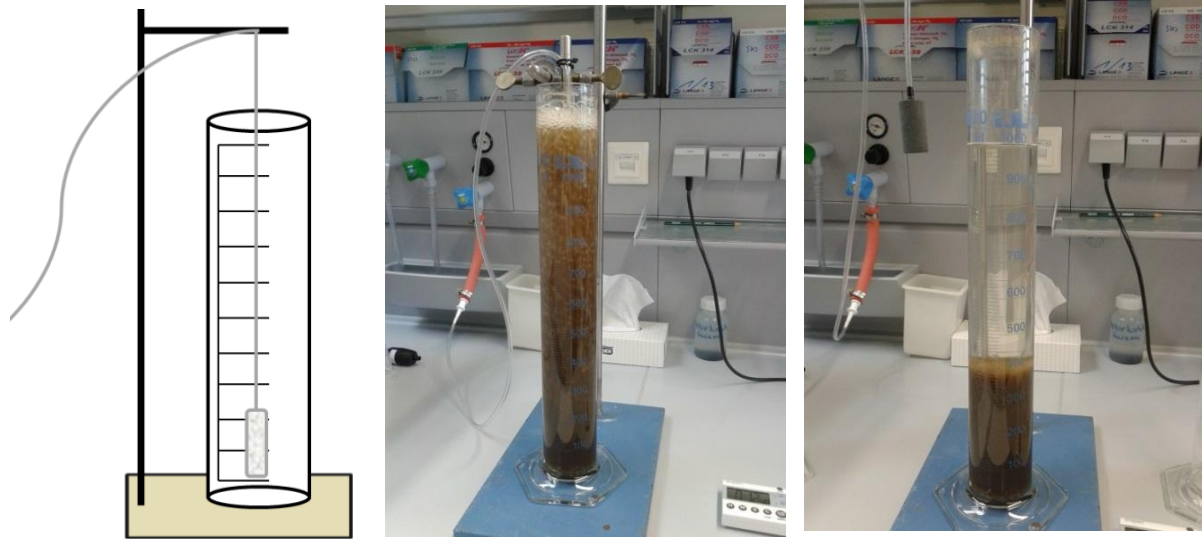


Abbildung 11: links: Versuchsaufbau PAK-Dosierversuche mit Belebtschlamm des Klärwerks Düsseldorf-Süd, Mitte: Belüftungsphase, rechts: Absetzphase während der Versuchsdurchführung

3.4 Entwässerungsversuche

Für die Entwässerungsversuche wurden in regelmäßigen Abständen Proben des Belebtschlammes beider Reinigungsstraßen der halbtechnischen Versuchsanlage genommen. Die Probenahme erfolgte jeweils morgens, mit direkt anschließendem Transport der Proben zum Labor des Lehrstuhls für Siedlungswasserwirtschaft und Umwelttechnik an der RUB, damit die Versuche noch am selben Tag durchgeführt werden konnten und die Entwässerungseigenschaften somit nicht durch biologische Prozesse, Lagerung oder Temperaturunterschiede beeinflusst werden konnten (DIN EN 12880-2a, 2001; Coskun, 2014). Es wurden jeweils Mischproben zu gleichen Teilen aus Nitrifikations- und Denitrifikationsbecken der beiden Reinigungsstraßen hergestellt. Im Labor wurden die Proben jeweils in Bechergläser überführt und kontinuierlich mit zwei identischen Magnetrührern durchmischt. Die Versuche wurden durchgängig bei 20 °C durchgeführt. Für alle Versuche wurden die entsprechenden Mengen Belebtschlamm in spezielle Bechergläser überführt, diese in die Zentrifuge eingesetzt und der Versuch begonnen. Bei der Zentrifuge handelte es sich um eine Laborzentrifuge „Multifuge X3 FR“ der Firma Heraeus (siehe Abbildung 12), deren Rotor eine maximale Geschwindigkeit von 4.700 U/min erreichte. Der Rotor war mit vier Gehängen (siehe Abbildung 12) ausgestattet, in die Bechergläser von unterschiedlicher Größe eingesetzt werden konnten. Sämtliche Parameter, wie Temperatur, Drehzahl und Laufzeit konnten über das Display vor jedem Versuchsdurchlauf eingestellt werden. Die Laufzeit der Zentrifuge startet erst nach Erreichen der gewählten Umdrehungszahl.

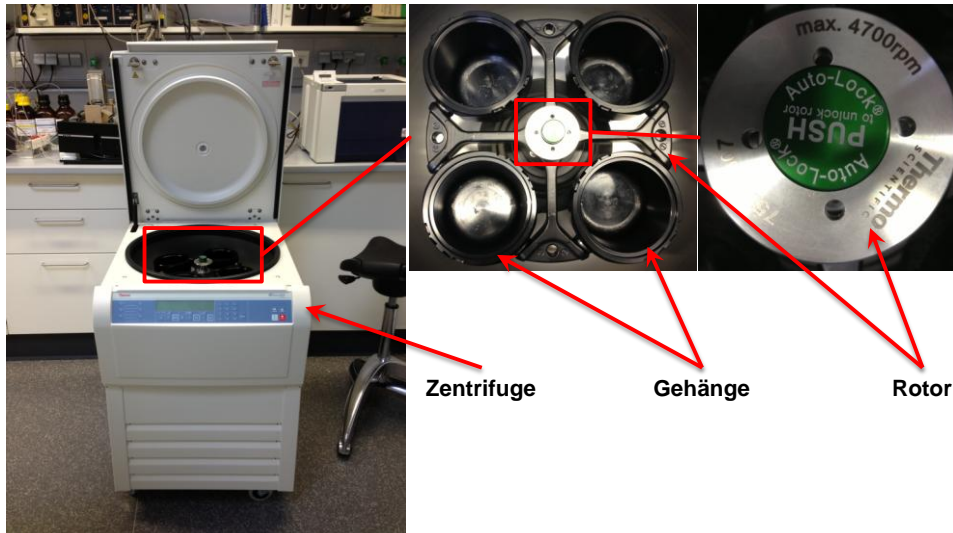


Abbildung 12: Heraeus Multifuge X3 F

Nach jedem Lauf musste der Überstand bzw. das Zentrat direkt von dem zentrifugierten Schlamm getrennt werden. Dazu wurde das Zentrat in einen Messzylinder überführt. Während der gesamten Bearbeitungsdauer dieses Arbeitspaketes wurde die Durchführung der Versuche optimiert, so dass es hin und wieder zu Änderungen einiger Randbedingungen kam. So wurde zum Beispiel das Probevolumen von 80 mL (Kopp, 2009) auf 500 mL erhöht, um den Einfluss von Messungenauigkeiten zu reduzieren. Die vollständige Liste der Versuche mit den durchgeführten Randbedingungen ist in Tabelle 12 zu finden.

Tabelle 12: Zusammenfassung der Randbedingungen zu den jeweiligen Entwässerungsversuchen

Versuch	PAK-Dosierung [mg _{PAK} /L]	Ausgangsfeststoffgehalte TS [g/L]		Temperatur [°C]	Probevolumen [ml]	Drehzahlen [U/min]	Dauer [min]
		oPAK	mPAK				
A	10	2,6	3,1	20	80	1.000, 1.500, 2.000, 3.000, 4.000, 4.700	3
						4.700	
B	20	2,1	2,1	20	500	2.700, 3.700, 4.700	3
						4.700	
C	20	2,0	2,0	20	500	2.700, 3.700, 4.700	3
						4.700	
D	20	3,0	3,0	20	500	4.700	2,5, 5, 10, 20, 30
E	20	2,1	2,1	20	500	2.700, 3.700, 4.700	2,5, 5, 10, 20,
F	20	2,0	2,1	20	500	2.700, 3.700, 4.700	2,5, 5, 10, 20,
G	20	1,7	2,0	20	500	2.700, 3.700, 4.700	2,5, 5, 10, 20,
H	20	3,0		20	500	4.700	5
	50	3,1		20	500		
	100	3,0		20	500		
I	20	2,8		20	500	4.700	5
	50	2,9		20	500		
	100	2,9		20	500		
	200	2,8		20	500		

In einer letzten Versuchsreihe wurde im Labor Pulveraktivkohle in den Belebtschlamm aus der Referenzstraße dosiert. Es wurden Konzentrationen von 20 – 200 mg_{PAK}/L dotiert. Der erweiterte Versuchsaufbau entsprach in diesem Fall dem aus 3.4.2, wobei im Anschluss an die Belüftung die Schlämme bei 4.700 U/min und einer Dauer von 5 Minuten zentrifugiert wurden. Diese Einstellungen hatten sich in den vorangegangenen Versuchen als günstig erwiesen.

Zusätzlich zu den Versuchen mit der Laborzentrifuge wurde in Einzelfällen die kapillare Fließzeit der beiden Schlämme nach DIN 14701-1 (2010) im Labor des Lehrstuhls für Siedlungswasserwirtschaft und Umwelttechnik ermittelt. Dazu wird ein standardisierter Hohlzylinder auf ein genormtes Filterpapier aufgesetzt. Hierbei ist darauf zu achten, dass immer dieselbe Filterseite benutzt wird. Der zu messende Schlamm wird durch Umschütten gemischt und anschließend auf einer Rührplatte ‚in Schwebelage‘ gehalten. Der Hohlzylinder wird bis zum Rand aufgefüllt (Arbeitsvolumen 6,7 mL). Durch die Saugkraft des Filters breitet sich eine ‚Flüssigkeitsschicht‘ kreisförmig um den Hohlzylinder aus. Über eine definierte Strecke von 1,3 cm, an deren Anfang und Ende sich jeweils eine Elektrode befindet, wird die Zeit bestimmt, die die Flüssigkeit benötigt, um selbige zu überwinden. Die gemessene Zeit wird aufgezeichnet. Für jede Probe werden mindestens drei Ansätze gemessen, deren Ergebnisse nicht mehr als 20 % von dem durch sie errechneten Mittelwert abweichen dürfen. Die Temperatur ist zu berücksichtigen (Arbeitstemperatur konstant 22 °C). Der Mittelwert der gemessenen Zeiten dient als absolutes Ergebnis.

3.5 Anaerobe Batchversuche zum Desorptionsverhalten

3.5.1 Erste Desorptionsuntersuchungen im anaeroben Milieu

Zur Ermittlung des Desorptionsverhaltens ausgewählter Mikroverunreinigungen im anaeroben Milieu wurde der mit Aktivkohle angereicherte Belebtschlamm aus der Teststraße der halbtechnischen Versuchsanlage in Düsseldorf in einen Kanister gefüllt und nach Bochum zur Versuchsanlage Ölbachtal transportiert. Da der Belebtschlamm-TS-Gehalt mit 2,5 g/L sehr gering war, wurde der Schlamm über Nacht im Kühlschrank gelagert, so dass durch den Absetzprozess eine Eindickung und somit Erhöhung des TS-Gehaltes erzielt werden konnte. Am darauffolgenden Morgen wurden die einzelnen Versuchsreihen vorbereitet. Dazu wurden 10 Liter des Belebtschlammes in ein Becherglas überführt und unter kontinuierlichem Rühren eine Probe für die Bestimmung der Ausgangswerte der Spurenstoffkonzentrationen entnommen. Da die Versuche immer als Dreifachansatz durchgeführt wurden, wurden unter kontinuierlichem Rühren wiederum drei mal drei Liter entnommen und in kleinere Bechergläser überführt, in denen der Belebtschlamm weiterhin durchgemischt wurde. In die Batchflaschen 1 bis 3 wurden jeweils 800 mL des unveränderten Belebtschlammes gefüllt. Diese dienten als Referenzversuche. Der Inhalt der Flaschen 4 bis 6 bestand aus 800 mL Belebtschlamm, dem das Fällmittel Ferrifloc zugegeben wurde. Hierzu wurden 0,09 mL Ferrifloc pro Liter Schlamm für 30 Minuten in den Belebtschlamm eingerührt. Für die Flaschen 7 bis 9 wurde der Belebtschlamm mit 500 mg Glucose pro Liter Schlamm angereichert. Nach Zugabe der Glucose wurde der Belebtschlamm noch einmal 10 Minuten durch-

mischt bevor wieder 800 mL in die Batchflaschen überführt wurden. Aus allen Versuchsreihen (Referenz, Ferrifloc, Glucose) wurden Proben für die genaue Bestimmung des Ausgangsfeststoffgehaltes genommen sowie der pH-Wert gemessen. Die Batchflaschen wurden vor Versuchsbeginn ausgiebig mit Stickstoff gespült, um Sauerstoff zu entfernen und somit direkt anaerobe Bedingungen zu erhalten. Anschließend wurden sie in einem temperierten Wasserbad platziert. Von diesen Versuchen wurden drei Durchgänge durchgeführt: Der Erste unter mesophilen Randbedingungen (36 °C) über eine Versuchsdauer von 25 Tagen (entspricht der mittleren Aufenthaltszeit in den Faultürmen auf dem Klärwerk Düsseldorf-Süd), der Zweite im thermophilen Temperaturbereich (55 – 56 °C) ebenfalls über eine Versuchsdauer von 25 Tagen und der Dritte abschließend erneut bei 36 °C. Die Versuche liefen im dritten Ansatz 39 Tage, um den Einfluss einer längeren Aufenthaltszeit zu untersuchen. Neun Tage wurden als Vorinkubationszeit deklariert und anschließend 30 Tage Aufenthaltszeit im Faulturm simuliert. Die genauen Randbedingungen der einzelnen Durchgänge sind in Tabelle 13 dargestellt.

Tabelle 13: Zusammenfassung Randbedingungen der am LSU durchgeführten anaeroben Batchversuche zur Desorption

	Durchgang 1	Durchgang 2	Durchgang 3
Flasche 1-3	Blindproben: Überschussschlamm Teststraße		
Flasche 4-6	Überschussschlamm Teststraße + 0,09 mL/L Ferrifloc		
Flasche 7-9	Überschussschlamm Teststraße + 500 mg/L Glucose (200 mg _{DOC} /L)		
Volumen	800 mL	800 mL	800 mL
Dauer	25 Tage	25 Tage	39 Tage
Temperatur	mesophil: 36 °C	thermophil: 55 – 56 °C	mesophil: 36 °C
Analytik Startproben	pH-Wert, DOC, TS-Gehalt, z. T. Glühverlust Spurenstoffkonzentration in der Wasserphase und auf den Feststoffen		
Analytik Endproben	pH-Wert, DOC, TS-Gehalt, z. T. Glühverlust Spurenstoffkonzentration in der Wasserphase		

Während der gesamten Versuchsdauer wurde die Gasproduktion der Batchflaschen über Drucksonden kontrolliert und in regelmäßigen Abständen Gas entlassen. Nach Beendigung der Versuche wurden 100 mL des Inhalts jeder Flasche an das Labor für Siedlungswasserwirtschaft der Ruhr-Universität Bochum zur Bestimmung des TS-Gehaltes, des DOC und später auch des Glühverlustes übergeben. Der pH-Wert wurde direkt im Anschluss auf der Versuchsanlage mithilfe eines Handmessgerätes bestimmt. Der restliche Flascheninhalt wurde in eine Vierkantglasflasche überführt und noch am selben Tag dem IUTA zur Spurenstoffanalytik überbracht.

3.5.2 Desorptionsversuche unter realen Trockenmassekonzentrationen

Die zu untersuchenden Belebtschlämme der Kontroll- und Testanlage wurden im Mittel von etwa 3,0 g/L TS auf 2,4 bis 2,7 % TR mittels Zentrifugation über drei Minuten bei 3.000 U/min aufkonzentriert, so dass aus jeweils 30 Liter Belebtschlamm drei Liter Rohschlamm (Sekundärschlamm) gewonnen wurden, die jeweils in drei parallel laufende Desorptionsansätze pro Ansatz, getrennt nach Test- und Kontrollanlage und in eine Probe für die Spurenstoffanalytik aufgeteilt wurden. Ein Teil des Zentrifugatwassers wurde zur Spurenstoffanalytik an das IUTA gesendet. Damit wurde die Voreindickung, wie sie auf Kläranlagen vor der Aufgabe in den Faulturm stattfindet, abgebildet.

Die Desorptionsansätze wurden mit 10 mL ausgefaultem Schlamm pro 500 mL Rohschlamm beimpft, um eine adäquate Methanbakterienpopulation zu gewährleisten. Nach einer etwa 8- bis 9-tägigen Vorinkubation haben sich die Methan produzierenden Bakterien soweit vermehrt, dass sich hiernach die eigentliche Faulzeit von etwa 27 Tagen anschloss. Der Beginn der regulären Faulzeit wurde durch eine schnell ansteigende Gasproduktion markiert, die im Laufe der weiteren Inkubations stetig abnahm.

Innerhalb der Inkubationszeit wurden täglich die gebildeten Faulgasmengen aufgefangen, gemessen und dokumentiert, so dass die Faulgasentwicklungskurven aufgenommen werden konnten.

Nach einer 36- bis 43- tägigen Faulzeit bei 35 bis 37 °C wurden die Versuche beendet.

Die ausgefaulten Schlämme wurden abermals über drei Minuten bei 3.000 U/min zentrifugiert. Der erhaltene Dickschlamm mit etwa 10 % TR und das separierte Faulwasser wurden getrennt zur Spurenstoffanalytik verschickt. Mit diesem Schritt wurde die Entwässerung des ausgefaulten Schlammes, zum Beispiel über Kammerfilterpressen, simuliert.

Zu Beginn und am Ende der anaeroben Batchversuche wurden der Trockenrückstand nach DIN EN 12880-2a (2001) und der Glühverlust nach DIN EN 12879-3a (2001) bestimmt.

Ansätze zu den Desorptionsversuchen im anaeroben Milieu:

Die Ansätze der in den Chemisch-Biologischen Laboratorien durchgeführten Remobilisierungsversuche erfolgten nach der Arbeitsvorschrift „Bestimmung des Faulverhaltens“ nach DIN 38 414-8 (1985). Der Versuchsaufbau ist in Abbildung 13 zu sehen.



Abbildung 13: Versuchsanlage zum anaeroben Batchversuch zur Prüfung des Desorptionsverhaltens von Spurenstoffen im anaeroben Milieu

3.6 Mathematische Simulation

Die mathematische Simulation diente der Ermittlung einer geeigneten Probenahmestrategie für Mikroverunreinigungen in kommunalen Kläranlagen.

3.6.1 Tracerversuche

Wahl der Tracerchemikalien

Die Wahl der geeigneten Materialien für die Tracerversuche fiel auf Natriumchlorid (NaCl) und Uranin (Dragocolor®), da diese Stoffe kostengünstig zu beschaffen und die Versuche gut durchführbar sind (Böckmann, 2014).

NaCl

Es wurde technisches Natriumchlorid (NaCl) aus dem Chemikalienlager der Ruhr-Universität Bochum verwendet. Die Detektion im Rahmen der Tracerversuche mit NaCl erfolgte durch die Messung der elektrischen Leitfähigkeit. Zu diesem Zweck ist im Labor für Siedlungswasserwirtschaft und Umwelttechnik zunächst eine Kalibriergerade erstellt worden, anhand derer ein Zusammenhang zwischen Leitfähigkeit und Salzkonzentration hergestellt werden kann (siehe Abbildung 14, links). Aus diesem Zusammenhang ließ sich abschätzen, dass mit einer Zugabemenge von 50 kg NaCl eine ausreichende Erhöhung der Leitfähigkeit in der mit Brauchwasser gefüllten halbertechnischen Versuchsanlage erreicht werden kann. Die Hintergrundleitfähigkeit des für die Tracerversuche verwendeten Brauchwassers lag im Durchführungszeitraum im Mittel bei etwa 800 $\mu\text{S}/\text{cm}$. Die Messungen wurden mit Standard-Leitfähigkeitsmesszellen von WTW (TetraCon® 925) durchgeführt.

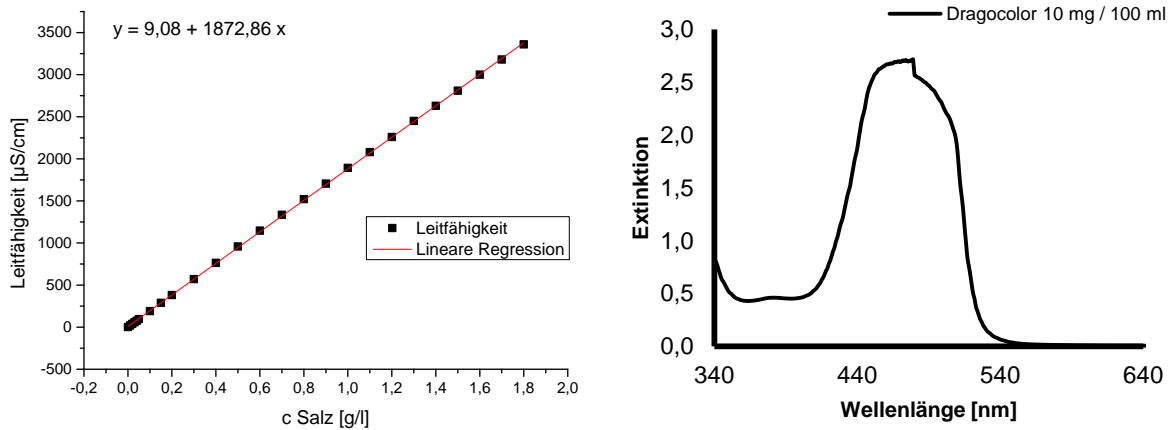


Abbildung 14: Kalibriergerade zur Bestimmung der Salzkonzentration aus Leitfähigkeitsmessungen (links) (Böckmann, 2014) und Ermittlung einer geeigneten Wellenlänge zur Bestimmung der Extinktion im Photometer für Dragocolor (Uranin) (rechts)

Uranin

Uranin als Farbstoff im Produkt Dragocolor Diamantgelb Extra, C.I. 45350, wurde als Fluoreszenztracer verwendet. Die Messung des Uranins im Ablauf der halbtechnischen Versuchsanlage erfolgte photometrisch. Dazu wurden die Ablaufproben in den Chemisch-Biologischen Laboratorien mit einem Photometer (Dr. Lange, XION 500) analysiert. Die Auswahl der geeigneten Wellenlängen für die Messung der Extinktion fand mithilfe von Abbildung 14 (rechts) statt. Für die ersten beiden Versuche mit Uranin wurde die Extinktion bei einer Wellenlänge von 485 nm gemessen. Im letzten Versuch wurde die Extinktion zusätzlich bei einer Wellenlänge von 479 nm bestimmt, da die Absorption dort ihren maximalen Wert erreicht. Die Uranin-Konzentration der Ablaufproben wurde letztendlich mithilfe der Kalibriergeraden für Uranin im Brauchwasser und im Abwasser aus den Extinktionen bestimmt. Zur Erstellung der Kalibriergeraden für Uranin in Abwasser wurde Ablauf Nachklärung der Versuchsanlage verwendet. Die Zugabemenge von Uranin betrug im ersten Versuch 200 g und wurde in weiteren Versuchen auf 100 bzw. 50 g reduziert, da diese Mengen immer noch sehr gut nachgewiesen werden können.

Durchführung der Tracerversuche

Tracermethode

Die Einbringung der Tracer erfolgte über die sogenannte „Pulse Input“ Methode. Das heißt, sowohl NaCl als auch Uranin wurden vollständig in Wasser gelöst und über die Zulaufpumpe in sieben bis 19 Minuten in die Anlage geführt (siehe Abbildung 15).



Abbildung 15: Lösen des Tracers in Wasser und Einspeisung in die Versuchsanlage

Szenarien

Mithilfe verschiedener Zulaufvolumenströme und der Variation von interner Rezirkulation und Schlammrückführung wurden verschiedene Betriebszenarien erzeugt. Die Tracerversuche wurden jeweils bei konstanten Volumenströmen durchgeführt. Die Versuchseinstellungen sind in Tabelle 14 zusammengefasst.

Tabelle 14: Übersicht der Versuchseinstellungen der Tracerversuche in Düsseldorf

Versuch Nr.	Volumenstrom	Interne Rezirkulation	Schlammrückführung	Tracer	Bemerkung
1	1,6 m ³ /h	-	-	NaCl	Mittlerer TW-Zulauf Klärwerk
2	2,5 m ³ /h	-	-	NaCl	Max. realisierbar Versuchsanlage
3	0,7 m ³ /h	-	-	NaCl	Mindestzulauf Klärwerk
4	1,6 m ³ /h	4,8 m ³ /h	0,8 m ³ /h	NaCl und Uranin	Mittlerer TW-Zulauf + RZ u. RS
5	1,6 m ³ /h	4,8 m ³ /h	0,8 m ³ /h	NaCl und Uranin	Mittlerer TW-Zulauf + RZ u. RS
6	1,3 m ³ /h	5,2 m ³ /h	1,3 m ³ /h	Uranin	Betriebszustand Versuchsanlage

Die Versuche 1 bis 5 wurden mit Brauchwasser durchgeführt, während Versuch 6 im realen Anlagenbetrieb stattfand. Dabei fand im Gegensatz zu den vorherigen Versuchen ein Überschussschlammabzug von ca. 2 % des Zulaufvolumenstroms statt.

Probenahme und Messung

Leitfähigkeitssonden zeichneten sowohl am Ablauf des Belebungsbeckens als auch der Nachklärbecken jeweils im 5-Minuten-Intervall Messwerte auf. Zur Bestimmung der Uraninkonzentration wurden mithilfe automatischer Probenehmer während der ersten 24 Stunden 2-h-Mischproben mit einem Probenahmeintervall von 10 Minuten und anschließend

für 48 Stunden 4-h-Mischproben erstellt. Im letzten Versuch (Versuch 6) wurden über 16 Stunden 2h-Mischproben gezogen, einmalig eine 1-h-Mischprobe und in den restlichen 72 Stunden 6-h-Mischproben. Der Verlauf der Uraninkonzentration im Ablauf war mit bloßem Auge zu erkennen (siehe Abbildung 16).

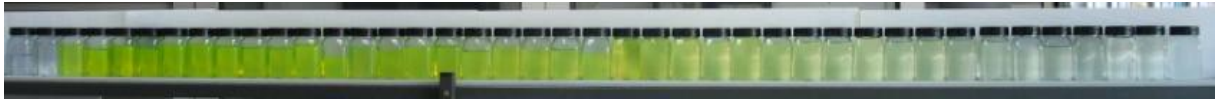


Abbildung 16: Proben aus dem Ablauf der Nachklärung zur Bestimmung der Uraninkonzentration

Die Auswertung der NaCl-Versuche erfolgte über einen angepassten Wert der Leitfähigkeit, der durch Reduzierung der gemessenen Leitfähigkeit um die Hintergrundleitfähigkeit ermittelt wurde. Die Hintergrundkonzentration wurde für jeden Versuch erneut als Ablaufkonzentration der Anlage vor der Tracerzugabe bestimmt.

Für die Auswertung der Versuche mit Uranin wurde die photometrisch gemessene Extinktionen E in eine Tabelle eingetragen und mithilfe der jeweiligen Kalibriergeraden in die Uraninkonzentration umgerechnet.

3.6.2 Simulation

Software

Die modelltechnische Abbildung der Versuchskläranlage Düsseldorf erfolgte mithilfe des Softwarepakets Simba 6.5 (IFAK, 2012), welches auf Grundlage der Software Matlab®/Simulink™ (MathWorks Inc., 2012) arbeitet.

Simulationmethoden

Für die Simulation der Aufenthaltszeitverteilung der Spurenstoffe wurde ein eigenständig definiertes Modell, das „tracer-model“, erarbeitet, das ausschließlich Transport und Durchmischungsprozesse abbildet.

Der Zufluss zur Modellanlage wurde aus den Komponenten Zulaufvolumenstrom und Spurenstoffkonzentration zusammengesetzt. Diese wurden einmal als konstanter Zulaufvolumenstrom mit einer Spurenstoffkonzentration als Peak dargestellt und zusätzlich mithilfe des vordefinierten Blocks „Tagesgang“ als sich täglich wiederholende, variable Tagesgänge in das Modell eingegliedert.

Mathematische Abbildung von Tagesgängen

Da nicht ausreichend Messwerte für die Erstellung von Tagesgängen der Spurenstoffkonzentrationen vorliegen, sondern bisher ausschließlich Tendenzen festgestellt werden konnten, müssen die zur Simulation der Durchmischungsvorgänge erforderlichen Tagesgänge modelltechnisch erstellt werden. Dazu wird auf eine Methode von Langergraber et al. (2008) zurückgegriffen.

Für die Berechnung eines dynamischen Tagesganges für die halbtechnische Versuchsanlage Düsseldorf wurde ein konstanter Zulauf von 31,2 m³/d als mittlerer Trockenwetterzufluss

Q_m angenommen. Die mittlere Stickstoffkonzentration wurde zu 50 mg/L angenommen und später an die Größenordnung von Spurenstoffkonzentrationen angepasst. Die für die Berechnung weiterer Größen benötigten Formparameter sind für die halbtechnische Versuchskläranlage in Tabelle 15 dargestellt.

Tabelle 15: Parameter zur Berechnung der Tagesgänge für die Versuchskläranlage Düsseldorf

Parameter		Wert
fQ,min	[-]	0,42
tmin	[d]	0,08
fQ,max	[-]	1,50
tmax	[d]	0,42
fN,max	[-]	1,60
fmin,U	[-]	0,10
ΔtN	[d]	0,03

Der simulierte Tagesgang des Zuflussvolumenstromes der halbtechnischen Versuchsanlage Düsseldorf ist in Abbildung 17 dargestellt. Die Spurenstoffkonzentration ergab sich aus der Parallelverschiebung der simulierten Stickstoffkonzentration in einen für Spurenstoffkonzentrationen realistischen Bereich (siehe Abbildung 17).

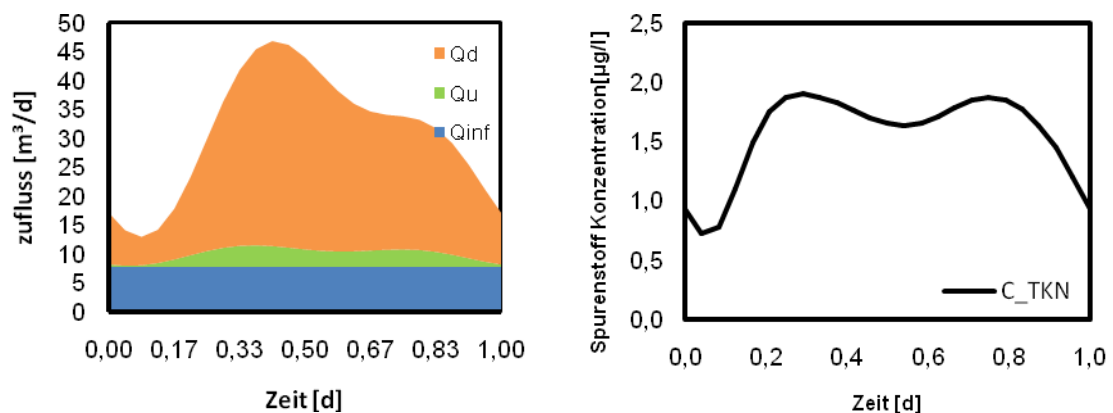


Abbildung 17: links: Tagesgang des Zuflussvolumenstromes der Versuchskläranlage Düsseldorf, rechts: Simulierter Tagesgang eines Spurenstoffs im Zulauf der Versuchskläranlage, Düsseldorf (nach Langergraber et al., 2008)

4 Ergebnisse und Dokumentation

4.1 Arbeitspaket 1: Eliminationsleistung

4.1.1 Begleitparameter

Belebtschlammmikroskopie

Die Belebtschlammmikroskopie wurde von der Einfahrphase bis zum Ende der Versuche einmal pro Woche aus beiden biologischen Reinigungsstufen durchgeführt. Ziel war es die Belebtschlammbiozönose stabil zu halten und Bläh- bzw. Schwimmschlammbildung frühzeitig zu erkennen und zu vermeiden. Darüber hinaus wurden die Beobachtungen auf schlammfressende Organismen, „aerobe Schlammstabilisierung“, fokussiert.

Insgesamt bestand die zu mikroskopierende Belebtschlammbiozönose aus 43 regelmäßig vorkommenden Arten aus den Klassen bzw. Ordnungen der Rotatoria, Gastrotricha, Nematoda, Oligochaeta, Zooflagellaten, Rhizopoda, Actinopoda, Ciliata und Fadenbakterien. Aus diesen Gruppen sind einige Arten dafür bekannt, Störungen auf Klärwerken zu provozieren. Hierzu gehören in erster Linie die Bläh- und Schwimmschlammbildner, von denen in unserem Versuch das Fadenbakterium Typ 021N für die zeitweise Erhöhung des Schlammvolumenindex verantwortlich zu machen war. Trotz der niedrigen BSB-Schlammbelastung konnte sich dieser Fadenbakterientyp wahrscheinlich aus Totzonen der Nachklärung im Belebtschlamm etablieren. Zusätzlich trat in mäßigen Häufigkeiten der Schwimmschlammbildner *Microthrix parvicella* durchgehend in beiden biologischen Reinigungsstufen auf, ohne Probleme zu verursachen. Dagegen mussten schlammfressende Organismen wie *Aeolosoma*- und *Nais*-Arten (siehe Abbildung 18) aus der Ordnung der Oligochaeten (Wenigborster) zweimal aktiv bekämpft werden, in dem der Trockensubstanzgehalt am 21.06.2013 von 3,5 g/L auf 3,0 g/L in beiden Anlagen abgesenkt werden musste und ein zweites Mal, am 25.10.2013 auf 2,5 g/L. Mit diesen Eingriffen sollte die BSB₅-Schlammbelastung erhöht und damit das Schlammalter moderat gesenkt werden, um eine weitere Vermehrung durch langfristiges Ausschwemmen zu vermeiden. Die frühzeitige Erkennung und die anschließende moderate Bekämpfung erlaubten eine störungsfreie Versuchsfortsetzung.

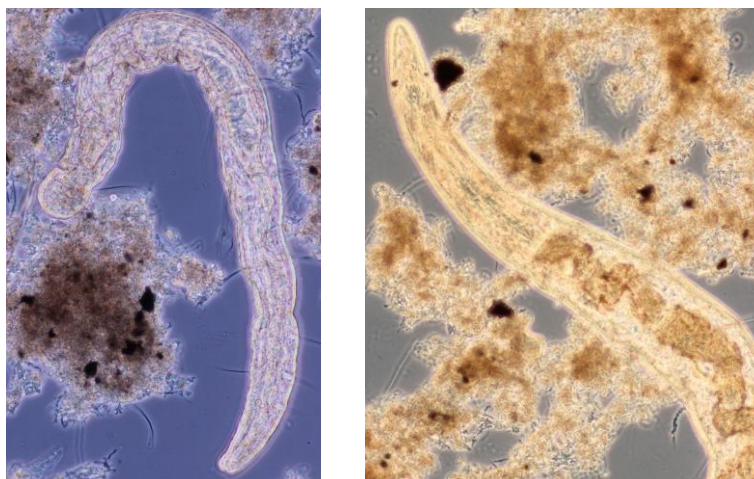


Abbildung 18: Links: *Aeolosoma* sp.; Rechts: *Nais* sp.

Zusätzlich wurden beide Belebtschlammbiozönosen über den gesamten Versuchszeitraum wöchentlich mikroskopiert und über den Sørensen-Index verglichen. Beim Vergleich zweier betrachteter Biozönosen können die Ergebnisse dieser Untersuchung zwischen 0 und 1 liegen. Ergebnisse zwischen 1 und 0,8 lassen bei zwei zu vergleichenden Lebensgemeinschaften keine signifikanten Unterschiede der Zusammensetzung erkennen, d. h. die ökologischen Bedingungen sind in etwa identisch. Bei Ergebnissen $< 0,8$ bis $0,6$ sind erste Unterschiede erkennbar, die noch nicht relevant sein müssen. Ergebnisse $< 0,5$ lassen kaum noch Ähnlichkeiten der Lebensgemeinschaften erkennen.

In unseren Vergleichen lagen die Ergebnisse gleichbleibend zwischen $0,80$ und $0,69$, womit über die gesamte Versuchszeit in beiden Belebungsbecken gute vergleichbare ökologische Bedingungen vorlagen und gleichzeitig erkennbar wurde, dass der Einsatz von PAK in Konzentrationen von 10 g/m^3 bzw. 20 g/m^3 Zulauf keine Auswirkungen auf die Belebtschlammbiozönose hat (siehe Abbildung 19).

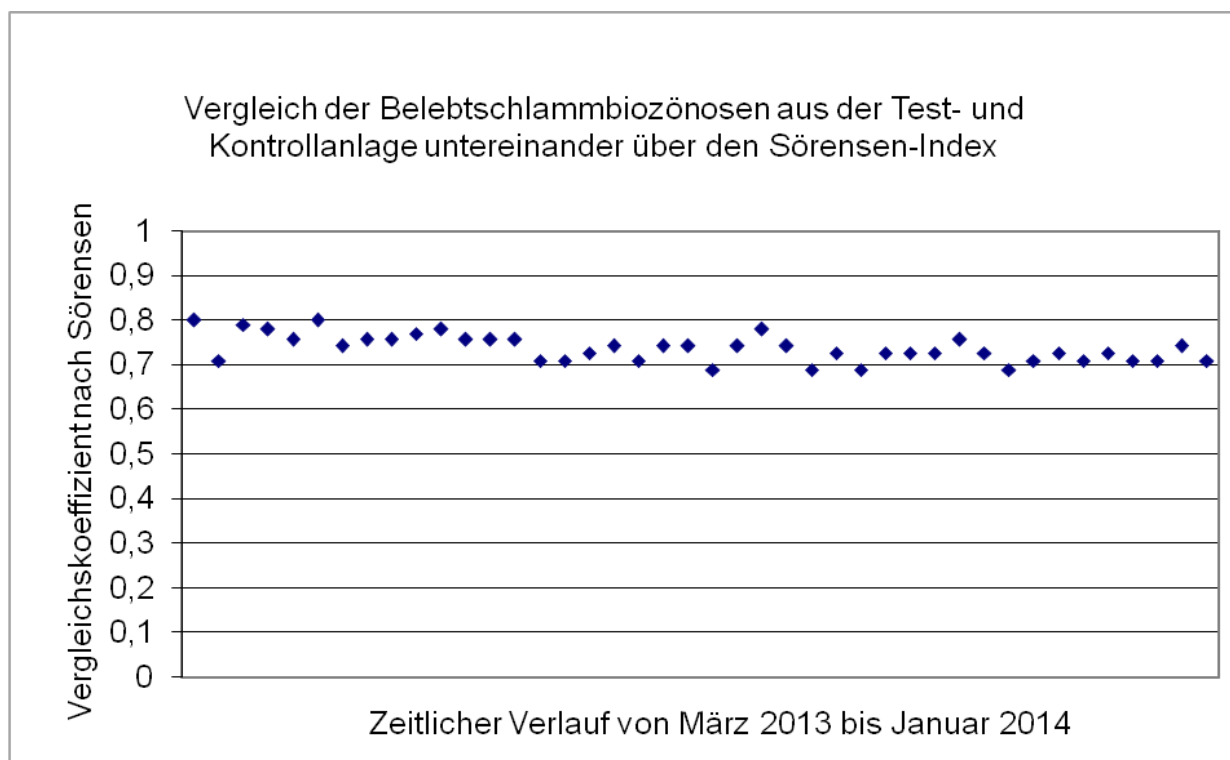


Abbildung 19: Vergleich der Belebtschlammbiozönosen mit dem Sørensen-Index

Trockensubstanzgehalt und Schlammvolumenindex

Neben den TS-Online-Messungen in den Belebungsbecken wurden zweimal wöchentlich die Trockensubstanz und wöchentlich der Glühverlust, das Schlammvolumen und der Schlammvolumenindex bestimmt.

Über die TS-Messsonde wurde der automatische Überschussschlammabzug geregelt, so dass die jeweiligen Zielwerte in beiden Anlagen gut eingehalten werden konnten (siehe Abbildung 20).

Die Reduzierung der Trockensubstanzgehalte wurde, wie bereits erläutert, aus Gründen der Wurmbekämpfungen durchgeführt.

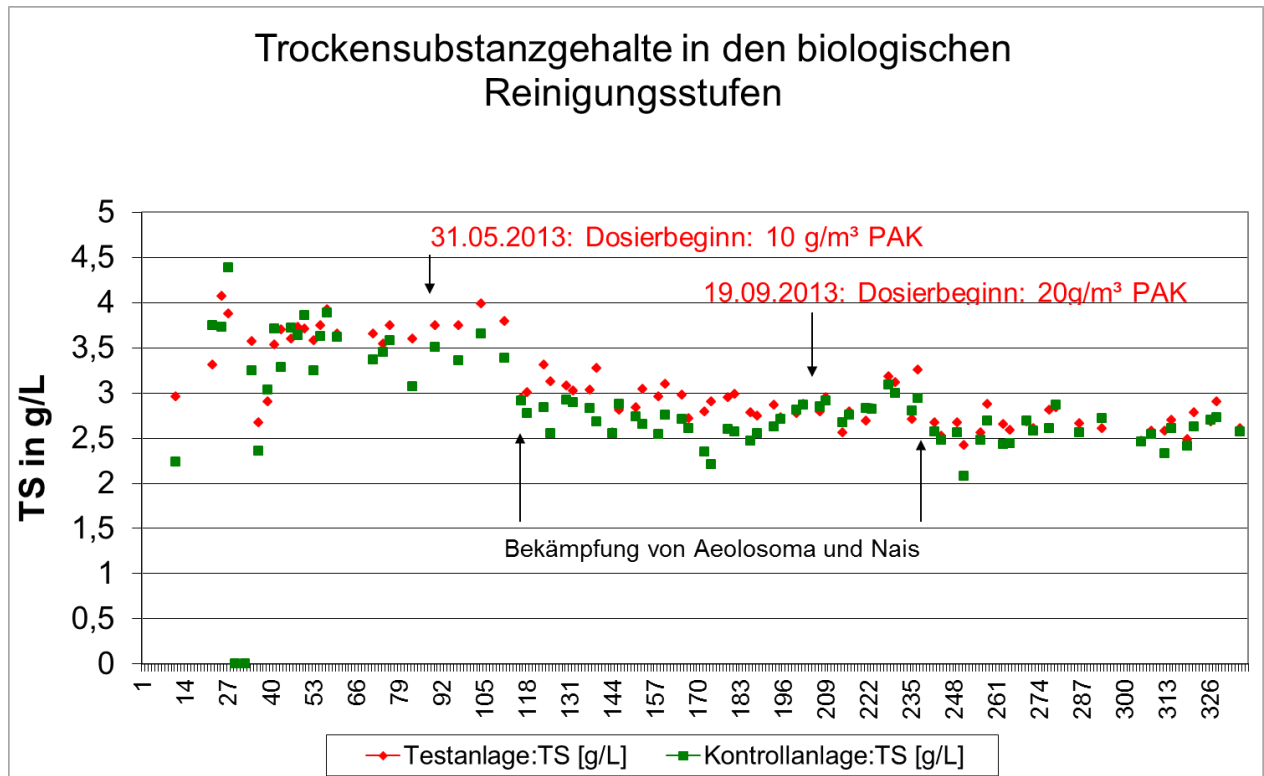


Abbildung 20: Ganglinien der Trockensubstanzgehalte während der gesamten Versuchszeit

Eine Ergebniszusammenfassung über die Trockensubstanzgehalte ist in Tabelle 16 enthalten.

Tabelle 16: Trockensubstanzgehalte der halbtechnischen Versuchsanlage

	Referenzanlage 1 TS in g/L	Testanlage 2 TS in g/L
Mittelwert:	2,89	3,05
Minimum:	2,08	2,42
Maximum:	4,39	4,07

Eine Ergebniszusammenfassung über die Glühverluste ist in Tabelle 17 enthalten.

Tabelle 17: Glühverluste der halbtechnischen Versuchsanlage

	Referenzanlage 1 GV in %	Testanlage 2 GV in %
Mittelwert:	82,94	52,50
Minimum:	78,28	79,50
Maximum:	86,76	92,72

Eine Ergebniszusammenfassung über die organischen Trockensubstanzgehalte ist in Tabelle 18 enthalten.

Tabelle 18: Trockensubstanzgehalte der halbertechnischen Versuchsanlage

	Referenzanlage 1 oTS in g/L	Testanlage 2 oTS in g/L
Mittelwert:	2,64	2,52
Minimum:	1,98	1,64
Maximum:	3,34	3,79

Der Schlammvolumenindex (siehe Abbildung 21) wurde in beiden Anlagen parallel maßgeblich durch das Fadenbakterium Typ 021N beeinflusst. Bekämpfungsstrategien, zum Beispiel durch die Dosierung von Eisensalzen, haben sich auf Grund der vereinbarten Versuchsstrategie, keine Phosphorfällung durchzuführen, erübrigt. Innerhalb der Versuchszeit wurde versucht mit Schlammgreifern Schlammablagerungen in der biologischen Reinigungsstufe aufzufinden. Es wurden jedoch keine nennenswerten Totzonen mit anaerobem Schlamm gefunden. Es wird daher davon ausgegangen, dass sich in den Nachklärbecken Schlammablagerungen gebildet haben, die zu einer Ausbreitung des Fadenbakteriums geführt haben könnten.

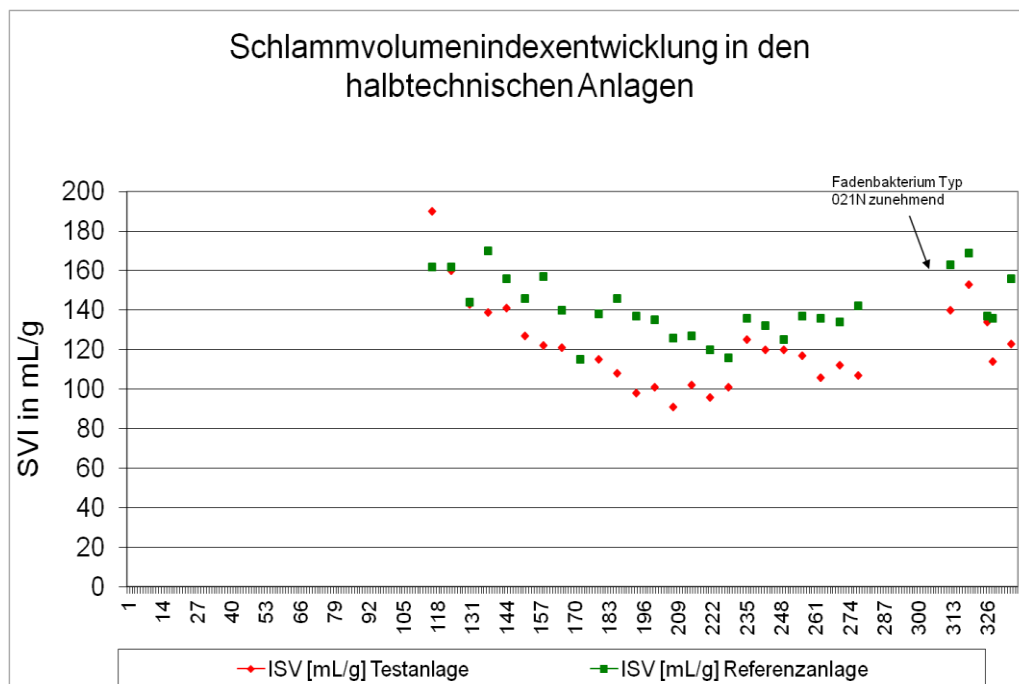


Abbildung 21: Schlammvolumenindexentwicklung in den beiden Belebungsstufen

Sonstige Vorkommnisse

In der Zeit ab Mitte August bis Ende November gab es immer wiederkehrende Invasionen von Blattfluschkrebse der Gattung *Daphnia* in beiden Nachklärbecken. Dies hatte zur Folge, dass diese Krebse auch in die Proben für die Spurenstoffe gelangen konnten. Es wurden deshalb alle Analysenproben der Nachklärungsabläufe über ein 100 µm-Metallsieb filtriert (siehe Abbildung 22). Ausgenommen davon waren Proben für die Bestimmung der abfiltrierbaren Stoffe. Tagsüber wurden die unter der Wasseroberfläche angesammelten Schwärme regelmäßig abgesehen.



Abbildung 22: Daphnia sp. in Originaldichte im Nachklärbecken der Testanlage 2 (Beispielaufnahme)

TOC und DOC im Zulauf und in den Abläufen

Der TOC wurde sowohl im Zulauf als auch in den Abläufen aus 24-Stunden-Mischproben bestimmt. Zusätzlich wurde in den Abläufen der DOC nach Filtration über gewaschene Glasfaserfilter (GF 6) bestimmt, um eventuell auftretende Einflüsse durch Zugabe der PAK zu erkennen.

Aus der Abbildung Abbildung 23 sind die Konzentrationsganglinien über die gesamte Versuchszeit zu entnehmen. Daraus wurden die Eliminationsleistungen berechnet, die in Abbildung Abbildung 24 dargestellt sind.

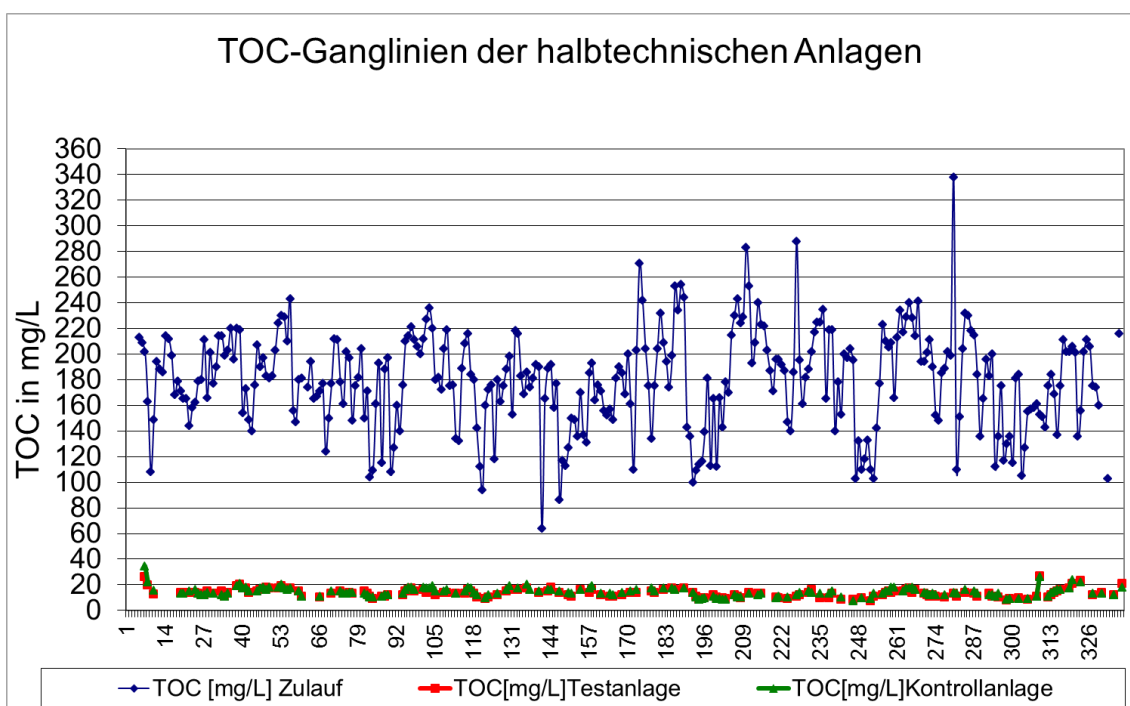


Abbildung 23: TOC-Ganglinien über den gesamten Versuchszeitraum im Vergleich beider Anlagen-abläufe

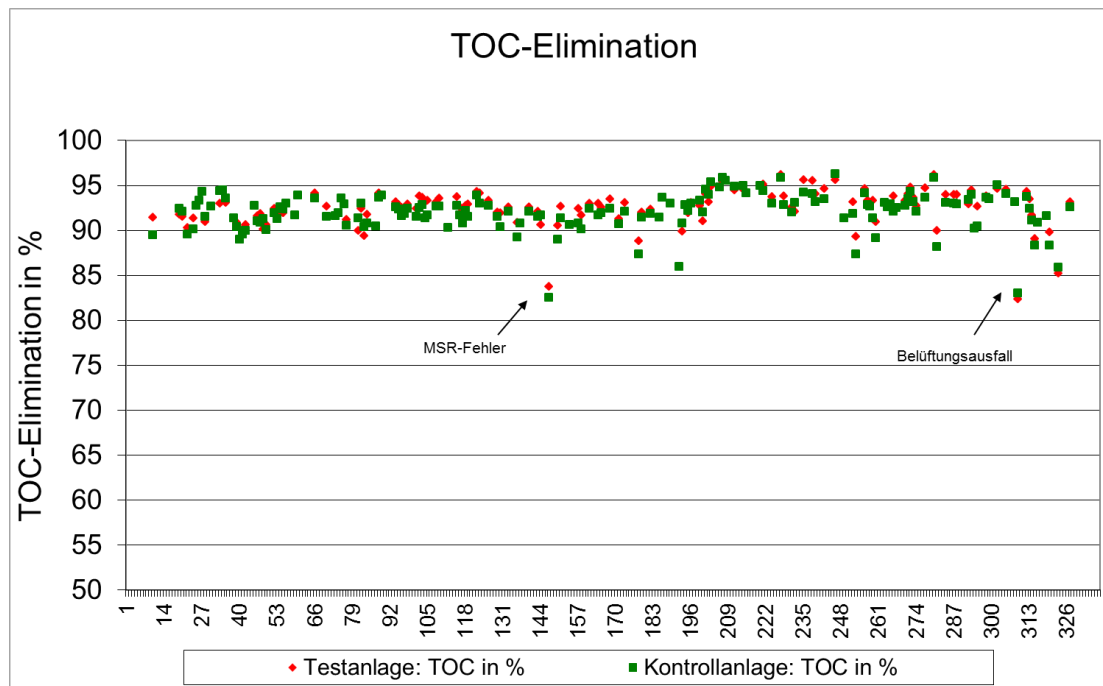


Abbildung 24: TOC-Eliminationsleistung über den gesamten Versuchszeitraum

Die Ergebniszusammenfassung über den TOC und DOC ist in Tabelle 19 dargestellt.

Tabelle 19: Ergebniszusammenfassung der TOC und DOC Ergebnisse

	Zulauf TOC in mg/L	Ablauf Kontrollanlage 1 TOC in mg/L	Ablauf Testanlage 2 TOC in mg/L
Mittelwert	179	14,3	13,6
Minimum	64	7,2	7,5
Maximum	288	34,6	27,0
		Kontrollanlage 1 Eliminationsleistung in %	Testanlage 2 Eliminationsleistung in %
Mittelwert		92,1	92,5
Minimum		82,6	82,4
Maximum		96,3	96,2
		Ablauf Kontrollanlage 1 DOC in mg/L	Ablauf Testanlage 2 DOC in mg/L
Mittelwert		13,4	12,6
Minimum		7,2	7,3
Maximum		30	20

Die unter 3.3.1 genannten Qualitätskriterien wurden wie folgt erfüllt:

Die TOC-Elimination von > 85 % wurde bis auf die genannten Störfälle, den MSR-Fehler und den Belüftungsausfall eingehalten.

Die TOC-Konzentrationen von < 20 mg/L wurden bis auf die genannten Störfälle eingehalten. Im Vergleich beider Anlagenabläufe waren die Abweichungen der TOC- Ablaufkonzentrationen immer < 15 %.

Stickstoff im Zu- und Ablauf der halbtechnischen Anlagen

Der Stickstoff wurde im Zulauf aus der 24-Stunden-Mischprobe als TN_b bestimmt. Aus den 24-Stunden-Mischproben der Abläufe wurde Nitrat- und Ammoniumstickstoff bestimmt. Aus wöchentlichen Stichproben wurde der Nitritstickstoff untersucht. Abbildung 25 sind die Konzentrationsganglinien über die gesamte Versuchszeit zu entnehmen. Daraus wurden die Eliminationsleistungen berechnet, die in Abbildung 26 dargestellt sind.

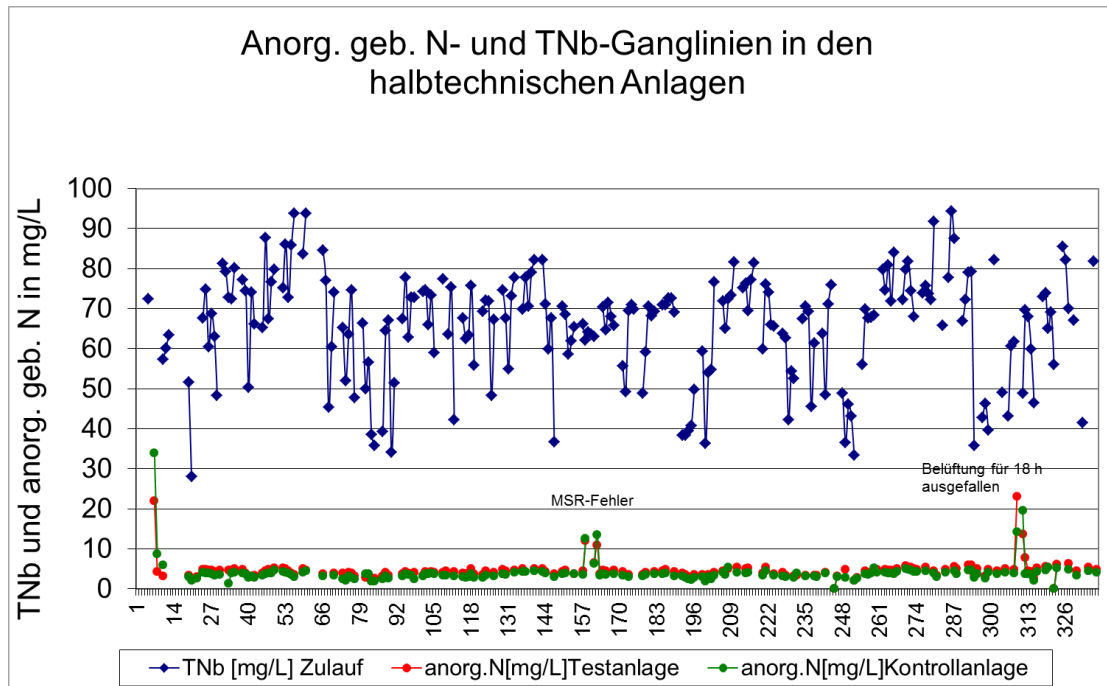


Abbildung 25: Stickstoff-Ganglinien über den gesamten Versuchszeitraum im Vergleich beider Anlagenabläufe

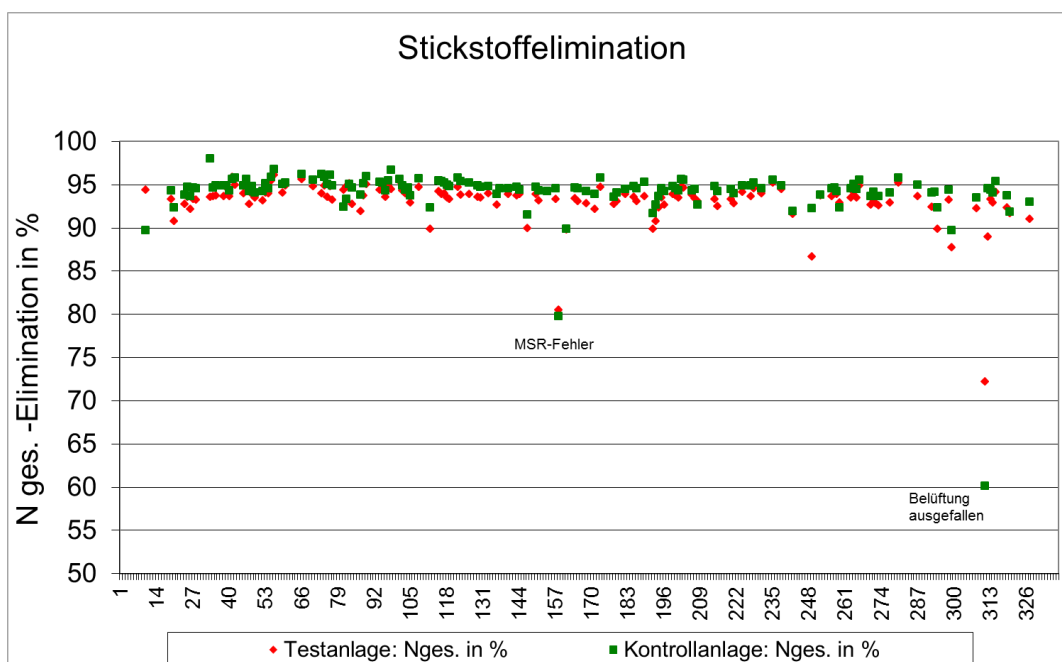


Abbildung 26: Stickstoff-Eliminationsleistung über den gesamten Versuchszeitraum

Die Ergebniszusammenfassung über die Stickstoffelimination ist in Tabelle 20 dargestellt.

Tabelle 20: Ergebniszusammenfassung der Stickstoffelimination

	Zulauf	Ablauf Kontrollanlage 1	Ablauf Testanlage 2
	TN_B in mg/L	Ammonium-N in mg/L	Ammonium-N in mg/L
Mittelwert	65,38	<0,60	<0,50
Minimum	28,00	<0,015	<0,015
Maximum	94,40	34	21
		Nitrat-N in mg/L	Nitrat-N in mg/L
Mittelwert		3,46	4,11
Minimum		0,13	0,13
Maximum		6,97	7,25
		Nitrit-N in mg/L	Nitrit-N in mg/L
Mittelwert		<0,06	<0,04
Minimum		<0,015	<0,015
Maximum		0,89	0,42
		anorg. geb. N in mg/L	anorg. geb. N in mg/L
Mittelwert		<4,11	<4,64
Minimum		<1,86	<1,43
Maximum		23	34
		Kontrollanlage 1	Testanlage 2
		Eliminationsleistung in %	Eliminationsleistung in %
Mittelwert		94	93
Minimum		60	72
Maximum		98	96

Die unter 3.3.1 genannten Qualitätskriterien wurden wie folgt erfüllt:

Die Stickstoff-Elimination von > 85 % wurde bis auf die genannten Störfälle, den MSR-Fehler und den Belüftungsausfall, eingehalten.

Die Stickstoff-Konzentrationen in den Abläufen von < 15 mg/L wurden bis auf die genannten Störfälle eingehalten.

Im Vergleich beider Anlagenabläufe waren die Abweichungen der anorganisch gebundenen Stickstoffkonzentrationen immer < 15 %. Bei den bereits genannten Störungen konnten die Abweichungen mehr als 15 % betragen.

Gesamtphosphor im Zu- und Ablauf der halbtechnischen Anlagen

Die Gesamtphosphorkonzentrationen wurden sowohl im Zulauf als auch in den Abläufen aus 24-Stunden Mischproben bestimmt.

Aus der Abbildung 27 sind die Konzentrationsganglinien über die gesamte Versuchszeit zu entnehmen. Daraus wurden die Eliminationsleistungen berechnet, die in Abbildung 28 dargestellt sind.

Für diese Versuche wurde sich darauf verständigt weder eine vermehrte biologische Phosphorelimination, noch eine Phosphorfällung zu betreiben. Daher ist die Phosphorelimination unter unregelmäßigen Bedingungen abgelaufen und damit kein Qualitätskriterium für die Gültigkeit der Versuche. In den folgenden Abbildung 27 ist erkennbar, dass bei längeren Trockenwetterperioden eine vermehrte biologische Phosphorelimination stattgefunden haben kann, die durch Regenereignisse regelmäßig wieder zum Erliegen kam.

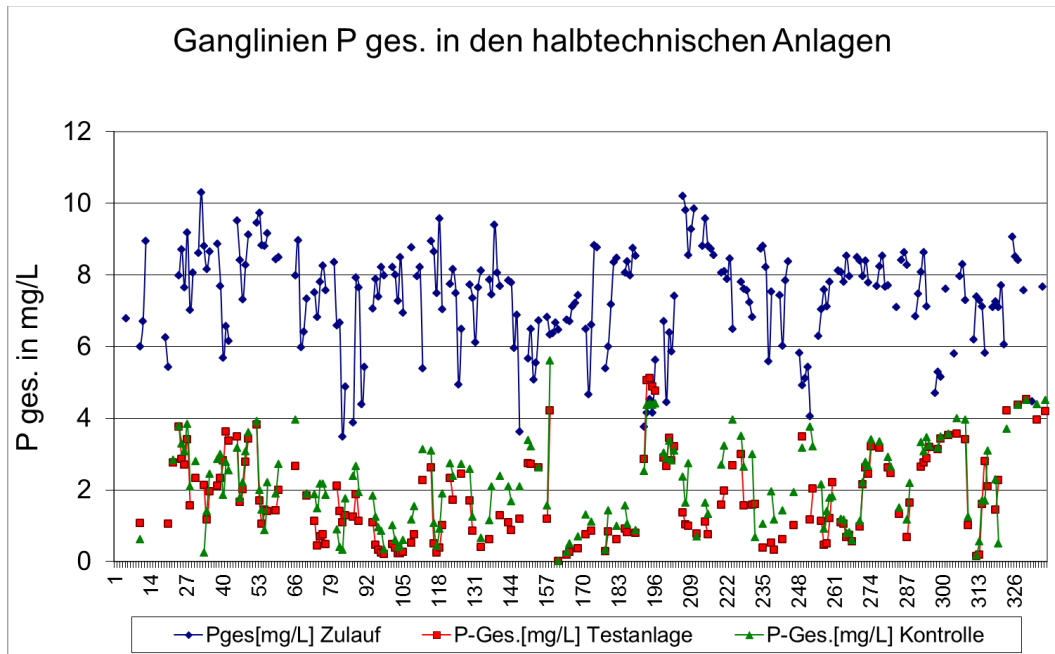


Abbildung 27: Gesamtphosphorganglinien des Zulaufes und der Abläufe im Vergleich

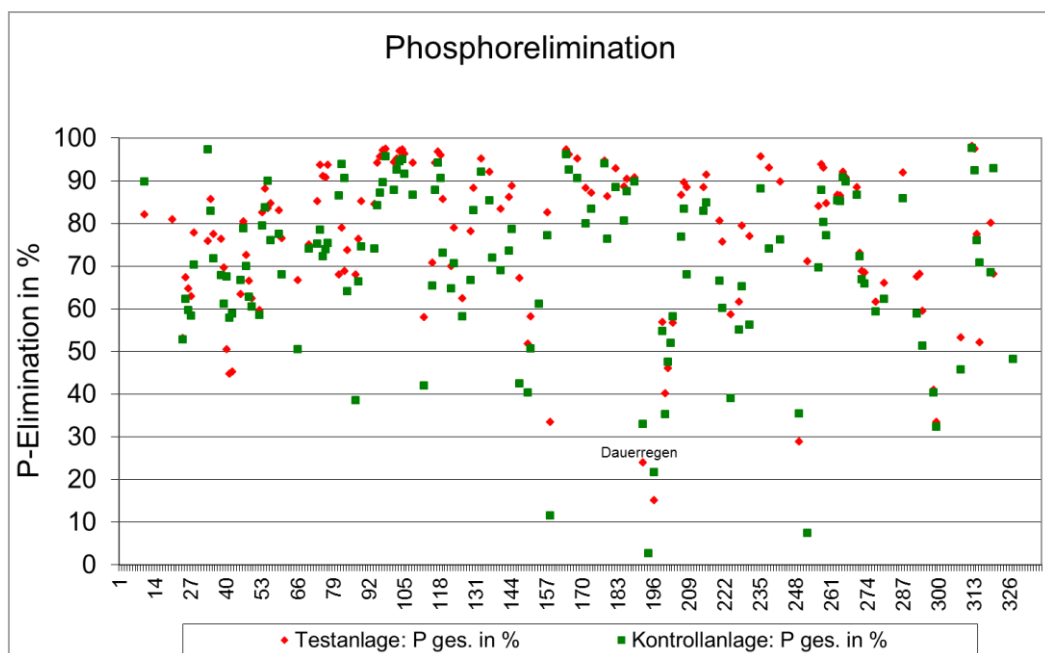


Abbildung 28: Darstellung der unregelmäßigen Gesamtposphatelimination

Abfiltrierbare Stoffe

Die abfiltrierbaren Stoffe wurden aus 24-h-Mischproben untersucht. Die Proben wurden hierfür vorher nicht über ein Metallfilter mit einer Maschenweite von 100 µm filtriert, sondern direkt nach dem Mischen der 12 Zwei-Stunden-Einzelproben bearbeitet. Auf den Glasfaserfiltern eventuell vorgefundene Daphnien wurden vor dem Trocknen mit einer Pinzette abgesammelt, um eine Erhöhung des Befundes für die abfiltrierbaren Stoffe durch aus den Nachklärungen ausgeschwemmte Daphnien zu vermeiden. Die Ergebnisse sind der Abbildung 29 zu entnehmen. Der Anstieg der abfiltrierbaren Stoffe in beiden Anlagen zum Versuchsende ist durch das vermehrte Vorkommen des Fadenbakteriums Typ 021N zu erklären.

Auch dieser Parameter zeigt die hohe Vergleichbarkeit der beiden parallel betriebenen Versuchsanlagen.

Qualitätskriterien zur Gültigkeit der Versuche wurden über den Parameter „Abfiltrierbare Stoffe“ nicht abgeleitet.

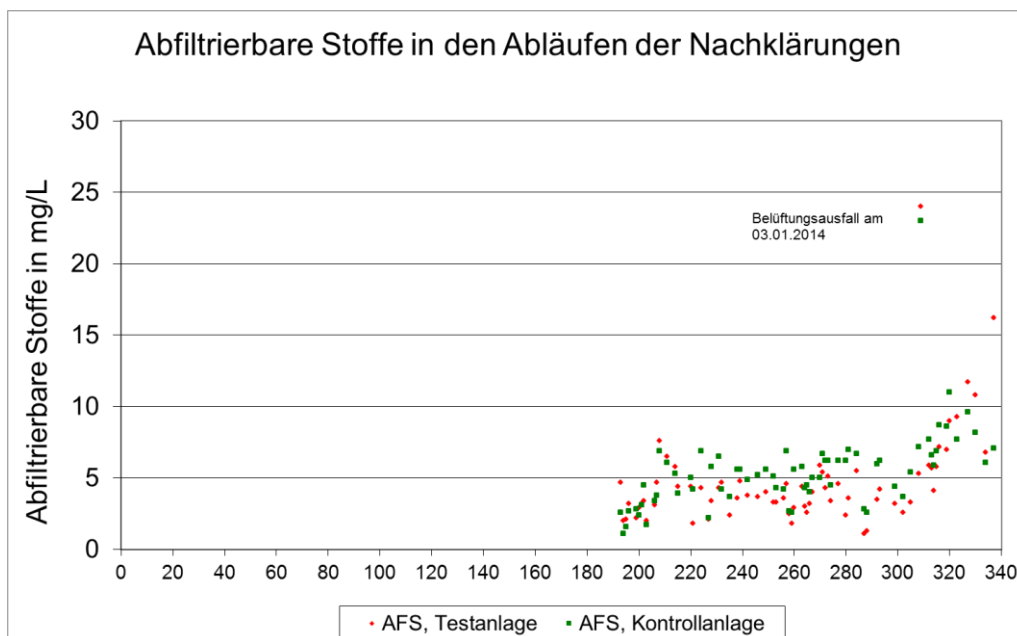


Abbildung 29: Abfiltrierbare Stoffe im Versuchsverlauf ab September 2013 bis zum 31.01.2014

Eine Ergebniszusammenfassung gibt Tabelle 21 wieder.

Tabelle 21: Ergebniszusammenfassung der AFS-Messungen der halbtechnischen Versuchsanlage

	Ablauf Kontrollanlage 1 AFS in mg/L	Ablauf Testanlage 2 AFS in mg/L
Mittelwert	5,4	4,8
Minimum	1,1	1,1
Maximum	23	24

In der Testanlage mit PAK-Dosierung fielen die abfiltrierbaren Stoffe im Mittel um 0,6 mg/L niedriger aus als im Ablauf der Kontrollanlage. Ein Vergleich über den Zeitraum, in der auch

die Testanlage ohne PAK-Dosierung lief, konnte nicht durchgeführt werden, da die abfiltrierbaren Stoffe erst nachträglich in das Untersuchungsprogramm aufgenommen wurden.

Ergebniszusammenfassung aus dem Versuchszeitraum vom 01.06.2013 bis 31.01.2014

Der Einfluss der PAK sollte an Hand der TOC- und DOC-Elimination geprüft werden. Darüber hinaus wurden ab September 2013 zusätzlich die abfiltrierbaren Stoffe zur weiteren Betrachtung aufgenommen. In der Tabelle 22 und in Tabelle 23 sind die Ergebnisse der Zeiträume für die TOC- und DOC-Entwicklung beider Versuchsanlagen mit und ohne PAK-Dosierung gegenübergestellt.

Tabelle 22: Gegenüberstellung TOC-Entwicklung des Zeitraumes ohne PAK-Dosierung von März 2013 bis 21.05.2013 und des Zeitraumes mit PAK-Dosierung, vom 01.06.2013 bis 31.01.2014

	Ablauf Kontrollanlage 1 TOC in mg/L <u>vor</u> dem 01.06.2013	Ablauf Testanlage 2 TOC in mg/L <u>vor</u> dem 01.06.2013 (ohne PAK)
Mittelwert	15	15
Minimum	10	9
Maximum	35	26
Unterschied vom Mittelwert		gegenüber der Kontrollanlage:- 0,38 mg/L TOC
	Ablauf Kontrollanlage 1 TOC in mg/L <u>nach</u> dem 01.06.2013	Ablauf Testanlage 2 TOC in mg/L <u>nach</u> dem 01.06.2013 (mit PAK)
Mittelwert	14,	13
Minimum	7,20	7,50
Maximum	20	27
Unterschied vom Mittelwert		gegenüber der Kontrollanlage:- 0,93 mg/L TOC

Tabelle 23: Gegenüberstellung DOC-Entwicklung des Zeitraumes ohne PAK-Dosierung von März 2013 bis 21.05.2013 und des Zeitraumes mit PAK-Dosierung, vom 01.06.2013 bis 31.01.2014

	Ablauf Kontrollanlage 1 DOC in mg/l vor dem 01.06.2013	Ablauf Testanlage 2 DOC in mg/l vor dem 01.06.2013 (ohne PAK)
Mittelwert	15	14
Minimum	9	9
Maximum	30	19
Unterschied vom Mittelwert		gegenüber der Kontrollanlage:- 0,77mg/L DOC
	Ablauf Kontrollanlage 1 DOC in mg/l <u>nach</u> dem 01.06.2013	Ablauf Testanlage 2 DOC in mg/l <u>nach</u> dem 01.06.2013 (mit PAK)
Mittelwert	13	12
Minimum	7,2	7,3
Maximum	20	20
Unterschied vom Mittelwert		gegenüber der Kontrollanlage:- 0,93 mg/L DOC

Aus Tabelle 22 und Tabelle 23 ist erkennbar, dass unter Berücksichtigung der Ergebnisse aus dem Zeitraum vor der PAK-Dosierung der TOC und der DOC im zeitlichen Vergleich der Kontrollanlage während der PAK-Dosierung nicht signifikant gesenkt wurde.

Zusammenfassung – Vergleichbarkeit der beiden Versuchsanlagen

Der Sörensen-Index mit 0,8 bis 0,69 hatte eine hohe Vergleichbarkeit der Belebtschlammkonzentrationen zwischen Versuchs- und Testanlage erkennen lassen und damit belegt, dass beide biologische Reinigungsstufen bezüglich Schlammalter, BSB-Schlammbelastung und Sauerstoffversorgung gut vergleichbar waren. Darüber hinaus wurde festgestellt, dass diese beiden Biozönosen durchaus mit der Belebtschlammkonzentration des Großklärwerkes Düsseldorf-Süd vergleichbar waren.

Die TOC- und Stickstoffeliminationen genügten den Qualitätskriterien, die unter 3.3.1 genannt wurden, voll, außer bei den genannten Störfällen. Die Vergleichbarkeit der Ablaufsituationen beider Anlagen bezüglich TOC, DOC und Stickstoffüberwachungsparameter genügten ebenfalls den unter 3.3.1 genannten Qualitätsanforderungen.

Die Ergebnisse aus den Begleituntersuchungen lassen daher einen direkten Vergleich der im Folgenden dokumentierten Eliminationsleistungen für die untersuchten Spurenstoffe zu.

4.1.2 Spurenstoffelimination

Wie bereits unter 3.1 beschrieben, wurden die Untersuchungen zur Spurenstoffelimination aus der wässrigen Phase in zwei Abschnitten durchgeführt.

Die in beiden Phasen ausschließlich nach Erfüllung des Trockenwetterkriteriums – mittlere Tagesabwassermenge $< 90.000 \text{ m}^3$ über die jeweilige Probenahmedauer - durchgeführten Analysen wurden aus 72-h-Mischproben sowohl aus dem Zulauf, entspricht dem Ablauf Vorklärung des Großklärwerkes Düsseldorf-Süd, als auch aus den Abläufen der Nachklärungen von Mess- und Referenzstraße der halbtechnischen Versuchsanlage durchgeführt; diese Probenahmestrategie ergab sich aus den Ergebnissen der Tracerversuche und den daraus abgeleiteten Erkenntnissen. Die in Glasgefäßen gesammelten Proben wurden direkt nach den Probenahmen dem Analyseninstitut IUTA überbracht und dort zeitnah analysiert.

4.1.2.1 Untersuchungen mit 10 mg/L Pulveraktivkohle

Aus den insgesamt 12 Probenahmen bei einer PAK-Konzentration von 10 mg/L in der Belegung der Testanlage ergaben sich die in der nachfolgenden Tabelle 24 zusammengefassten Resultate für die Test- und die Kontrollanlage.

Tabelle 24: Zusammengefasste Resultate bei einer PAK-Dosierung von 10 mg/L PAK

10 mg/L PAK	TOC	Benzo- triazol	Carba- mazepin	Diclo- fenac	Meto- prolol	Sulfame- thoxazol
Minimale Elimination Kontrollanlage [%]	90	32	7	24	4	10
Maximale Elimination Kontrollanlage [%]	94	86	35	60	50	62
Mittlere Elimination Kontrollanlage [%]	92	66	19	42	27	40
Standardabweichung Elimination Kontrollanlage [\pm %]	1	14	10	12	14	15
Minimale Elimination Testanlage [%]	91	41	42	42	41	7
Maximale Elimination Testanlage [%]	94	89	72	71	78	67
Mittlere Elimination Testanlage [%]	93	70	59	57	65	43
Standardabweichung Elimination Testanlage [\pm %]	1	13	9	9	11	18

Für den TOC ergaben sich die bereits genannten Befunde, die im Vergleich beider Anlagen keine signifikanten Unterschiede ausweisen. Die mittlere Elimination in der Messstraße liegt mit 93 % bei derselben Standardabweichung von ± 1 % lediglich um 1 % über der in der Referenzstraße.

Für die untersuchten Spurenstoffe ergaben sich im Detail folgende Befunde:

Benzotriazol

Bei Benzotriazol ist das Ergebnis bei recht stark schwankenden Zulaufkonzentrationen zwischen 18 und 69 $\mu\text{g/L}$ nicht eindeutig; dieses wird in der Kontrollanlage im Mittel mit 66 ± 14 % in einem Bereich von 32 bis 86 % eliminiert, während in der Testanlage im Mittel 70 ± 13 % in einem Bereich von 41 $\mu\text{g/L}$ bis 89 $\mu\text{g/L}$ eliminiert wird (siehe Tabelle 2).

Dieses Ergebnis ist insofern überraschend, als dass in der Literatur Benzotriazol vorwiegend als gut mit PAK entfernbar ausgewiesen wird.

Carbamazepin

Carbamazepin wurde im Zulauf in Konzentrationen zwischen 0,9 und 2,3 $\mu\text{g/L}$ gefunden und wird in der Testanlage mit 59 ± 9 % (Min: 42 %, Max 72 %) deutlich besser reduziert als in der Referenzstraße mit 19 ± 10 % (min 7 %, Max 35 %). Dieses Ergebnis bestätigt die Werte aus der im Rahmen dieser Arbeit gesichteten Literatur (siehe Tabelle 2).

Diclofenac

Auch für Diclofenac wird in der Teststraße mit 42 bis 71 % (im Mittel 57 ± 9 %) eine signifikant bessere Elimination im Vergleich zur Referenzstraße mit 24 bis 60 % (im Mittel 42 ± 12 %) ebenfalls tendenziell mit den Literaturwerten übereinstimmend gefunden. Für diesen Spurenstoff bewegen sich die Zulaufkonzentrationen im Bereich von 2,9 bis 4,8 $\mu\text{g/L}$ (im Mittel $3,7 \pm 0,6$ $\mu\text{g/L}$) (siehe Tabelle 2).

Metoprolol

Die Zulaufkonzentrationen für Metoprolol wurden zu 1,2 bis 3,9 µg/L (Mittel 2,3±0,7 µg/L) bestimmt. Die Elimination in der Referenzanlage wurde zwischen 4 und 50 % bei einem Mittelwert von 27± 4 % bestimmt, während in der Testanlage eine Elimination zwischen 41 und 78 % bei einem Mittelwert von 65±11 % ermittelt wurde. Diese Werte liegen geringfügig unterhalb der in der Literatur genannten Werte (siehe Tabelle 2).

Sulfamethoxazol

Im Zulauf der Anlage fanden sich zwischen 0,3 und 1,0 µg/L (Mittel 0,7±0,2 µg/L). Für die Elimination wurde zwischen der Kontrollanlage mit 40 ± 15 % (Minimum 10 %, Maximum 62 %) und der Testanlage mit 43 ± 18 % (Minimum 7 %, Maximum 67 %) kein durch die PAK-Zugabe bedingter signifikanter Unterschied gefunden (siehe Tabelle 2).

4.1.2.2 Untersuchungen mit 20mg/L Pulveraktivkohle

Aus den insgesamt 15 bei einer PAK-Konzentration von 20 mg/L in der Belegung der Testanlage durchgeführten Probenahmen ergaben sich die in der nachfolgenden Tabelle 25 zusammengefassten Resultate für die Test- und die Referenzstraße.

Tabelle 25: Zusammengefasste Resultate bei einer PAK Dosierung von 20 mg/L PAK

20 mg/L PAK	TOC	Benzo- triazol	Carba- mazepin	Diclo- fenac	Meto- prolol	Sulfame- thoxazol
Minimale Elimination Kontrollanlage [%]	86	38	4	16	5	35
Maximale Elimination Kontrollanlage [%]	96	68	35	80	46	64
Mittlere Elimination Kontrollanlage [%]	93	60	19	40	31	51
Standardabweichung Elimination Kontrollanlage [± %]	3	8	11	19	12	8
Minimale Elimination Testanlage [%]	86	58	42	39	59	51
Maximale Elimination Testanlage [%]	96	75	73	100	79	78
Mittlere Elimination Testanlage [%]	93	67	57	58	70	69
Standardabweichung Elimination Testanlage [± %]	3	6	9	15	7	7

Für den TOC weisen auch hier die Ergebnisse aus, dass die Dosierung der Pulveraktivkohle direkt in die Belegung keinen signifikanten Einfluss auf die Reduktion hat, da die mittlere Elimination sowohl in der Referenz- wie auch in der Messstraße mit 93±1% einen identischen Befund liefert.

Für die untersuchten Spurenstoffe ergaben sich für die höhere PAK-Konzentration im Detail folgende Befunde:

Benzotriazol

Bei Benzotriazol ist das Ergebnis bei auch in diesem Zyklus stark schwankenden Zulaufkonzentrationen zwischen 6,8 und 76 µg/L uneindeutiger; dieses wird in der Kontrollanlage im Mittel mit 60±8 % in einem Bereich von 38 bis 68 % eliminiert, während in der Testanlage im Mittel 67±6 % in einem Bereich von 58 bis 75 % eliminiert wird.

Dieses Ergebnis bestätigt den Befund aus der ersten Untersuchungsreihe und belegt, dass zumindest mit der verwendeten Pulveraktivkohle Benzotriazol nicht gut entfernbar ist.

Carbamazepin

Carbamazepin wurde im Zulauf in Konzentrationen zwischen 0,8 und 1,7 µg/L gefunden und wird in der Testanlage mit 57±9 % (Min: 42 %, Max 73 %) deutlich besser reduziert als in der Referenzstraße mit 19±11 % (min 4 %, Max 35 %). Dieses Ergebnis bestätigt wiederum die Werte aus der im Rahmen dieser Arbeit gesichteten Literatur, weist aber aus, dass die Verdoppelung der PAK-Konzentration in diesem Falle keinen Einfluss auf die Höhe der Elimination hat.

Diclofenac

Auch für Diclofenac wird in der Teststraße mit 39 bis 100 % (im Mittel 58±15 %) eine signifikant bessere Elimination im Vergleich zur Referenzstraße mit 16 bis 80 % (im Mittel 40±19 %) ebenfalls tendenziell mit den Literaturwerten übereinstimmend gefunden. Für diesen Spurenstoff bewegen sich die Zulaufkonzentrationen im Bereich von 1,3 bis 5,6 µg/L (im Mittel 3,4±1,0 µg/L).

Metoprolol

Die Zulaufkonzentrationen für Metoprolol wurden mit 1,4 bis 3,1 µg/L (Mittel 2,4±0,5 µg/L) bestimmt. Die Elimination in der Referenzanlage wurde zwischen 5 und 46 % bei einem Mittelwert von 31±12 % bestimmt, während in der Testanlage eine Elimination zwischen 59 und 79 % bei einem Mittelwert von 70±7 % ermittelt wurde. Diese Werte liegen geringfügig unterhalb der in der Literatur genannten Werte und die Verdoppelung der PAK-Konzentration führt zu einer leicht erhöhten Elimination.

Sulfamethoxazol

Im Zulauf der Anlage fanden sich zwischen 0,6 und 1,1 µg/L (Mittel 0,9±0,1 µg/L). Für die Elimination wurde zwischen der Kontrollanlage mit 51±8 % (Minimum 35 %, Maximum 64 %) und der Testanlage mit 69±7 % (Minimum 51 %, Maximum 78 %) zwar ein signifikanter Unterschied gefunden, dem aber nach Auffassung der Autoren wegen der stark voneinander abweichenden Einzelbefunde kein hoher Stellenwert beigemessen werden sollte.

Fazit Arbeitspaket 1

Die Untersuchungen weisen aus, dass mit der verwendeten Pulveraktivkohle die Pharmaka Carbamazepin, Diclofenac und Metoprolol bereits bei einer PAK-Dosierung auf 10 mg/L in der Belebung der Testanlage aus der wässrigen Phase signifikant besser entfernt werden als in der Referenzanlage. Für diese Stoffe wird eine Elimination von ca. 60 % erzielt. Für

Benzotriazol und Sulfamethoxazol ergab sich keine Verbesserung der Elimination gegenüber der Referenzanlage.

Die Verdoppelung der PAK-Konzentration auf 20 mg/L zeigte in Bezug auf Benzotriazol, Carbamazepin und Diclofenac keinen Effekt, während für Metoprolol eine um 5%-Punkte verbesserte Elimination resultierte. Für Sulfamethoxazol ergab sich zwar im Mittel eine wesentlich verbesserte Elimination, die jedoch wegen der stark schwankenden Einzelwerte kein Gewicht in der Bewertung finden sollte.

Grundsätzlich ist auf der Basis der vorgestellten Ergebnisse festzuhalten, dass:

- die aus dem Wasserwerksprozess als Wirtschaftsgut anfallende Kohle geeignet ist, ausgewählte Spurenstoffe zu absorbieren und somit dem Abwasser zu entziehen
- sich die Dosierung der suspendierten Pulveraktivkohle direkt in die Belegung als ein tauglicher Schritt zur Spurenstoffelimination erwiesen hat und im Vergleich mit Literaturwerten in der Größenordnung tendenziell vergleichbare Resultate liefert.

4.2 Arbeitspaket 2: Absetzeigenschaften

4.2.1 Beobachtungen

Bei allen Absetzversuchen mit Belebtschlamm aus der halbtechnischen Versuchsanlage Düsseldorf war jede der in Kapitel 2.1.1 beschriebenen Phasen der Sedimentation klar erkennbar. Es zeigte sich bei den Belebtschlämmen der Referenz- und Teststraße zu Beginn der Versuche jeweils schnell eine Flockenausbildung mit Phasentrennung, gefolgt von einem konstanten Absinken des Schlammspiegels im Verlauf des behinderten Absetzens und anschließendem Übergang in die Kompressionsphase. Ein Channeling mit anschließend abklingender Kompression konnte in beiden Reinigungsstraßen nur bei den Versuchsdurchläufen mit Verdünnung erreicht werden, da die Zeit von 30 Minuten nicht ausreichte, um die letzte Sedimentationsphase zu vollenden und eine Eindickung zu erzielen. Grundsätzlich ließ sich im Verlauf der Versuche beobachten, dass sich Proben der Teststraße fast durchgehend besser absetzten als Proben der Referenzstraße. Dabei ist auffällig, dass besonders in der Anfangszeit des Versuches, also vorwiegend der Phase des behinderten Absetzens, der Schlamm Spiegel der Proben aus der Teststraße deutlich schneller sinkt als der Schlamm Spiegel der Proben aus der Referenzstraße. Zu Ende der 30 Minuten waren die Unterschiede deutlich geringer. Ein direkter Vergleich der Schlamm Spiegelhöhen der verdünnten Proben zeigte nach 30 Minuten nur noch geringe Unterschiede, jedoch nahezu durchgängig geringere Werte für die Proben der Teststraße. Zur Veranschaulichung zeigt die nachfolgende Abbildung 30 eine Gegenüberstellung der beiden Proben in unterschiedlichen Phasen des Absetzens.



Abbildung 30: Veranschaulichung der Absetzprozesse während der Versuchsdurchführung: links Referenzstraße, rechts Teststraße

4.2.2 Ergebnisse und Auswertung

Die Ergebnisse der ISV-Analysen wurden bereits unter Kapitel 4.1.1 Begleitparameter erläutert, da Sie routinemäßig zur Überwachung der Belebtschlämme mit erfasst wurden. Die Ergebnisse zeigten, dass sich der ISV der Teststraße bereits kurz nach Beginn der Aktivkohledosierung im Vergleich mit dem ISV der Kontrollanlage erkennbar verringerte.

Die Ergebnisse der Absetzversuche zu den Absetzeigenschaften, die unter den in Kapitel 3.3 beschriebenen Bedingungen ermittelt wurden, werden nachfolgend zusammengefasst dargestellt.

Belebtschlamm der halbtechnischen Versuchsanlage

In den nachfolgenden Abbildungen (31 – 33) sind die Schlammspiegelhöhen der Versuche mit verdünnten Proben in mm im Vergleich für jeden Versuchsmonat von Juli bis Dezember dargestellt. So ist ein direkter Vergleich zwischen Referenz- und Teststraße möglich und die zeitliche Entwicklung wird ebenfalls deutlich. Die Kurven der verdünnten Proben wurden gewählt, um den Einfluss der Wandeinflüsse zu minimieren und so eine Beeinträchtigung der Absetzgeschwindigkeit zu vermeiden. Es wurden immer beide Proben 1:1 mit dem Ablauf des entsprechenden Nachklärbeckens verdünnt.

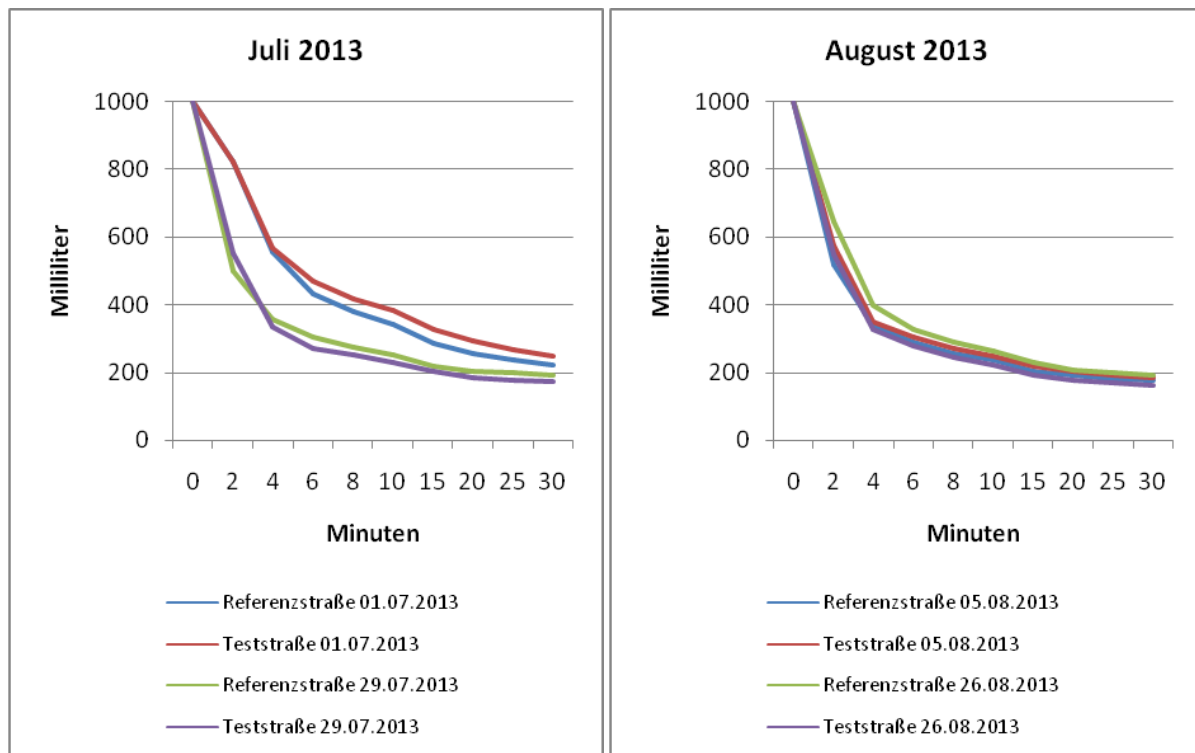


Abbildung 31: Absetzkurven der Referenz- und Teststraße im Vergleich Juli und August 2013

Die Aktivkohledosierung wurde Ende Mai mit $10 \text{ mg}_{\text{PAK}}/\text{L}$ in Betrieb genommen. In Abbildung 31 für Juli 2013 ist zu erkennen, dass am Monatsanfang die Absetzprozesse des Belebtschlammes aus der Teststraße noch verzögert ablaufen und die Werte der Schlamm Spiegelhöhen daher deutlich über denen der Referenzstraße liegen. Zusätzlich sind beide Absetzkurven relativ flach ausgebildet. Zum späteren Betrachtungszeitpunkt sind die Werte deutlich abgesunken, das freie Absinken läuft schneller ab und auch während des behinderten Absinkens werden bessere Absetzwerte erreicht, so dass sich steilere Absetzkurven ausbilden. Sowohl die Absetzkurven der Referenz- als auch der Teststraße liegen im Monatsverlauf nicht sehr dicht beieinander und Test- und Referenzstraße weisen zum gleichen Zeitpunkt ein nahezu identisches Absetzverhalten auf. Der Vergleich im Monat August 2013 (Abbildung 31) zeigt, dass sich das Absetzverhalten der Schlämme etwas verändert. Die Kurven aller vier Versuche verlaufen nahezu deckungsgleich und entsprechen in etwa den Kurven von Ende Juli.

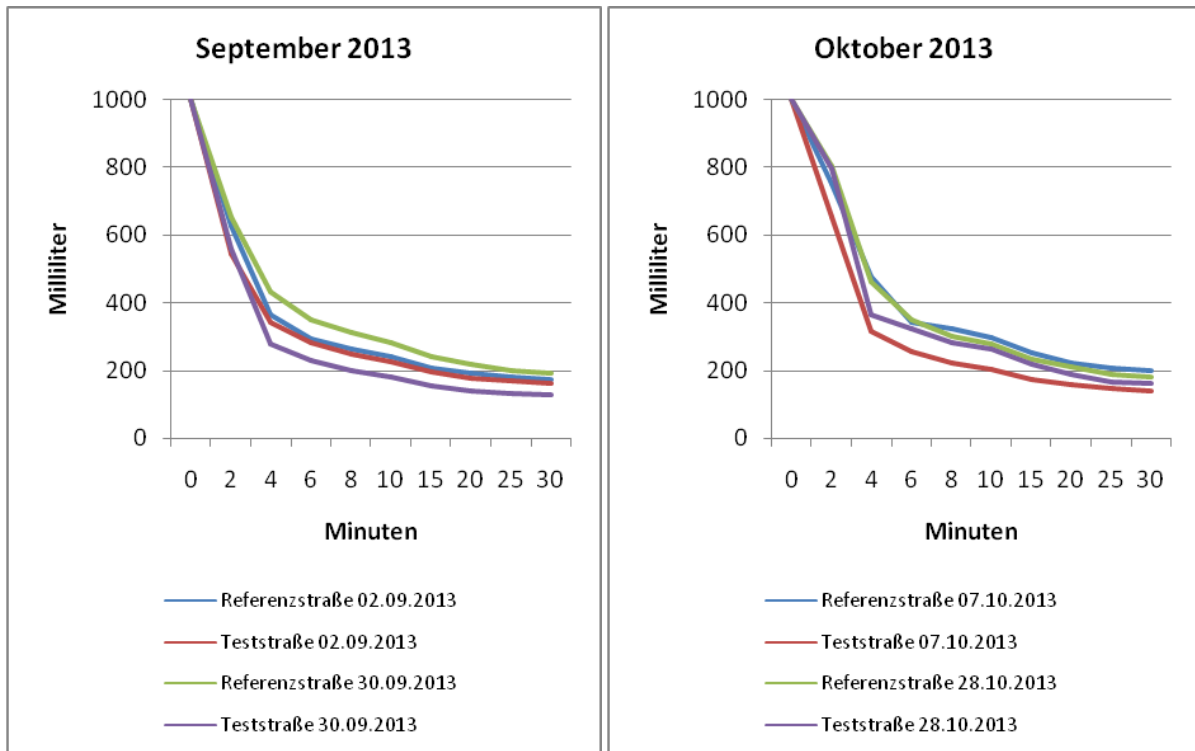


Abbildung 32: Absetzkurven der Referenz- und Teststraße im Vergleich September und Oktober 2013

Im weiteren Verlauf der Versuchsreihe zeigt sich eine Veränderung im Absetzverhalten der Belebtschlämme der Reinigungsstraßen. Während die Absetzkurven der Referenzstraße sich immer mehr annähern, variieren die Kurven der Teststraße und es ist eine sichtliche Verbesserung der Absetzbarkeit zu erkennen (Abbildung 32), die sich zu Beginn des Monats Oktober fortsetzt. Danach jedoch verschlechterte sich das Absetzverhalten in der Teststraße wieder etwas, was mit einer erhöhten Abundanz fadenförmiger Bakterien einher ging.

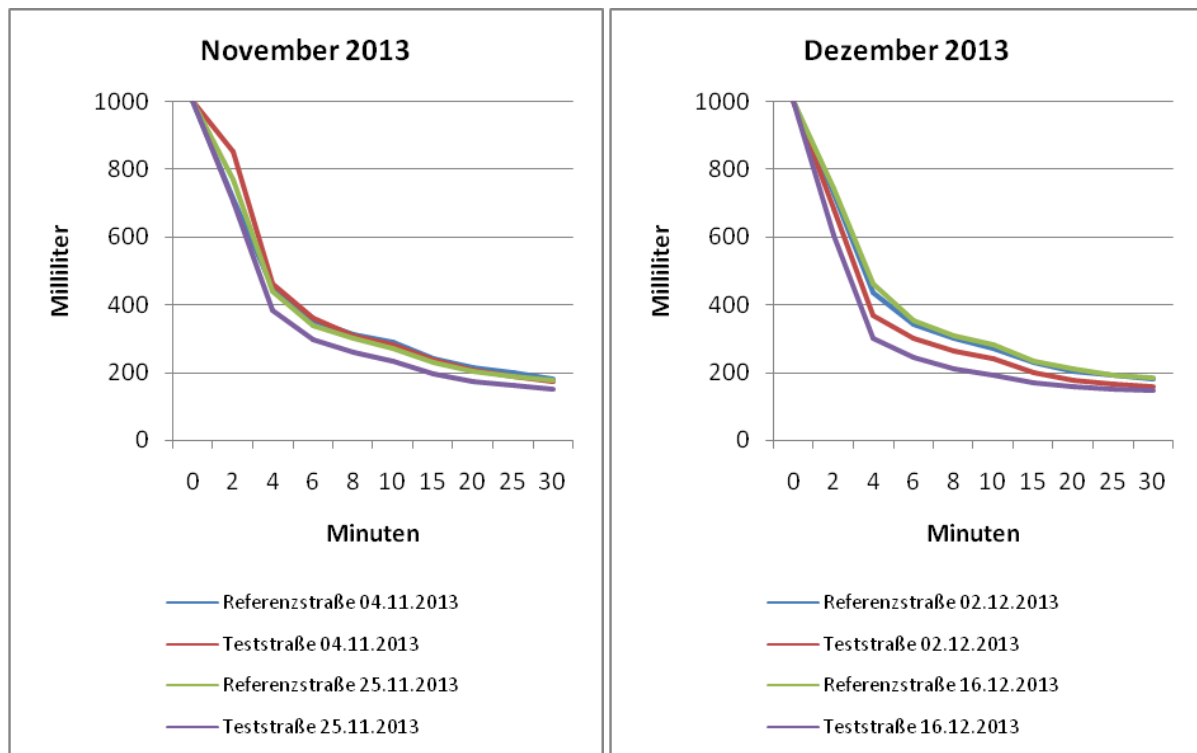


Abbildung 33: Absetzkurven der Referenz- und Teststraße im Vergleich November und Dezember 2013

Die Absetzkurven der Referenzstraße sind mittlerweile nahezu identisch und verändern sich kaum in ihrem Verlauf (siehe Abbildung 33). Während die Kurven der Teststraße sich im November wieder etwas verbessern, bleiben Sie im Dezember 2013 ebenfalls vergleichsweise konstant und liegen zu diesem Zeitpunkt deutlich erkennbar unter den Kurven der Referenzstraße.

Für alle Versuche wurde aus der Schlammspiegelhöhendifferenz zu Beginn des jeweiligen Versuches und nach 30 Minuten bezogen auf die Zeit eine mittlere Absetzgeschwindigkeit ermittelt. In der nachfolgenden Abbildung 34 werden die mittleren Absetzgeschwindigkeiten von Referenz- und Teststraße im verdünnten und unverdünnten Versuch gegenübergestellt.

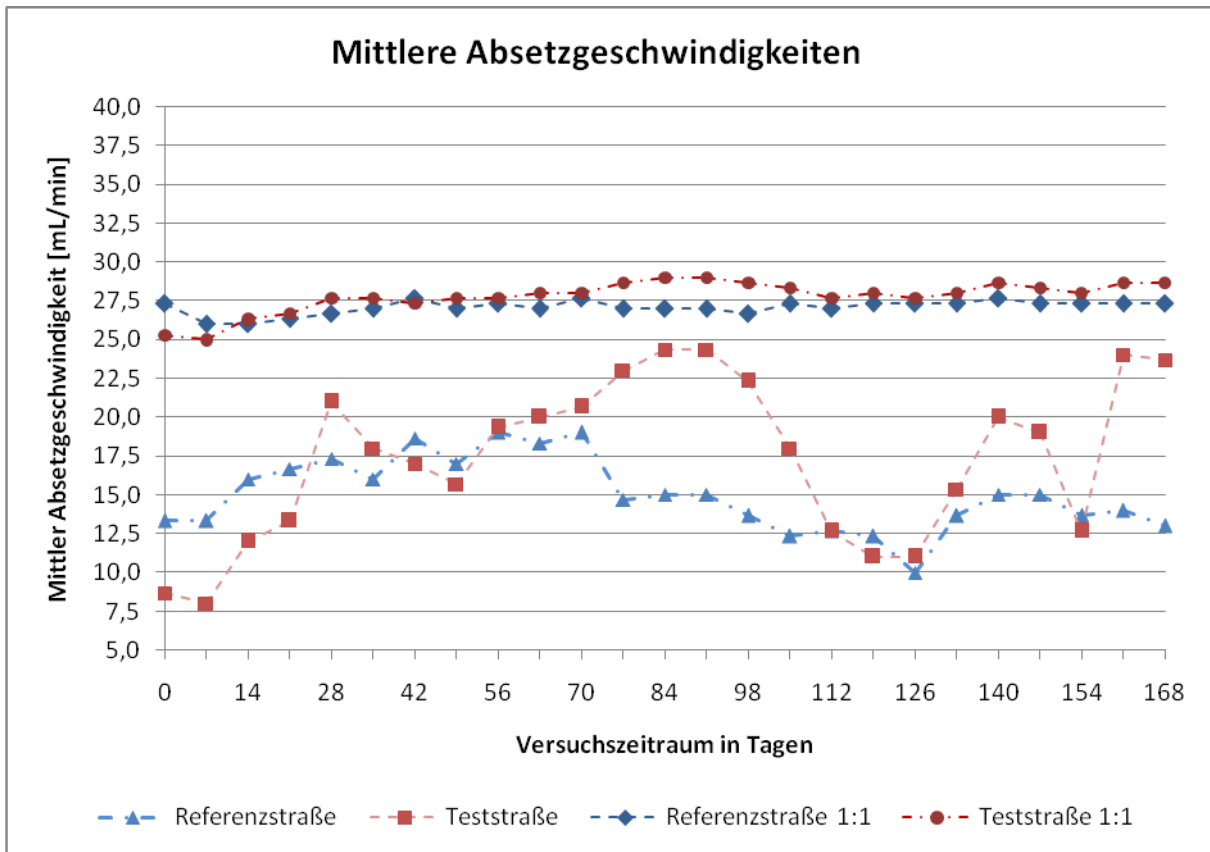


Abbildung 34: Mittlere Absetzgeschwindigkeiten im unverdünnten und verdünnten Versuch (1:1)

Bei der Betrachtung im Versuch mit unverdünnten Proben zeigt sich, dass sich die mittleren Absetzgeschwindigkeiten der Referenzstraße zwischen 13 – 19 mL/min bewegen. In der Teststraße bewegen sich die Geschwindigkeiten zwischen 8 – 24,3 mL/min, die Schwankungen sind verglichen mit denen der Referenzstraße dabei deutlich stärker (siehe Kapitel 4.2.1). Im Verlauf des Versuchszeitraumes ist zuerst ein Anstieg der mittleren Absetzgeschwindigkeiten in der Teststraße zu erkennen, der allerdings Ende September unterbrochen wird und sich erst Mitte November wieder langsam einstellt. Dieser Einbruch kann mit vermehrter Präsenz fadenförmiger Bakterien in Verbindung gebracht werden. Im Versuch mit verdünnten Proben sind die Schlämme der beiden Reinigungsstraßen schon weniger klar voneinander abzugrenzen. Es ist jedoch zu erkennen, dass die mittlere Absetzgeschwindigkeit der Teststraße seit Anfang August fast durchgängig höher ist als der Wert aus der Referenzstraße. Die durchschnittlichen Geschwindigkeiten unterscheiden sich zahlenmäßig nur geringfügig voneinander; bei der Referenzstraße liegt der Mittelwert bei 27,1 mL/min und bei der Teststraße bei 27,8 mL/min.

Aktivkohledosierung zu Belebtschlamm des Großklärwerks Düsseldorf-Süd

Um den Einfluss der PAK auf die Absetzeigenschaften des Belebtschlammes zu untersuchen, wurde bei dieser Versuchsreihe der Analyseschwerpunkt auf die Schlammvolumenanteile φ_s und die Absetzgeschwindigkeiten gelegt. Für einen anschaulichen Vergleich wurde an den fünf Versuchstagen in je einem Standzylinder Belebtschlamm ohne und mit PAK zeitgleich abgesetzt und die Schlammspiegelhöhen und Schlammvolumenanteile aufgezeichnet (Lau-

terbach, 2014). Die Ergebnisse der Schlammvolumina der einzelnen Versuchstage sind in den nachfolgenden Abbildung 35 dargestellt.

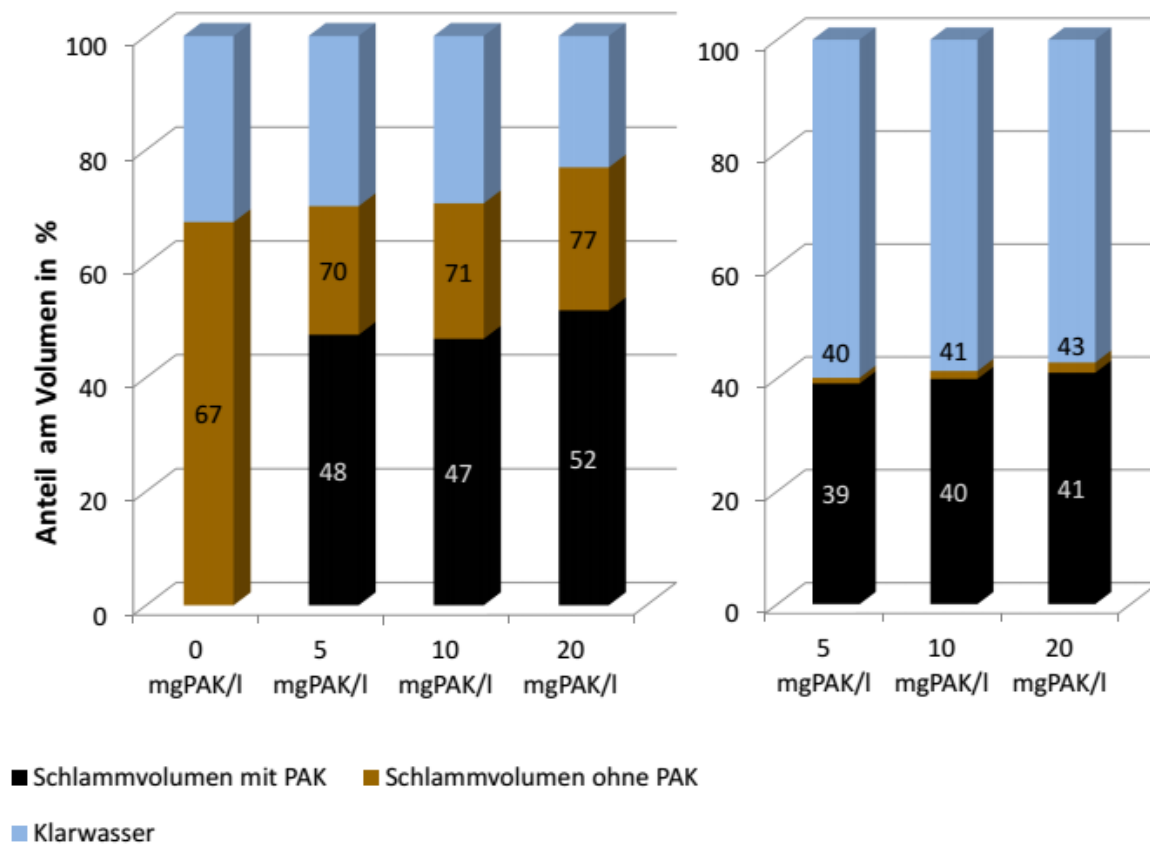


Abbildung 35: Schlammvolumina am ersten (links) und zweiten (rechts) Versuchstag (28.08. und 25.09.2013) in Prozent des Gesamtvolumens

Die dargestellten Säulen stellen jeweils die Ergebnisse der Parallelversuche dar. Der Volumenanteil des abgesetzten Belebtschlammes ohne Aktivkohle ist dabei braun und der des Belebtschlamm-Aktivkohlegemisches schwarz abgebildet. Am ersten Versuchstag wurde zuerst ein Blindversuch ohne PAK-Dosierung durchgeführt. Dabei hatte sich das Schlammvolumen nach 30 Minuten auf 67 % des Trichtervolumens (1 Liter) abgesetzt. Anschließend sind die Ergebnisse der Proben dargestellt, die mit Aktivkohle angereichert wurden. Es ist zu erkennen, dass eine erhöhte PAK-Dosierung nicht zu einem niedrigeren Schlamm Spiegel geführt hat. Jedoch nahm die Schlamm Spiegelhöhe der jeweils parallel mit unbehandeltem Belebtschlamm durchgeführten Versuche ebenfalls zu, was durch eine leichte Verschlechterung der Absetzeigenschaften durch die Schlamm Lagerung im Tagesverlauf bedingt wurde. Diese Verschlechterung mit zunehmender Versuchsdauer war an den anderen Tagen ebenfalls zu erkennen.

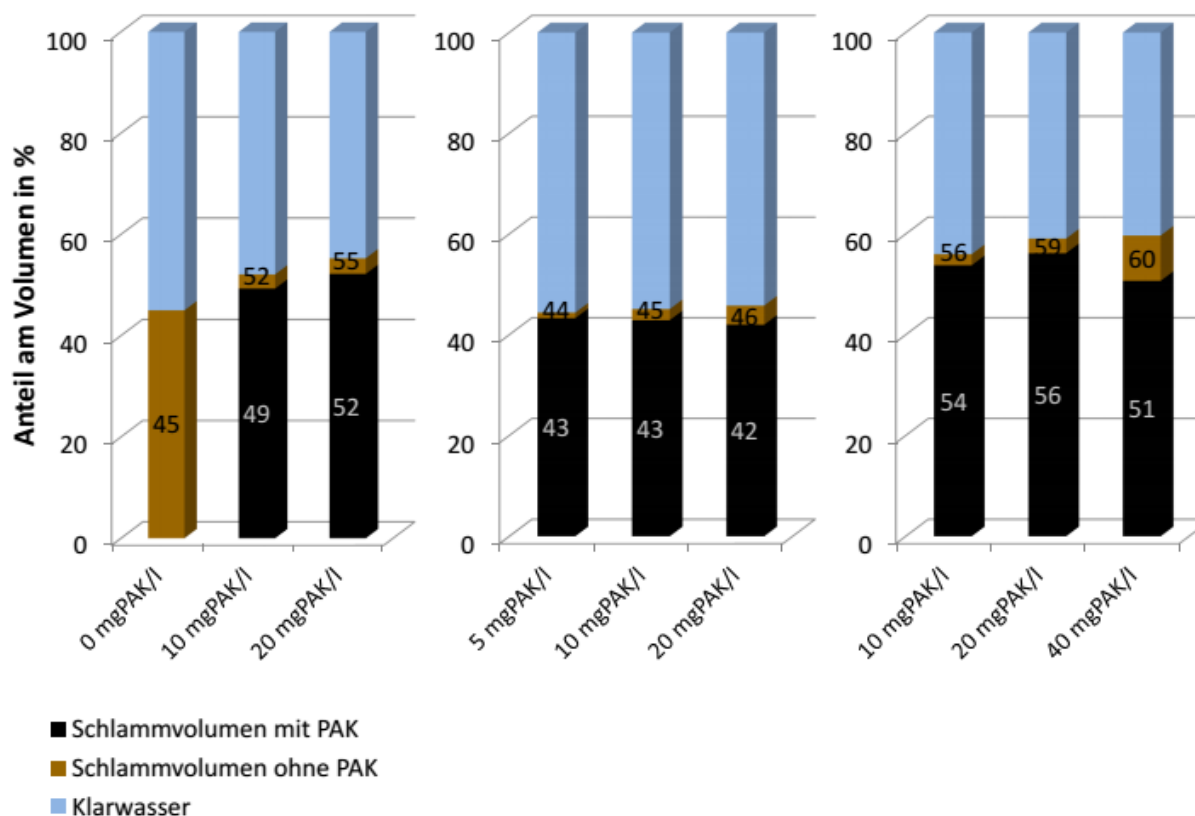


Abbildung 36: Schlammvolumina am dritten (links, 05.11.2013), vierten (Mitte, 04.12.2013) und fünften (rechts, 11.12.2013) Versuchstag in Prozent des Gesamtvolumens

Die Versuchsergebnisse für die Versuchstage drei bis fünf zeigen vom Verlauf vergleichbare Ergebnisse mit denen der ersten beiden Tage (siehe Abbildung 36). Der erste Tag fällt aufgrund seiner hohen Differenz zwischen den Schlammspiegeln mit und ohne PAK etwas aus der Reihe. In der Durchführung unterschied sich dieser Versuch von den anderen dadurch, dass der Belebtschlamm während der Lagerung nicht kontinuierlich gerührt, sondern jeweils vor der Benutzung ausgiebig durch Schwenken homogenisiert wurde. Abgesehen von diesem ersten Versuchstag lag der Wert des Schlammvolumens ohne PAK-Dosierung stets zwischen 40 – 60 Vol-% und mit PAK-Dosierung zwischen 39 – 51 Vol-%. Diese Wertebereiche scheinen auf den ersten Blick nur mäßig verschieden, bei genauerer Betrachtung der Abnahme der Absetzbarkeit über die Zeit der jeweilig parallel vorgenommenen Versuche an den einzelnen Versuchstagen wird jedoch sichtbar, dass dort signifikante Unterschiede auftreten. Wie bereits erwähnt nimmt die Absetzbarkeit des Belebtschlammes mit andauernder Versuchsdauer ab. Im Vergleich dazu zeigt sich bei den Versuchen mit PAK-Dosierung, dass die Abnahme der Absetzbarkeit im Verlauf der Zeit deutlich geringer ist und teilweise sogar eine Zunahme der Absetzbarkeit erzielt werden konnte (siehe Tabelle 26, Spalte 3.2) Da sich bei den parallel durchgeführten Versuchen im Standzylinder die Belebtschlammproben nur durch die Zugabe von PAK unterschieden, wird anhand dieser Divergenzen der Einfluss der PAK auf die Absetzeigenschaften deutlich. In jedem Fall konnte bereits mit einer Dotierung von $5 \text{ mg}_{\text{PAK}}/\text{L}$ eine Verbesserung des Absetzprozesses erzielt werden.

Tabelle 26: Betrachtung der Absetzbarkeit je Versuch bezogen auf die Schlammvolumenanteile

Datum	Ergebnisse der Schlammvolumenanteile Absetzversuche		Abnahme der Absetzbarkeit über die Zeit		Differenz der Schlammvolumenanteile [Vol.%]	Steigerung der Absetzbarkeit zum vorangegangenen Versuch mit PAK %
	$\varphi_{S,BS}$ [Vol.%]	$\varphi_{S,BS\&PAK}$ [Vol.%]	$\Delta_{S,BS}$ [Vol.%]	$\Delta_{S,BS\&PAK}$ [Vol.%]		
28.08.2013	67,3	-			0	
			-2,8	-		-
	70,1	47,5			22,6	
			-0,5	0,7		5,04
	70,6	46,8			23,8	
		-6,3	-5		5,18	
	76,9	51,8			25,1	
25.09.2013	40,1	39,1			1	
			-1,2	-0,8		28,57
	41,3	39,9			1,4	
		-1,5	-1,1		22,22	
	42,8	41			1,8	
05.11.2013	45	-			-	
			-7,1	-		-
	52,1	49,3			2,8	
		-3,2	-2,9		9,68	
	55,3	52,2			3,1	
04.12.2013	44,4	43,3			1,1	
			-0,7	0,4		50,00
	45,1	42,9			2,2	
		-0,7	0,9		42,11	
	45,8	42			3,8	
11.12.2013	56	53,8			2,2	
			-3,1	-2,4		24,14
	59,1	56,2			2,9	
		-0,6	5,5		67,78	
	59,7	50,7			9	

Um das Maß der Beeinflussung des Absetzverhaltens für eine definierte Aktivkohledosierung zu quantifizieren, wurde in Tabelle 26 die Steigerung der Absetzbarkeit zum jeweils vorangegangenen Versuch berechnet. Die Berechnung zeigt, dass mit jeder Dosierungserhöhung eine Steigerung der Absetzbarkeit erzielt werden konnte. Das Ausmaß dieser lässt sich jedoch nicht eindeutig quantifizieren, da die prozentuale Steigerung sehr stark schwankt. Es lässt sich dennoch feststellen, dass an den jeweiligen Versuchstagen die Werte des verbesserten Absetzverhaltens pro Dosierungserhöhung immer eine ähnliche Größenordnung aufwiesen.

Fazit Arbeitspaket 2

Im Rahmen des zweiten Arbeitspaketes wurde der Einfluss der Dosierung von Pulveraktivkohle auf die Absetzeigenschaften von Belebtschlamm untersucht. Die Ergebnisse der Absetzversuche mit Belebtschlamm der Testanlage zeigten durch eine PAK-Dosierung von $10 \text{ mg}_{\text{PAK}}/\text{L}$ direkt in den laufenden Betrieb des Belebungsbeckens eine leichte Verbesserung

der Absetzeigenschaften. Die Absetzkurven unterschieden sich allerdings nur geringfügig von denen der Referenzstraße ohne PAK. Die Erhöhung der Dosiermenge auf 20 mg_{PAK}/L hatte eine weitere Verbesserung der Absetzeigenschaften zur Folge und es konnten in dieser Phase die niedrigsten Schlammindizes mit 91 mL/g bestimmt werden. Folgerichtig verbesserten sich die Absetzgeschwindigkeiten in der Teststraße und es konnten zeitweise Absetzgeschwindigkeiten erreicht werden, die bis zu 10 mL/min über den Werten der Referenzstraße lagen. Wichtig bei der Beurteilung dieser Ergebnisse ist, dass in beiden Reinigungsstraßen immer wieder vermehrt fadenförmige Bakterien auftraten, besonders jedoch in der Teststraße, was eine Verschlechterung der Absetzeigenschaften nach sich zieht. Die Analyse der Ergebnisse aus den Laborversuchen zeigen, dass sich die PAK bereits innerhalb von 30 Minuten mit dem Belebtschlamm verbindet und für ein besseres Absetzverhalten sorgt. Die schlechter werdenden Absetzeigenschaften des Belebtschlammes über die Versuchsdauer konnten mittels der Zuführung von PAK kompensiert werden. Zusammenfassend kann gesagt werden, dass sich der Einsatz von PAK positiv auf die Absetzeigenschaften von Belebtschlamm auswirkt, eine Quantifizierung dieser Verbesserung durch diese Versuche jedoch nicht möglich war.

4.3 Arbeitspaket 3: Entwässerungseigenschaften

Als Maß für das Wasserabgabevermögen des Belebtschlammes wurden in diesem Arbeitspaket der erreichte volumetrische Feststoffgehalt, die Überstände (Zentrante) und das abgesetzte Schlammvolumen aus den Versuchen mit der Laborzentrifuge sowie versuchsweise die spezifische kapillare Fließzeit (CST/TS) als Entwässerungskennwerte herangezogen. In den nachfolgenden Kapiteln 4.3.1 und 4.3.2 sind alle relevanten Ergebnisse dieser Versuche dargestellt.

4.3.1 Zentrifugation

Untersuchungen zum direkten Vergleich der Entwässerung von Test- und Referenzstraße

Versuchsreihe A

Der Versuch wurde mit der maximalen Geschwindigkeit von 4.700 U/min begonnen. Anschließend wurde diese schrittweise auf bis zu 1.000 U/min reduziert. Im Anschluss an diese Versuche wurden mehrere Durchgänge mit unterschiedlichen Zentrifugationszeiten bei maximaler Umdrehungszahl durchgeführt. Der TS-Gehalt des Belebtschlammes der Referenzstraße wurde zu Versuchsbeginn zu 2,8 g/L gemessen und der TS-Gehalt der Teststraße betrug 3,1 g/L.

Zur besseren Übersicht sind die volumetrischen Feststoffgehalte für die Versuche mit unterschiedlichen Umdrehungszahlen und einer Zentrifugationsdauer von drei Minuten in Abbildung 37 (links) sowie die volumetrischen Feststoffgehalte bei der maximalen Umdrehungszahl von 4.700U/min und steigender Zentrifugationsdauer in Abbildung 37 (rechts) graphisch dargestellt. Die kompletten Versuchsergebnisse sind in Anhang M zu finden.

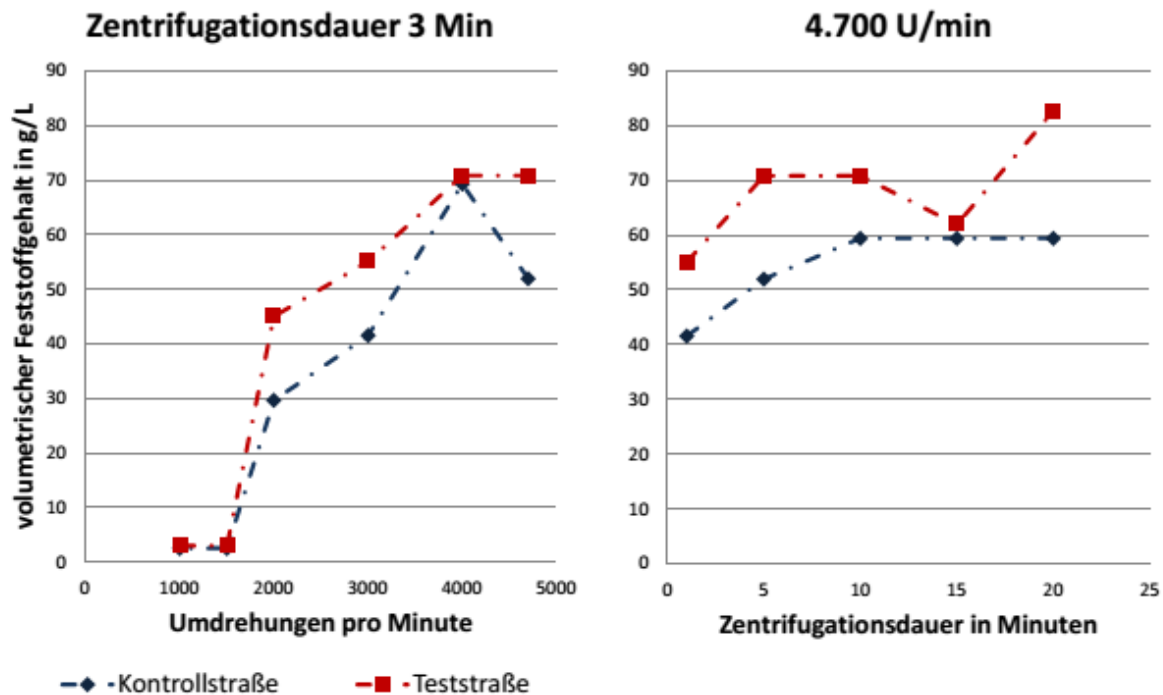


Abbildung 37: Entwässerbarkeit für Versuch A bei 3 Minuten Zentrifugationsdauer und verschiedenen Umdrehungszahlen (links) und bei 4.700 U/min (max.) und steigender Zentrifugationsdauer (rechts)

Bei Umdrehungszahlen unter 1.500 U/min war keine Phasentrennung erkennbar, so dass kein auswertbares Entwässerungsergebnis vorlag und der volumetrische Feststoffgehalt dem Ausgangsfeststoffgehalt entspricht. Die Diagramme zeigen, dass der erzielte volumetrische Feststoffgehalt der Teststraße in allen auswertbaren Durchgängen über dem Wert der Referenzstraße lag. Hierbei ist jedoch zu beachten, dass der Ausgangsfeststoffgehalt der beiden Reinigungsstraßen zum Zeitpunkt der Probenahme nicht identisch war, sondern der Wert der Teststraße mit 3,1 g/L etwas höher gemessen wurde als der TS-Gehalt der Referenzstraße. Ein höherer Ausgangsfeststoffgehalt hat natürlich einen höheren Endfeststoffgehalt zur Folge, somit sind nur Ergebnisse direkt vergleichbar, die bei identischen Ausgangsfeststoffgehalten durchgeführt wurden.

Versuchsreihe B

Versuch B wurde zu Beginn der Erhöhung der Pulveraktivkohledosierung auf 20 mg_{PAK}/L durchgeführt (Versuch A: 10 mg_{PAK}/L). Darüber hinaus wurde das zentrifugierte Volumen für diesen und die nachfolgenden Versuche auf 500 mL erhöht (Coskun, 2014). Der Versuch wurde erneut mit 4.700 U/min begonnen. Anschließend wurde die Umdrehungszahl um jeweils 1.000 U/min reduziert. Der Ausgangsfeststoffgehalte beider Proben betrug 2,1 g/L. Bei dieser Schlammmenge konnte bereits unterhalb einer Umdrehungszahl von 2.700 U/min keine eindeutige Phasengrenze mehr erkannt werden, so dass eine Auswertung dieser Durchläufe nicht möglich war.

Mithilfe des Ausgangsfeststoffgehalts und den bei der Zentrifugation abgesetzten Schlammvolumina ergab sich für den Schlamm aus der Referenzstraße ein maximaler volumetrischer Feststoffgehalt von 51,5 g/L. Für den Schlamm aus der Teststraße wurde dieser zu 59,4 g/L berechnet. Der maximal reduzierte Wasseranteil des Belebtschlammes der Referenzstraße betrug 4,9 %, während der Belebtschlamm der Teststraße eine Reduktion von 5,7 % erzielte. In der nachfolgenden Abbildung 38 sind die volumetrischen Feststoffgehalte für Versuch B mit unterschiedlichen Umdrehungszahlen bei gleicher Zentrifugationsdauer (Abbildung 38, links) sowie bei maximaler Umdrehungszahl und steigender Zentrifugationsdauer (Abbildung 38, rechts) graphisch dargestellt. Die kompletten Versuchsergebnisse sind in Anhang N zu finden.

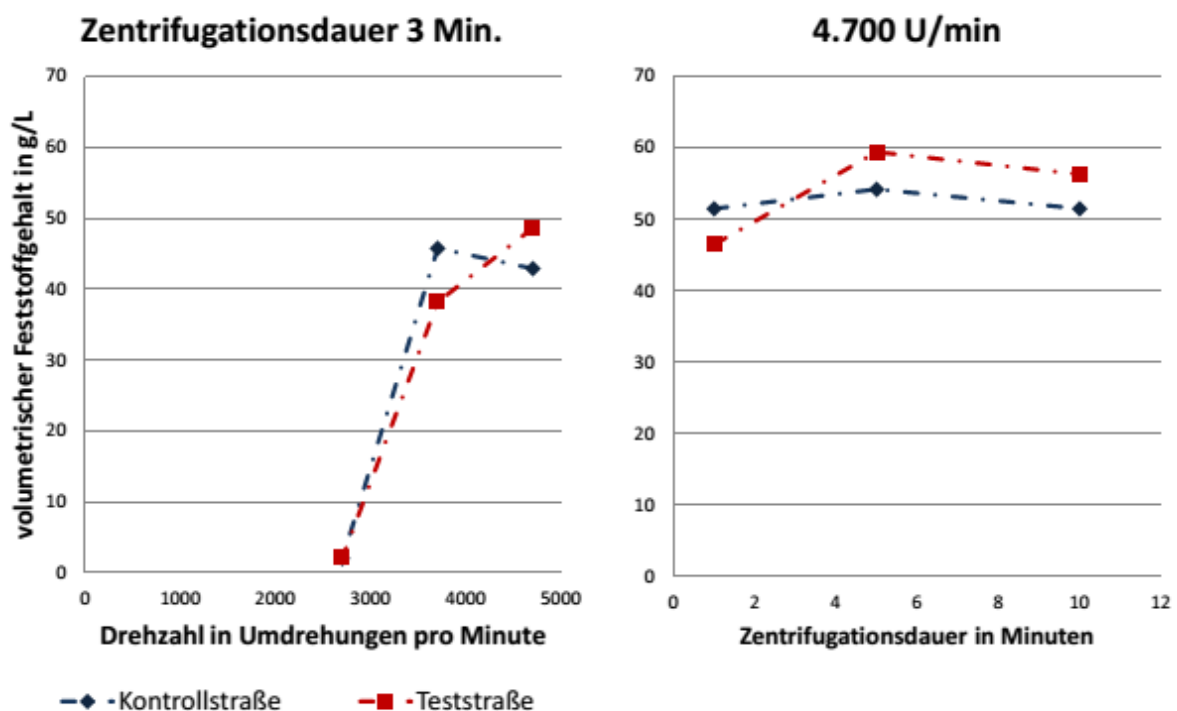


Abbildung 38: Entwässerbarkeit für Versuch B bei 3 Minuten Zentrifugationsdauer und verschiedenen Umdrehungszahlen (links) und bei 4.700 U/min (max.) und steigender Zentrifugationsdauer (rechts)

Die Abbildung 38 zeigt, dass die volumetrischen Endfeststoffgehalte beider Proben sehr nah beieinander liegen. Es ist keine eindeutige Abschätzung möglich, welcher Schlamm sich besser entwässern lässt. Bei einer maximalen Umdrehungszahl von 4.700 U/min liegt ab einer Zentrifugationsdauer von 5 Minuten der Endfeststoffgehalt des Belebtschlammes der Teststraße über dem Wert der Referenzstraße.

Versuchsreihe C

Der Ausgangsfeststoffgehalt beider Proben wurde am vierten Versuchstag zu 2,0 g/L gemessen. Das Vorgehen dieses Versuchs entsprach Versuch B. Es wurde jedoch zusätzlich eine Zentrifugationsdauer von 20 Minuten bei 4.700 U/min untersucht.

Entsprechend zu Versuch B konnte bei einer Drehzahl von 2.700 U/min kein Entwässerungsergebnis ermittelt werden. Aus Abbildung 39 geht hervor, dass zwar in den meisten Fällen der volumetrische Feststoffgehalt der Teststraße über dem Wert der Referenzstraße liegt, die Ergebnisse jedoch einigen Schwankungen unterliegen, so dass keine eindeutige Aussage zum Einfluss der PAK getroffen werden kann. Die vollständigen Versuchsergebnisse sind in Anhang O dargestellt.

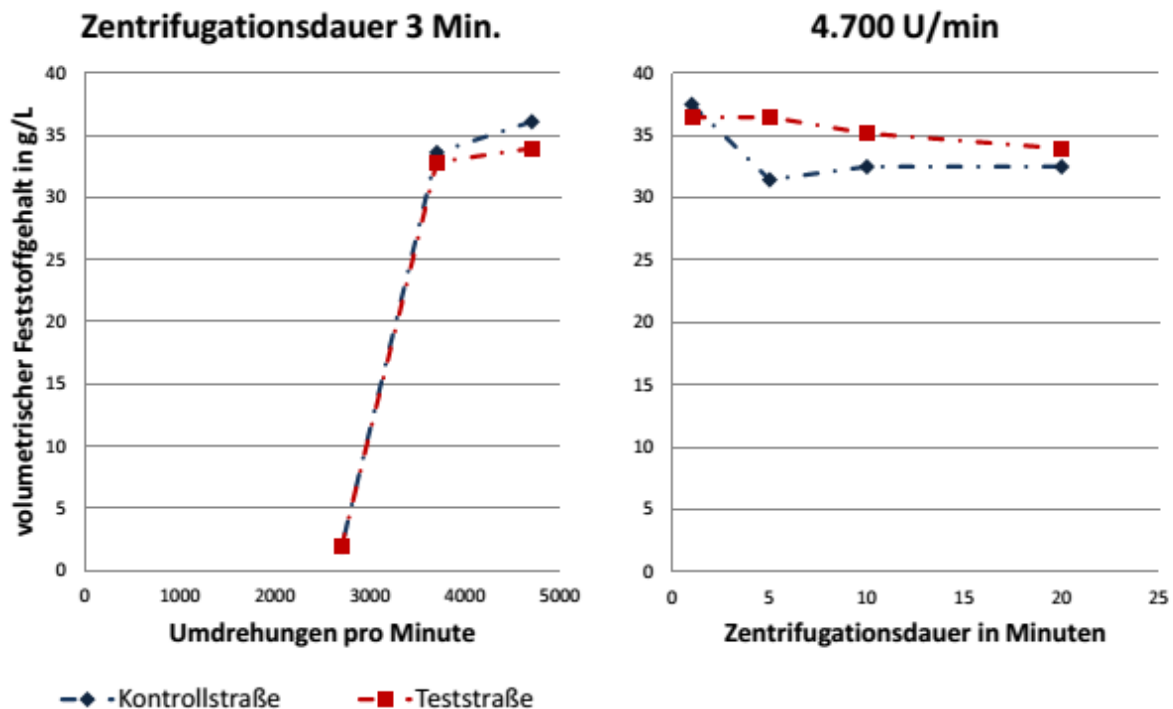


Abbildung 39: Entwässerbarkeit für Versuch C bei 3 Minuten Zentrifugationsdauer und verschiedenen Umdrehungszahlen (links) und bei 4.700 U/min (max.) und steigender Zentrifugationsdauer (rechts).

Versuchsreihe D

In diesem Versuch wurde die Zentrifugationszeit über eine breitere Spanne variiert, während die Drehzahl konstant 4.700 U/min betrug. Gestartet wurde der Versuch mit einer minimalen Zentrifugationszeit von 2,5 Minuten, welche schrittweise auf 30 Minuten erhöht wurde. Der Ausgangsfeststoffgehalt beider Proben betrug 3,0 g/L. In Abbildung 40 ist zu erkennen, dass der volumetrische Feststoffgehalt beider Proben nahezu identische Werte erreicht. Bei einer Zentrifugationsdauer unter 20 Minuten lag der Wert der Referenzstraße jedoch jeweils über dem Wert der Teststraße. Die kompletten Versuchsergebnisse sind in Anhang P zu finden.

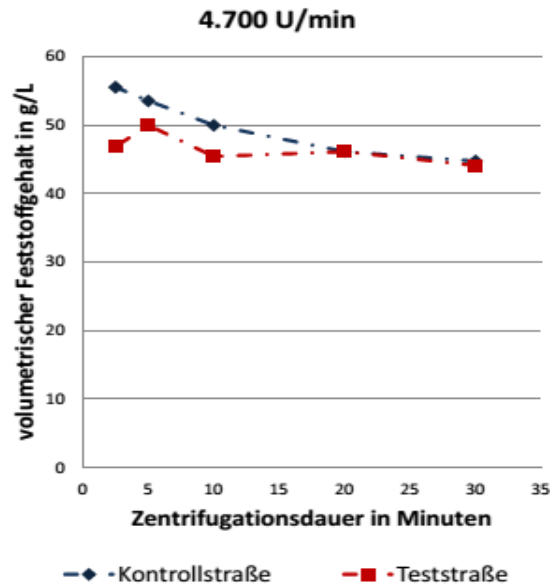


Abbildung 40: Entwässerbarkeit bei einer max. Drehzahl von 4.700 U/min (Versuch D)

Angesichts der nicht eindeutigen Ergebnisse verglichen mit Versuch 4 wurde Versuch 5 wiederholt (Anhang Q), konnte jedoch ebenfalls nicht eindeutig ausgewertet werden, da immer eine leichte Differenz im Ausgangsfeststoffgehalt vorlag.

Versuchsreihe E-G

Bei den Versuchen E bis G handelt es sich um identisch durchgeführte Versuchsreihen, die jedoch aufgrund der langen Versuchsdauer an unterschiedlichen Tagen und somit mit verschiedenen Proben stattfinden mussten. Die Drehzahlen der Zentrifuge wurden auf 2.700, 3.700 und 4.700 U/min eingestellt, wobei bei jeder Drehzahl Zentrifugationsdauern zwischen 2,5 und 20 Minuten untersucht wurden. Es ist zu beachten, dass der Ausgangsfeststoffgehalt der Proben nicht in allen Fällen identisch war. Für den ersten Versuchstag (E) wurden sowohl für die Test- also auch für die Referenzstraße ein TS-Gehalt von 2,1 g/L gemessen. Am zweiten Versuchstag (F) wurde ein TS-Gehalt der Referenzstraße von 2,0 g/L ermittelt, während der Wert der Teststraße 2,1 g/L betrug und am dritten Versuchstag (G) betrug der TS-Gehalt der Referenzstraße nur 1,7 g/L, während für die Probe der Teststraße ein Feststoffgehalt von 2,0 g/L ermittelt wurde. Die Ergebnisse der drei Versuche sind zur besseren Übersicht in der nachfolgenden Abbildung 41 nebeneinander dargestellt. Das vollständige Versuchsprotokoll ist in Anhang R zu finden.

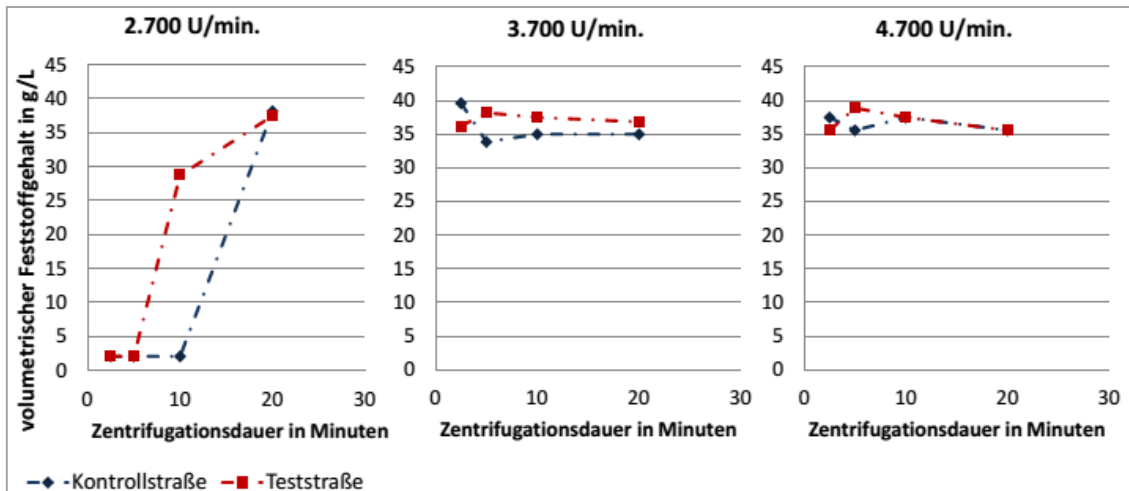


Abbildung 41: Volumetrischer Feststoffgehalt bei verschiedenen Zentrifugationsdauern und Umdrehungsgeschwindigkeiten Versuch E (TS-Gehalt: Teststr.: 2,1 g/L, Referenzstr.: 2,1 g/L)

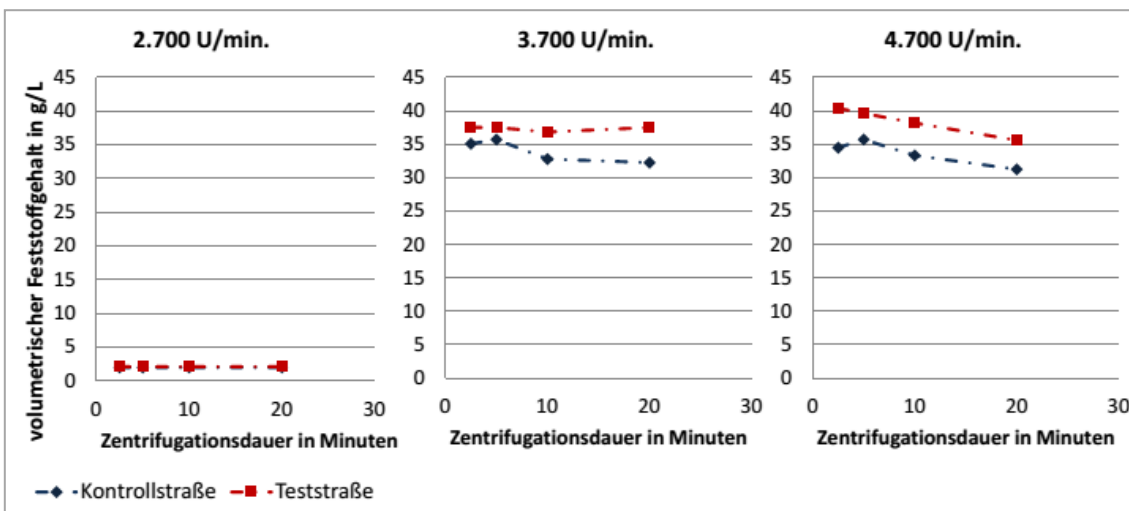


Abbildung 42: Volumetrischer Feststoffgehalt bei verschiedenen Zentrifugationsdauern und Umdrehungsgeschwindigkeiten Versuch F (TS-Gehalt: Teststr.: 2,1 g/L, Referenzstr.: 2,0 g/L)

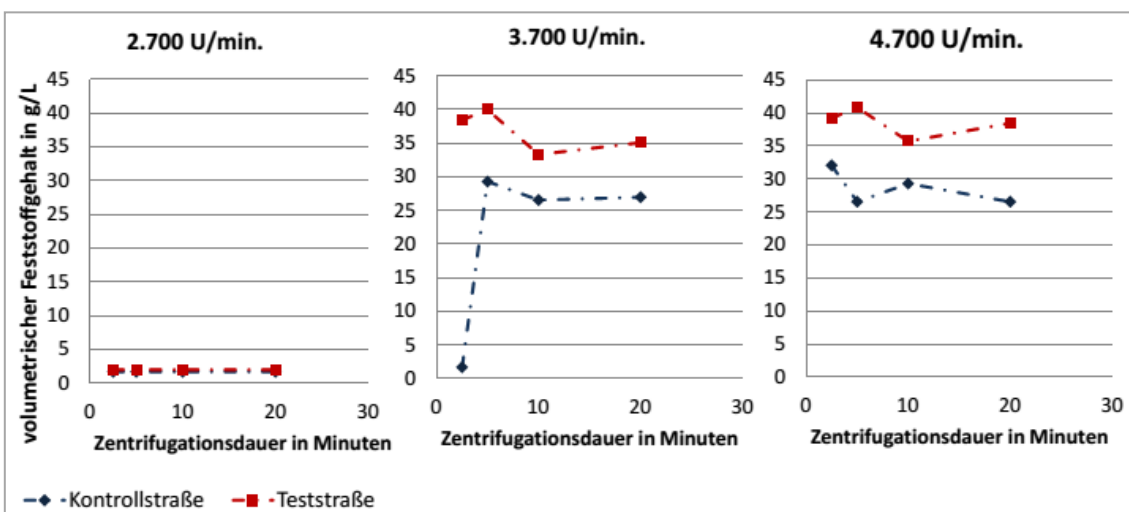


Abbildung 43: Volumetrischer Feststoffgehalt bei verschiedenen Zentrifugationsdauern und Umdrehungsgeschwindigkeiten an Versuch G (TS-Gehalt: Teststr.: 2,0 g/L, Referenzstr.: 1,7 g/L)

Abbildung 41 beinhaltet die Ergebnisse der Zentrifugation an Versuchstag 1 bei verschiedenen Drehzahlen. Darin ist zu erkennen, dass eine optisch sichtbare Phasentrennung für den Belebtschlamm der Teststraße bei 2.700 U/min erst bei 10 Minuten Zentrifugationsdauer beobachtet werden konnte. Bei der Probe der Referenzstraße war dies erst bei 20-minütiger Zentrifugationsdauer der Fall. An den Versuchstagen 2 und 3 (Abbildung 42 und 43) konnte bei 2.700 U/min für beide Proben keine Phasentrennung erreicht werden, so dass der volumetrische Feststoffgehalt dem Ausgangsfeststoffgehalt entspricht. Die Ergebnisse der verschiedenen Versuchstage bei 3.700 und 4.700 U/min zeigen einen ähnlichen Verlauf. Die volumetrischen Feststoffgehalte liegen in allen Fällen nah bei einander und lassen keine steigende Tendenz bei zunehmender Zentrifugationsdauer erkennen. In den meisten Fällen liegt der Wert der Teststraße höher als der Wert der Referenzstraße. An den Versuchstagen 2 und 3 ist dies dauerhaft der Fall, was jedoch in dem leicht höheren TS-Gehalt der Teststraße gründet.

Pulveraktivkohledosierung im Labor (Versuch H und I)

Anders als bei den vorangegangenen Versuchen wurden in diesen Versuchen definierte Mengen Pulveraktivkohle im Labor in den Belebtschlamm der Referenzstraße dosiert. Es wurden am ersten Versuchstag 20, 50 und 100 mg zu einem Liter Schlamm gegeben und am zweiten Versuchstag zusätzlich einmal 200 mg. Nach einer vollständigen Durchmischung wurden die Proben bei 4.700 U/min für 5 min zentrifugiert. In der nachfolgenden Abbildung 44 sind die volumetrischen Feststoffgehalte für beide Versuchstage dargestellt.

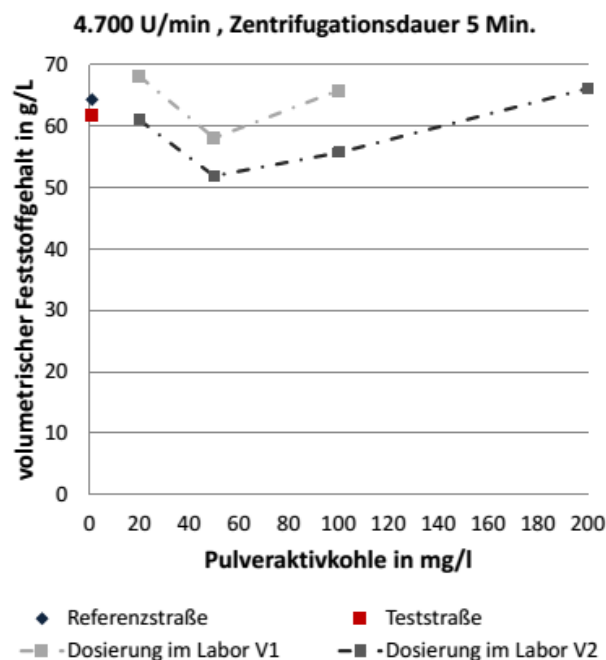


Abbildung 44: Darstellung des volumetrischen Feststoffgehaltes nach der Zentrifugation von Belebtschlamm der Referenzstraße angereichert mit definierten PAK-Mengen. Test- und Referenzstraße (undotiert) als Vergleichswert

Es ist zu erkennen, dass die Werte des volumetrischen Feststoffgehaltes einen ähnlichen Verlauf an beiden Versuchstagen aufweisen. Dabei liegen die Werte von Versuchstag zwei

etwas unter denen des ersten Versuchstages, was durch den höheren Ausgangsfeststoffgehalt von 3,1 g/L verglichen mit 2,9 g/L an Tag 2 begründet ist. Die dargestellten Vergleichswerte der Referenzstraße ohne PAK-Dosierung im Labor und der Teststraße wurden an Versuchstag 1 ermittelt. Der TS Gehalt der Teststraße betrug an diesem Tag 3,3 g/L. Die vollständigen Versuchsergebnisse sind in Anhang S und T zu finden.

4.3.2 Kapillare Fließzeit

Wie bereits erläutert, hängt das Messergebnis der kapillaren Fließzeit vom Feststoffgehalt der Schlämmprobe ab und wird aus diesem Grund als spezifischer CST/TS in $s/\%_{TS}$ angegeben. Die nachfolgende Abbildung 45 zeigt die Ergebnisse aus den CST-Analysen der einzelnen Versuche und zusätzlich zur Orientierung den Ausgangsfeststoffgehalt der Proben.

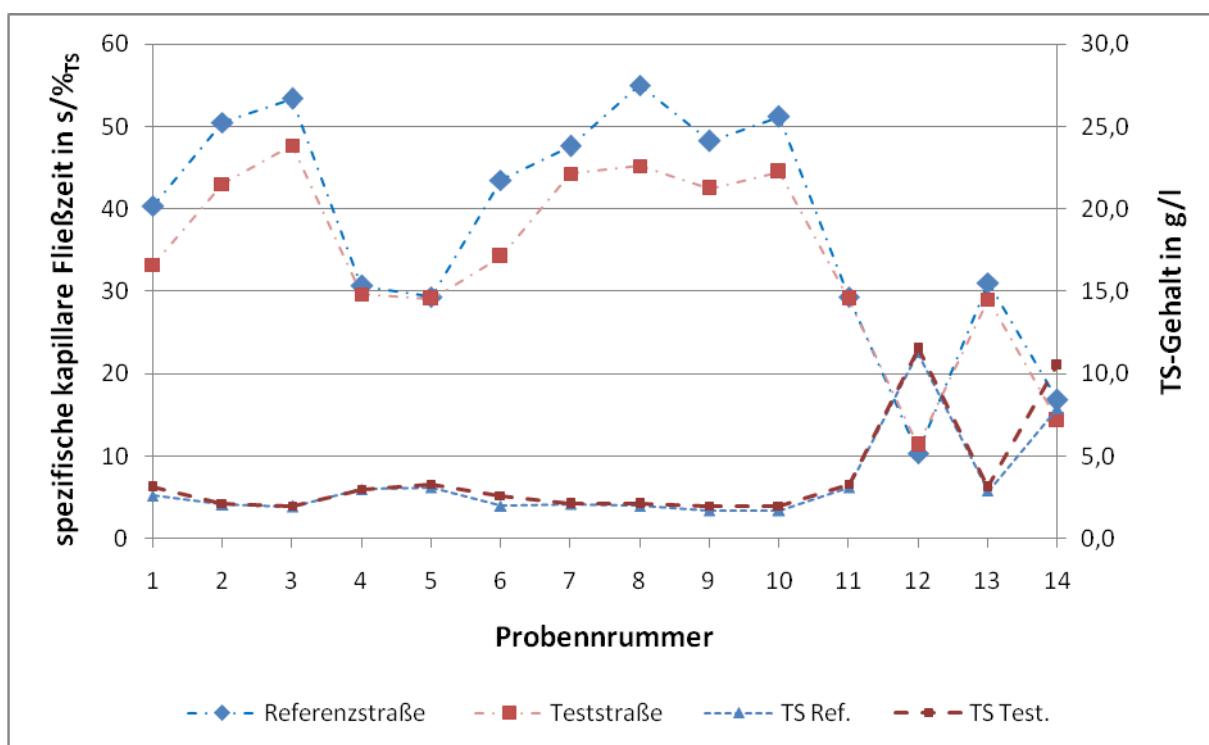


Abbildung 45: Darstellung der spezifischen kapillaren Fließzeit der einzelnen Versuche und Gegenüberstellung des TS-Gehaltes der Proben

Mithilfe der kapillaren Fließzeit wurde die Wasserabgabegeschwindigkeit der Schlämme von Test- und Referenzstraße ermittelt, welche ergänzend zu den Zentrifugationsversuchen eine qualitative Beurteilung der Entwässerungseigenschaften unterstützen sollte. Nach Bischofsberger et al. (2005) zeigen die Ergebnisse deutlich die Entwässerungseigenschaften eines gut bis mittelmäßig entwässerbaren Schlammes (Anhang U), wobei wie bereits erwähnt Ergebnisse, die bei einem TS-Gehalt $< 1\%$ erzielt wurden, nach ATV (1992) als nicht plausibel betrachtet werden. Es bleibt jedoch festzuhalten, dass die spezifische Wasserabgabefähigkeit des Schlammes mit Aktivkohle in 13 von 14 Fällen niedriger ist als die des Referenzschlammes und somit auf ein besseres Wasserabgabevermögen hindeutet.

Fazit Arbeitspaket 3

Zusammenfassend kann festgehalten werden, dass weder die Versuche mit der Laborzentrifuge noch die Untersuchungen zur kapillaren Fließzeit zu einer eindeutigen Aussage bezüglich des Einflusses von Aktivkohle auf das Entwässerungsverhalten des Belebtschlammes führten. Besonders bei den Untersuchungen mit der Laborzentrifuge ist die Anfälligkeit für Ungenauigkeiten sehr hoch. U. a. dadurch, dass der Überstand direkt nach der Zentrifugation, um ein weiteres Absetzen zu verhindern, in einen Messzylinder überführt werden muss. Bei diesem Vorgang wird der Überstand per Hand vom Schlamm getrennt, dementsprechend ist es möglich, dass durch die Art des Schüttens Einfluss auf das Entwässerungsergebnis genommen werden kann. Auch wenn dieser Vorgang immer identisch und von derselben Person durchgeführt wird, kann es dabei zu Abweichungen kommen. Die Erhöhung der zentrifugierten Schlammmenge sollte diese Fehlerquelle verringern, konnte sie jedoch nicht eliminieren. Ein weiteres großes Problem für die Interpretation der Ergebnisse stellt der Ausgangsfeststoffgehalt dar. In den oben beschriebenen Versuchen war der Ausgangs-TS-Gehalt mit 1,7 bis 3,1 g/L sehr gering, wodurch die ermittelten Entwässerungseigenschaften nicht direkt auf Großanlagen übertragbar sind. Zusätzlich war der Ausgangs-TS-Gehalt der Proben nicht immer identisch, was deutliche Auswirkungen auf das Entwässerungsergebnis hatte. Die unterschiedlichen TS-Gehalte können durch Messungenauigkeiten, Abweichungen der Sonden oder Fehler bei der Probenahme entstanden sein. Dennoch ist auch bei Proben mit sehr guten Ausgangsbedingungen keine eindeutige Auswirkung der Aktivkohledosierung auszumachen. Die Versuche deuten darauf hin, dass die Schlämme sich bei der Entwässerung nahezu identisch verhalten.

4.4 Arbeitspaket 4: Anaerobe Batchversuche

In diesem Kapitel werden die Ergebnisse der Batchversuche zum Desorptionsverhalten der ausgewählten Mikroverunreinigungen im anaeroben Milieu dargelegt. Die Versuche unterteilen sich, wie bereits unter 3.5 erläutert, in zwei Teile. Die Ergebnisse der Grundlagenversuche wurden auf der Versuchsanlage Ölbachtal des LSU durchgeführt und werden unter 4.4.1 erläutert. Unter 4.4.2 sind die Ergebnisse zu den Faulversuchen unter realen Trockenmassekonzentrationen, die in den Chemisch-Biologischen Laboratorien durchgeführt wurden, zu finden.

4.4.1 Erste anaerobe Batchversuche zum Desorptionsverhalten

Die ersten Versuche, die grundlegenden Aufschluss über die mögliche Desorption der ausgewählten Mikroverunreinigungen unter anaeroben Milieubedingungen geben sollten, wurden von September bis Dezember 2013 am LSU durchgeführt. Dabei wurden drei verschiedene Versuchseinstellungen betrieben:

Versuchsreihe 1: mesophil (36 °C), VD = 25 Tage

Versuchsreihe 2: thermophil (55 -56 °C); VD = 25 Tage

Versuchsreihe 3: mesophil (36 °C), VD = 38 Tage

Die genauen Randbedingungen der Versuchsreihen können Tabelle 27 entnommen werden.

4 Ergebnisse und Dokumentation

Für die Auswertung wurde in jeder Batchflasche die gelöste Konzentration eines jeden Stoffes in µg/l zu Versuchsbeginn und zu Versuchsende analysiert. Die rückgelöste Fracht ergab sich als Differenz zwischen Start- und Endfracht der gelöst vorliegenden Mikroverunreinigungen. Die prozentuale Rücklösung eines Stoffes wurde ermittelt, indem die rückgelöste Fracht auf die zu Versuchsbeginn an den Belebtschlamm bzw. das Belebtschlamm-Aktivkohle-Gemisch gebundene Fracht der jeweiligen Mikroverunreinigungen bezogen wurde. Zusätzlich zu den Konzentrationen der Mikroverunreinigungen wurden die Standardparameter pH-Wert, DOC-Gehalt, TS-Gehalt und Glühverlust gemessen. Die Analyseergebnisse dieser Parameter sind in Tabelle 27 dargestellt.

Tabelle 27: Zusammenfassung der untersuchten Standardparameter im Verlauf der anaeroben Batchversuche

		Versuchsreihe 1			Versuchsreihe 2			Versuchsreihe 3				
		Startwert	Endwert	End-MW	Startwert	Endwert	End-MW	Startwert	Endwert	End-MW		
pH-Wert [-]	Blindversuch	7,3	6,5	6,5	7,0	7,1	7,1	7,1	7,0	7,0		
			6,5			7,1			7,0			
			6,5			7,1			7,0			
	Fällmittelzugabe	6,8	6,5	6,5	6,9	7,1	7,1	6,9	6,7	6,7		
						6,5			7,1		6,7	
						6,5			7,1		6,7	
	erhöhter DOC	8,2	6,4	6,5	7,2	7,1	7,1	7,0	7,1	7,1		
						6,6			7,1		7,1	
						6,4			7,1		7,0	
DOC-Gehalt [mgDOC/L]	Blindversuch	36	74	74	65	366	359	52	195	192		
			83			396			197			
			65			315			184			
	Fällmittelzugabe	39	155	155	65	283	234	58	197	204		
						150			231		224	
						160			187		191	
	erhöhter DOC	236	190	160	265	220	194	252	176	175		
						120			194		177	
						170			167		172	
TS-Gehalt [gTS/L]	Blindversuch	6,9	4,8	4,9	13,5	9,8	9,5	6,4	4,4	4,5		
			5,1			9,2			4,5			
			4,9			9,4			4,5			
	Fällmittelzugabe	9,1	6,5	6,7	14,4	9,8	9,7	6	4,5	4,6		
						6,6			9,7		4,8	
						7,0			9,5		4,6	
	erhöhter DOC	6,9	4,7	4,6	13,0	9,8	9,8	6,6	4,4	4,5		
						4,6			9,9		4,6	
						4,6			9,6		4,6	
Glühverlust [%]	Blindversuch	-	-	-	-	-	-	81	75	74,7		
			-			-			74			
			-			-			75			
	Fällmittelzugabe	-	-	-	-	-	-	88	72	73,0		
									-		-	73
									-		-	74
	erhöhter DOC	-	-	-	-	-	-	82	74	74,7		
									-		-	75
									-		-	75

In den nachfolgenden Abbildungen werden die gelösten Konzentrationen der untersuchten Stoffe Benzotriazol, Carbamazepin, Diclofenac, Metoprolol und Sulfamethoxazol zu Versuchsbeginn (Start) und zu Versuchsende (Ende) gegenübergestellt. Bei den dargestellten

Endwerten handelt es sich in diesem Fall um die Mittelwerte aus den Dreifachansätzen. Die Fehlerbalken stellen hierbei die Spannungsbreite der Ergebnisse dar, die im jeweiligen Dreifachansatz ermittelt wurden. Die einzelnen Ergebnisse sind in Anhang V dargestellt.

Versuchsreihe 1

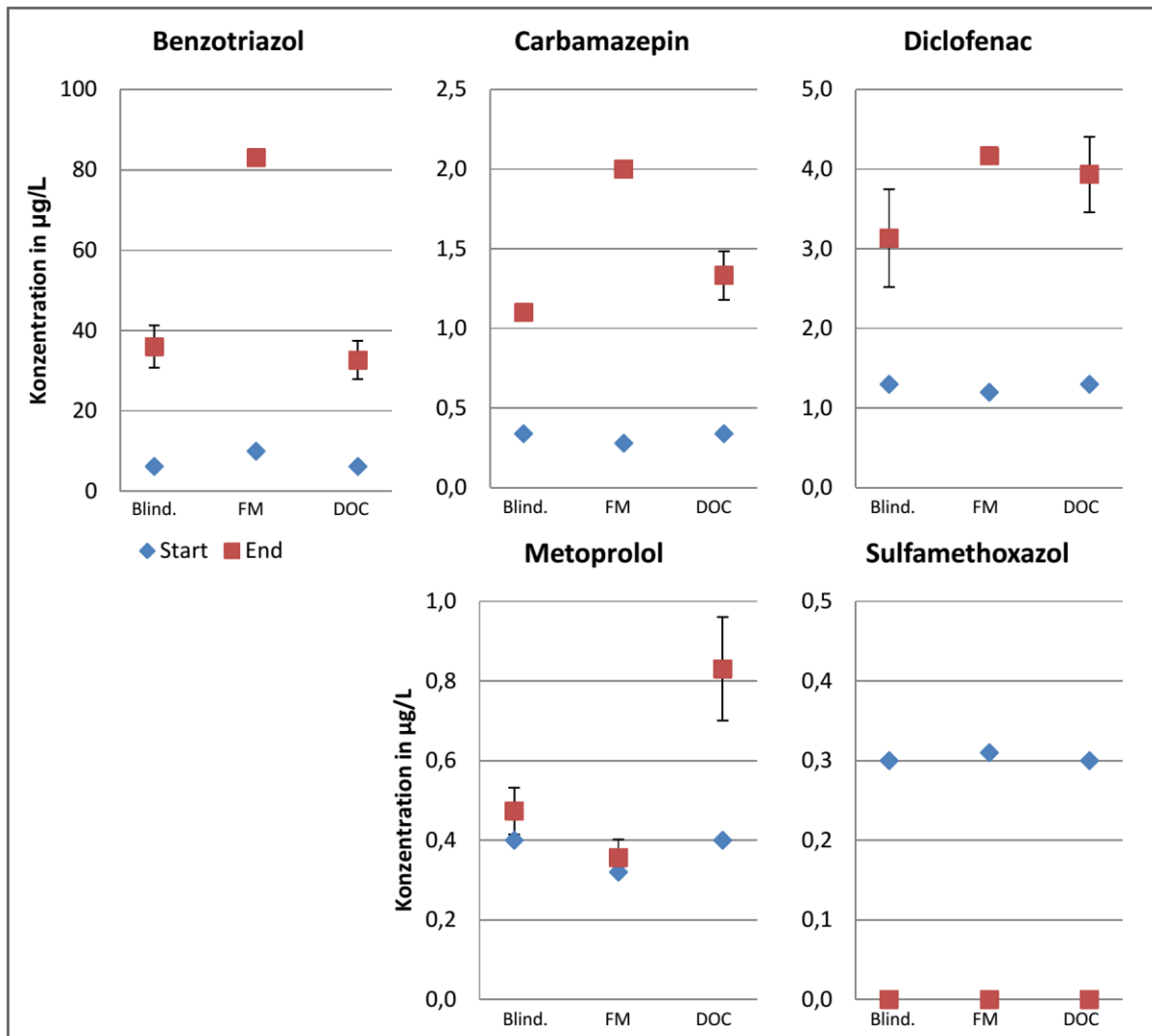


Abbildung 46: Gegenüberstellung der Start- und Endkonzentrationen der Mikroverunreinigungen Benzotriazol, Carbamazepin, Diclofenac, Metoprolol und Sulfamethoxazol aus den anaeroben Batchversuche der Versuchsreihe 1 (mesophil: 36 °C, VD = 25 Tage). Die Start- und Endkonzentrationen dürfen nicht absolut betrachtet werden, die Rücklösung hängt vielmehr von der Menge der in die Batchreaktoren zugeführten Schlammmenge ab. Ein direkter Rückschluss auf Konzentrationen im Kläranlagenbetrieb ist nicht zu ziehen.

In Abbildung 46 ist zu erkennen, dass die Startwerte der Konzentrationen aller untersuchten, gelöst vorliegenden Mikroverunreinigungen außer Sulfamethoxazol geringer sind als die entsprechenden Endwerte nach 25 Tagen Versuchsdauer unter mesophilen Bedingungen. Die gemessenen Konzentrationen von Benzotriazol erhöhten sich in den Versuchen von 6,2 bis 10 µg/L auf Werte zwischen 33 und 83 µg/L. Bei Carbamazepin konnte ebenfalls eine Erhöhung festgestellt werden. Während die Konzentration des Carbamazepins in der gelösten

Phase zu Versuchsbeginn in allen Flaschen unter $0,35 \mu\text{g/L}$ lag, betrug sie zu Versuchsende überall mehr als $1 \mu\text{g/L}$ und in den Versuchen mit Ferrifloczugabe $2,0 \mu\text{g/L}$. Ein ähnliches Bild ergab sich für Diclofenac, dessen Ausgangskonzentration zwischen $1,2$ und $1,3 \mu\text{g/L}$ lag und sich zum Ende der Versuchsreihe auf Werte zwischen $3,1$ und $4,2 \mu\text{g/L}$ erhöht hatte. Die Start- und Endkonzentrationen dürfen nicht absolut betrachtet werden, die Rücklösung hängt vielmehr von der Menge der in die Batchreaktoren zugeführten Schlammmenge ab. Ein direkter Rückschluss auf Konzentrationen im Kläranlagenbetrieb ist nicht zu ziehen.

Für Metoprolol ergaben sich zwar zu Versuchsende ebenfalls erhöhte Konzentrationen, jedoch handelt es sich dabei fast ausschließlich um so geringe Differenzen, dass dabei von Messungenauigkeiten ausgegangen werden kann. Der einzige Stoff, der ein komplett anderes Verhalten zeigt, ist Sulfamethoxazol. In diesem Fall wurde die Endkonzentration nicht erhöht, sondern es war nach 25 Tagen kein Sulfamethoxazol in der gelösten Phase mehr nachweisbar. Ein nahezu vollständiger Abbau von Sulfamethoxazol unter anaeroben Bedingungen wurde bereits von Carballa et al. (2006) beschrieben. Die Konzentrationen von Benzotriazol, Carbamazepin und Diclofenac sind jeweils bei den Versuchen mit Ferrifloc-Dosierung am stärksten angestiegen, während für Metoprolol ausschließlich bei dem Versuch mit erhöhter DOC-Belastung eine relevante Konzentrationserhöhung festgestellt werden konnte.

Versuchsreihe 2

Diese Versuchsreihe wurde identisch zur Versuchsreihe 1 jedoch bei Temperaturen zwischen 55 und $56 \text{ }^\circ\text{C}$ durchgeführt. Zusätzlich ergaben sich aufgrund eines längeren Absetzprozesses höhere Ausgangswerte für den TS-Gehalt der einzelnen Batchflaschen (Tabelle 27).

Die Ergebnisse dieser Versuchsreihe bestätigen zum großen Teil die vorherigen Ergebnisse (Abbildung 47). Carbamazepin und Diclofenac liegen zu Versuchsende in erhöhten Konzentrationen vor. Die Konzentration von Carbamazepin erhöhte sich auf das $4,5$ und $5,4 \mu\text{g/L}$. Die Endkonzentration von Diclofenac wurde zu 11 bis $17 \mu\text{g/L}$ ermittelt. Für Metoprolol ist unter thermophilen Bedingungen ebenfalls eine Konzentrationserhöhung der gelösten Fraktion erkennbar. Die Werte stiegen auf Werte zwischen $3,1$ und $4,2 \mu\text{g/L}$, wobei die deutlichste Erhöhung im Falle von Metoprolol wieder für die Versuche mit erhöhter DOC-Belastung ermittelt wurde. Wie bereits in Versuchsreihe 1 zu erkennen ist, konnte Sulfamethoxazol nach einer Versuchsdauer von 25 Tagen auch unter thermophilen Bedingungen nicht mehr nachgewiesen werden. Ein deutlicher Unterschied im Vergleich zur ersten Versuchsreihe ergab sich bei dem Verhalten von Benzotriazol. Hier war eine Konzentrationserhöhung zu Versuchsende kaum noch feststellbar. Bei einer Startkonzentration von $42 \mu\text{g/L}$ wurden Endwerte zwischen $45,3$ und $55,7 \mu\text{g/L}$ gemessen, was einer Erhöhung von maximal 33% entspricht und verglichen mit den Ergebnissen der mesophilen Versuche sehr gering ist. Die Einzelergebnisse einer jeden Batchflasche dieser Versuchsreihe sind in Anhang W dargestellt.

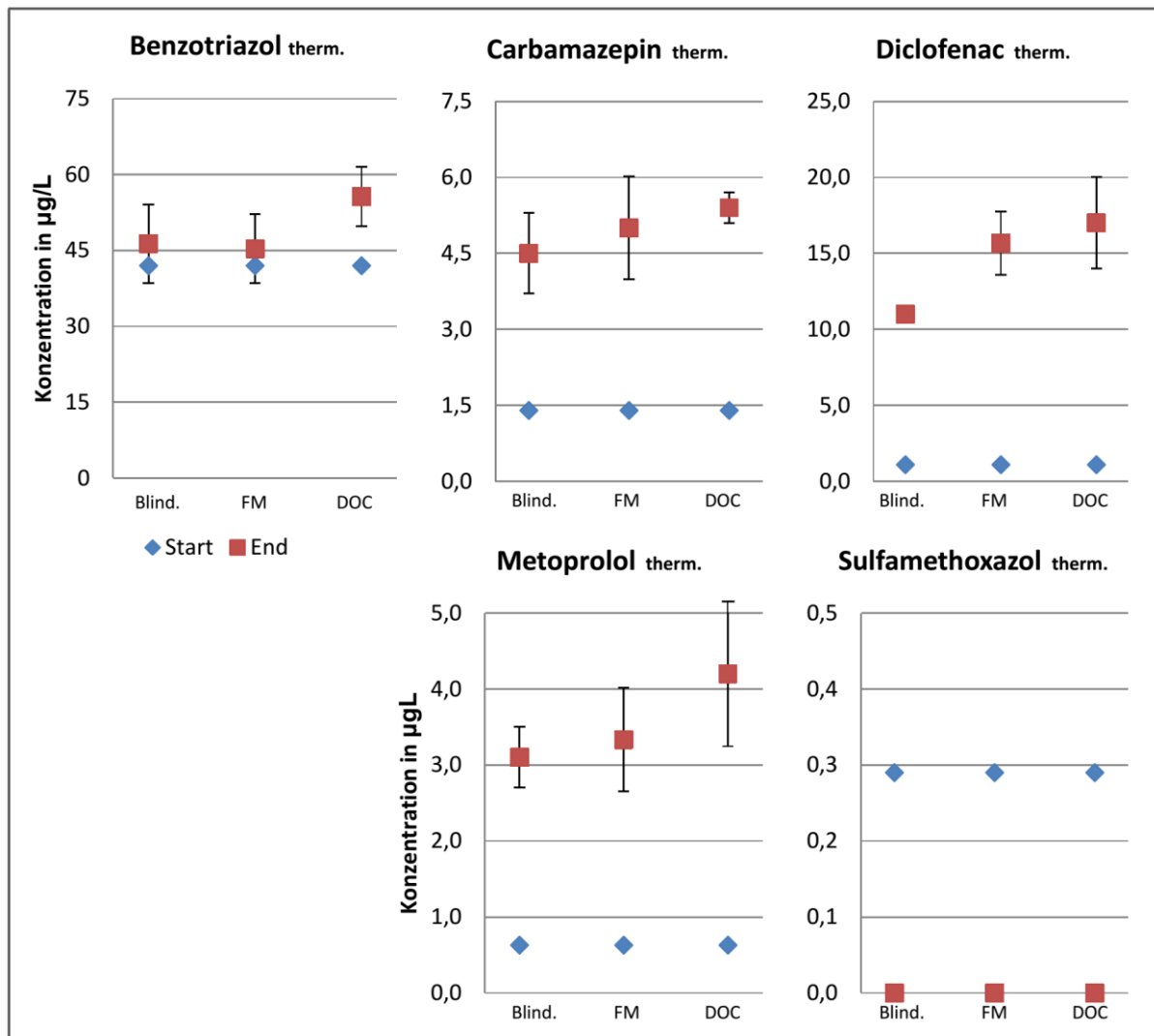


Abbildung 47: Gegenüberstellung der Start- und Endkonzentrationen der Mikroverunreinigungen Benzotriazol, Carbamazepin, Diclofenac, Metoprolol und Sulfamethoxazol aus den anaeroben Batchversuche der Versuchsreihe 2 (thermophil: 55 - 56 °C, VD = 25 Tage). Die Start- und Endkonzentrationen dürfen nicht absolut betrachtet werden, die Rücklösung hängt vielmehr von der Menge der in die Batchreaktoren zugeführten Schlammmenge ab. Ein direkter Rückschluss auf Konzentrationen im Kläranlagenbetrieb ist nicht zu ziehen.

Zusammenfassend kann festgestellt werden, dass in dieser Versuchsreihe deutlich höhere Ausgangskonzentrationen aller Stoffe bis auf Sulfamethoxazol in der gelösten Phase vorlagen. Zusätzlich ist zu erkennen, dass die Schwankungsbreite der Endkonzentrationen unter thermophilen Bedingungen höher zu sein scheint als unter mesophilen. Unterschiede durch Fällmittel- oder Glucosezugabe waren nicht signifikant; die Tendenzen aus Versuchsreihe 1 konnten hier auch nicht bestätigt werden.

Versuchsreihe 3

In dieser Versuchsreihe wurden die Batchversuche wieder unter mesophilen Bedingungen bei 36 °C durchgeführt. Es wurde jedoch die Versuchsdauer auf 39 Tage verlängert. Neun Tage wurden dabei als Inokulationszeit definiert, so dass sich eine Aufenthaltszeit unter an-

aeroben Bedingungen von 30 Tagen ergab, was einer typischen Aufenthaltszeit des Schlammes im Faulturm des Klärwerks Düsseldorf-Süd entspricht.

Die Ergebnisse aus Versuchsreihe 3 sind in Abbildung 48 dargestellt und bestätigen die Befunde aus Versuchsreihe 1. Es ist für alle Stoffe bis auf Sulfamethoxazol wieder eine deutliche Konzentrationssteigerung in der wässrigen Phase erkennbar. Die einzelnen Ergebnisse der Batchflaschen dieser Versuchsreihe sind in Anhang X dargestellt.

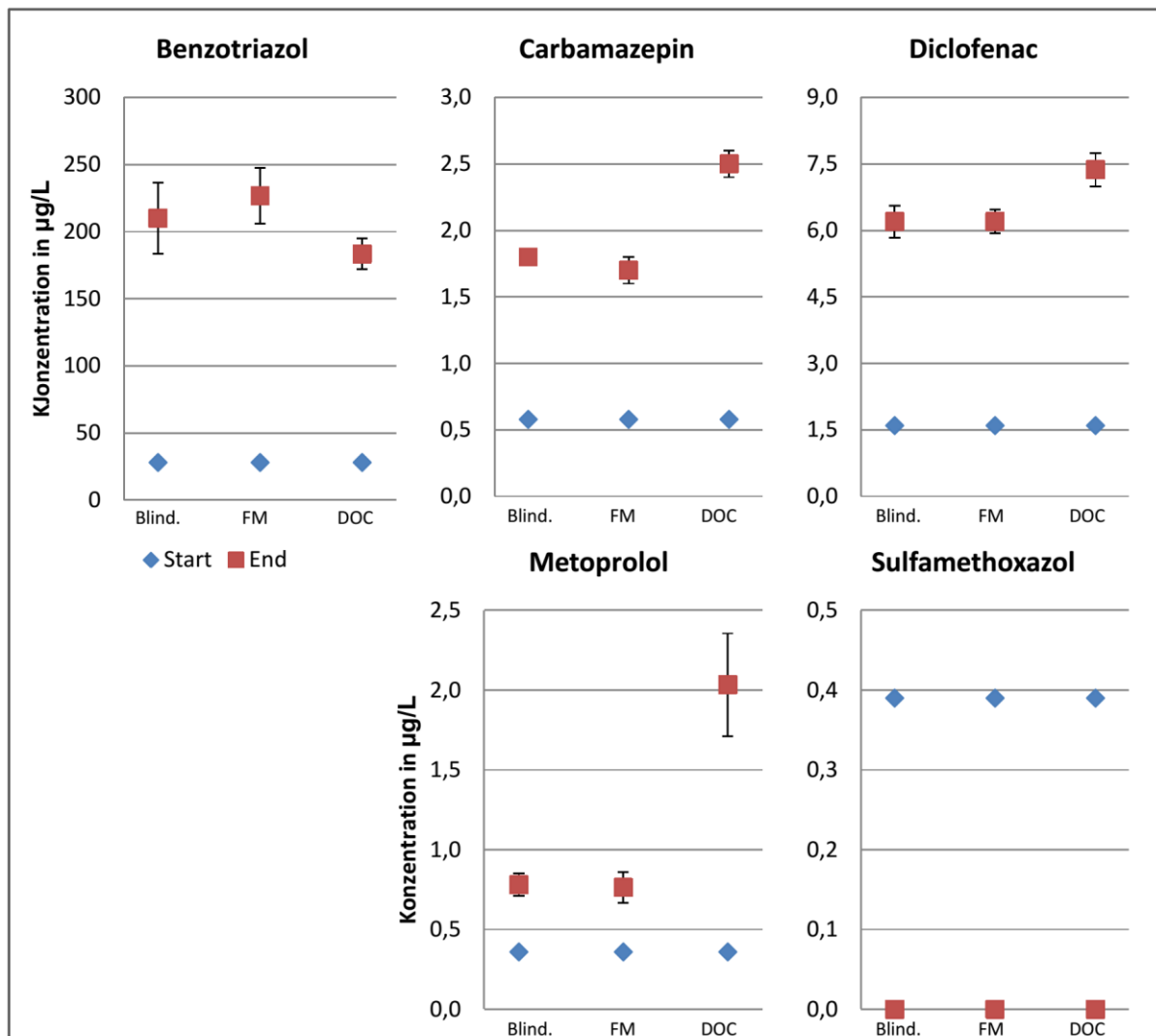


Abbildung 48: Gegenüberstellung der Start- und Endkonzentrationen der Mikroverunreinigungen Benzotriazol, Carbamazepin, Diclofenac, Metoprolol und Sulfamethoxazol aus den anaeroben Batchversuche der Versuchsreihe 3 (mesophil: 36 °C, VD = 38 Tage). Die Start- und Endkonzentrationen dürfen nicht absolut betrachtet werden, die Rücklösung hängt vielmehr von der Menge der in die Batchreaktoren zugeführten Schlammmenge ab. Ein direkter Rückschluss auf Konzentrationen im Kläranlagenbetrieb ist nicht zu ziehen.

Sulfamethoxazol ist, wie schon in den beiden vorangegangenen Versuchsreihen, zu Versuchsende nicht mehr nachweisbar. Die Konzentration von Benzotriazol erhöht sich in den verschiedenen Versuchen. Carbamazepin und Diclofenac verhielten sich ähnlich und zeigten zu Versuchsende eine gelöste Konzentration, die das 2,9- bis 4-fache (Carbamazepin) bzw. das 3,9- bis 5-fache der Startkonzentration betrug. Die Startkonzentration von Carbamazepin

lag dabei mit $0,58 \mu\text{g/L}$ wie auch schon in den vorherigen Versuchen unter der von Diclofenac, dessen Konzentration diesmal zu $1,6 \mu\text{g/L}$ bestimmt wurde. Für Metoprolol bestätigte sich der Trend des letzten Versuches.

Des Weiteren konnte auch in dieser Versuchsreihe kein deutlicher Trend für die Zugabe von DOC oder Fällmittel erkannt werden.

Fazit Arbeitspaket 4 – Teil I

Zusammenfassend kann festgehalten werden, dass in der wässrigen Phase die Konzentrationen der Mikroverunreinigungen Benzotriazol, Carbamazepin, Diclofenac und Metoprolol im Belebtschlamm durch Aufenthalt im anaeroben Milieu anstiegen. Gründe hierfür können in der Freisetzung der an den Schlamm adsorbierten Stoffe bedingt durch die Hydrolyse der Biomasse oder auch in einer Desorption der Stoffe von der Aktivkohleoberfläche liegen. Die Bewertung der Rücklösung gestaltet sich schwierig, da keine genauen Informationen über das Rücklöseverhalten durch die Hydrolyse vorliegen. Zu diesem Zweck wurden im zweiten Teil dieses Arbeitspaketes parallel Untersuchungen mit dem Belebtschlamm der Referenzstraße durchgeführt. Im Gegensatz zu den anderen Stoffen wird das Antibiotikum Sulfamethoxazol unter anaeroben Bedingungen abgebaut oder umgewandelt und ist in den Endproben nicht mehr nachweisbar.

Die Temperatur scheint bei den Konzentrationsveränderungen der Stoffe eine Rolle zu spielen. Die prozentuale Rücklösung von Carbamazepin, Diclofenac und Metoprolol ist unter thermophilen Bedingungen zum Teil deutlich erhöht verglichen mit den Ergebnissen aus den mesophilen Versuchsreihen. Für Benzotriazol ergab sich im thermophilen Temperaturbereich hingegen nahezu keine Rücklösung während die mesophilen Versuche einen deutlichen Anstieg der Konzentration von Benzotriazol in der Flüssigphase zeigten.

Durch den Einsatz des Fällmittels Ferrifloc konnte kein direkter Einfluss auf das Verhalten der Mikroverunreinigungen im anaeroben Milieu nachgewiesen werden. Lediglich für Diclofenac liegt die prozentuale Rücklösung in den Versuchen mit Ferrifloc stets über den Werten der Blindproben. Ähnlich verhielt es sich mit der Zugabe von Glucose zur Erhöhung der DOC-Belastung. Einzig und allein Metoprolol zeigte in allen Versuchen durchweg die stärkste Konzentrationserhöhung für die Versuche mit Glucosezugabe. Betrachtet man die prozentuale Rücklösung, so ist dieser Wert für Diclofenac ebenfalls für die Versuche mit Glucosezugabe am höchsten. Wie dieser Effekt zustande kommt ist bisher unklar, so dass zu dieser Fragestellung weitere Untersuchungen erforderlich sind.

Als letzte Fragestellung wurde untersucht, wie sich eine längere Aufenthaltszeit auf das Verhalten der Mikroverunreinigungen im anaeroben Milieu auswirkt. Für die Stoffe Benzotriazol, Carbamazepin und Metoprolol ist kein Einfluss durch die Verlängerung der Aufenthaltszeit feststellbar. Für Diclofenac ist die prozentuale Rücklösung in Versuchsreihe 3 jedoch deutlich höher als in Versuchsreihe 1, was darauf hindeutet, dass eine längere Dauer des

Schlammverbleibs im Faulturm eine erhöhte Diclofenac-Konzentration in der Wasserphase des ausgefaulten Schlammes zur Folge hat.

4.4.2 Ergebnisse der Versuche unter realen Trockenmassekonzentrationen

Die Ergebnisse der Begleituntersuchungen zu den anaeroben Batchversuchen zum Desorptionsverhalten, die unter den unter 3.5 beschriebenen Bedingungen gewonnen wurden, werden im Folgenden zusammengestellt:

Insgesamt wurden drei Parallelansätze, jeweils aus dem Schlamm der halbtechnischen Kontrollanlage und der halbtechnischen Testanlage, durchgeführt.

Die Belebtschlammmentnahme erfolgte zum Ende der PAK-Dosierung im Januar 2014 am 23.01.2014, 30.01.2014 und am 03.02.2014, so dass die PAK-Konzentration im Belebtschlamm entsprechend der PAK-Dosierung von $20 \text{ g}_{\text{PAK}}/\text{m}^3$ Zulauf im Gleichgewicht zur Überschussschlammmentnahme stand.

Im Einzelnen wurden die folgenden Begleitparameter untersucht, die eine weitgehende Ausfäulung der Testansätze dokumentieren und damit die realen Bedingungen in einem Faulturm widerspiegeln (Tabelle 28 bis 30). Im Unterschied zur Praxis auf dem Klärwerk Düsseldorf-Süd wurden zur Phosphatelimination und zur Optimierung der Entwässerbarkeit keine Metallsalzlösungen eingesetzt und der Primärschlamm in den Batchversuchen nicht betrachtet, womit der hohe Glühverlust erklärbar ist. In der Regel beträgt auf dem Klärwerk Düsseldorf-Süd der Glühverlust des Gesamtrohschlammes etwa 74 % (Jahresmittelwert 2013) und im ausgefaulten Schlamm etwa 60 % (Jahresmittelwert 2013). Der Rückgang des Glühverlustes um etwa 14-%-Punkte während der Ausfäulung wird in den Batchversuchen jedoch gut abgebildet, so dass die realen Bedingungen gut wiedergegeben wurden.

Tabelle 28: Faulschlammcharakterisierung des 1. anaeroben Batchversuches am 23.01.2014

Datum Beginn 1. Versuch	LIMS-Nr.:	TR [%]	GV [%]	Datum Ende	LIMS-Nr.:	TR [%]	GV [%]
23.01.2014 Kontrollschlamm ohne PAK	P-1400789	2,45	83,21	06.03.2014	P-1402050	1,55	70,77
23.01.2014 Testschlamm mit PAK	P-1400788	2,71	82,15	06.03.2014	P-1402052	1,64	69,61

Im ersten Batchversuch betrug die Inkubationszeit insgesamt 43 Tage, wovon neun Tage als Vorinkubation angesetzt wurden. Insgesamt sind in dieser Zeit 3971 bis 4200 mL Faulgas pro 500-mL-Faulschlammansatz gebildet worden. Die Faulgasbildungskurve nach Abschluss der Vorinkubation ist typisch (Abbildung 4.4.1). Der Glühverlust in der Kontrolle wurde um 13,1 % und im Testansatz um 12,5 % gesenkt.

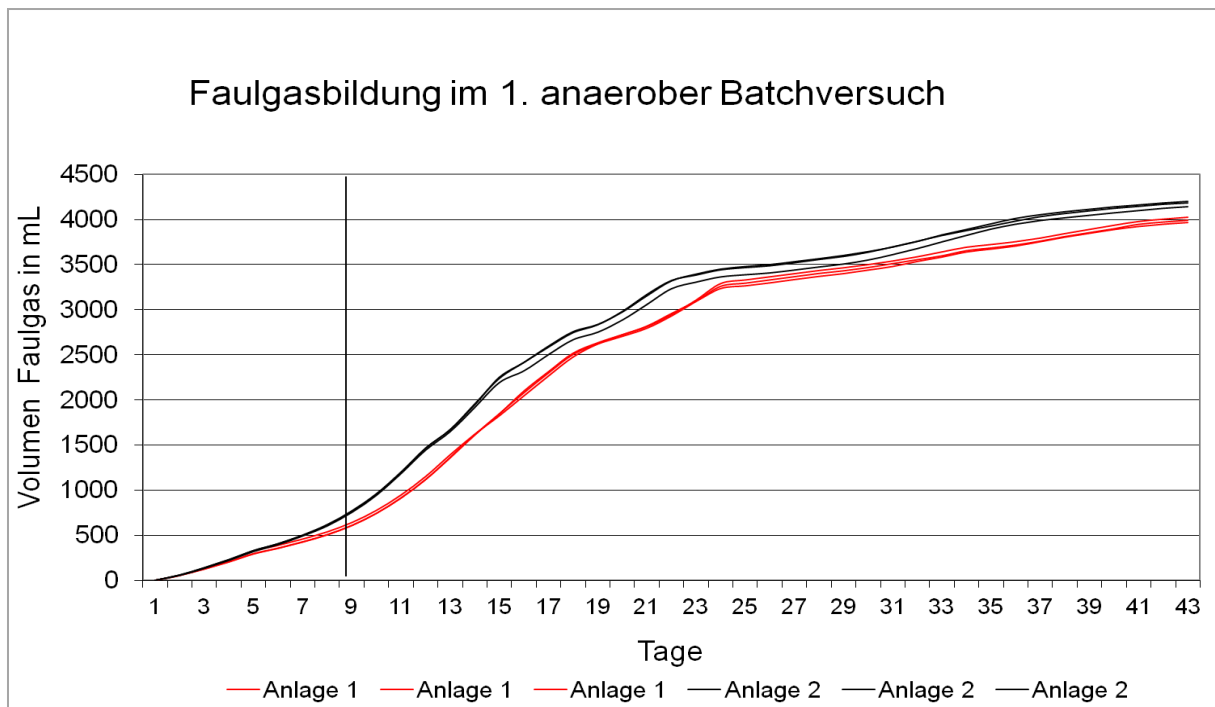


Abbildung 49: Faulgasbildungskurve zum Versuch 1

Mit den unter 3.6 bereits genannten Daten wurde auch für diesen Versuch eine Abschätzung vorgenommen, wie hoch der Anteil in die Prozesswässer rückgelöster Spurenstoffe ist. Darüber hinaus wurde versucht eine geschlossene Bilanz über den Verbleib der Spurenstoffe zu erstellen. Dazu wird von einer mittleren Überschussschlammernahme von 4 kg/d ausgegangen. Dieser Überschussschlamm mit einem TS von etwa 3 g/L wurde bei Versuchen in den Chemisch-Biologischen Laboratorien über Zentrifugation auf einen Trockenrückstand von ca. 2,4 bis 2,7 % eingedickt, um den Prozess der Voreindickung, wie er auf Kläranlagen vor der Aufgabe in den Faulturm stattfindet, abzubilden. Von den 4 kg entnommenen Überschussschlammes werden somit ca. 3,6 L Prozesswasser in den Klärprozess zurückgeführt und ca. 400 g eingedickter Schlamm in die Faulung überführt.

In den Wässern und Schlämmen aus Test- und Kontrollanlage wurden vor und nach der Faulung für die fünf untersuchten Spurenstoffe die in der folgenden Tabelle aufgeführten Konzentrationen bestimmt:

Tabelle 29: Faulversuch CBL 1

Faulversuch CBL 1		TR [%]	Benzo- triazol	Carba- mazepin	Diclofenac	Metoprolol	Sulfame- thoxazol
Testanlage Start							
C Wasserphase	[µg/L]		5,00	0,81	1,50	0,83	0,34
C Schlammphase	[ng/gTS]	2,7	21.000	630	580	3.600	110
Testanlage Ende							
C Wasserphase	[µg/L]		93		13		< 0,05
C Schlammphase	[ng/gTS]	1,6	2.100	180	280	460	<50
Kontrollanlage Start							
C Wasserphase	[µg/L]		5,1	1,4	2,2	2,1	0,53
C Schlammphase	[ng/gTS]	2,5	610	< 10	< 10	20	< 10
Kontrollanlage Ende							
C Wasserphase	[µg/L]		19		6,8		< 0,05
C Schlammphase	[ng/gTS]	1,6	660	< 50	n.b.	< 50	< 50

Tabelle 30: Faulschlammcharakterisierung des 2. anaeroben Batchversuch am 30.01.2014

Datum Beginn 2. Versuch	LIMS-Nr.:	TR [%]	GV [%]	Datum Ende	LIMS-Nr.:	TR [%]	GV [%]
30.01.2014 Kontrollschlamm ohne PAK	P-1400969	2,26	82,88	06.03.2014	P-1402051	1,46	72,28
30.01.2014 Testschlamm mit PAK	P-1400970	2,55	82,11	06.03.2014	P-1402053	1,62	74,71

Im zweiten Batchversuch betrug die Inkubationszeit insgesamt 36 Tage, wovon neun Tage als Vorinkubation deklariert wurden. Insgesamt sind in dieser Zeit 3.056 bis 3.545 mL Faulgas pro 500 mL-Faulschlammansatz gebildet worden. Die Faulgasbildungskurve nach Abschluss der Vorinkubation ist typisch (Abbildung 50). Der Glühverlust in der Kontrolle wurde um 10,6 % und im Testansatz um 7,4 % gesenkt.

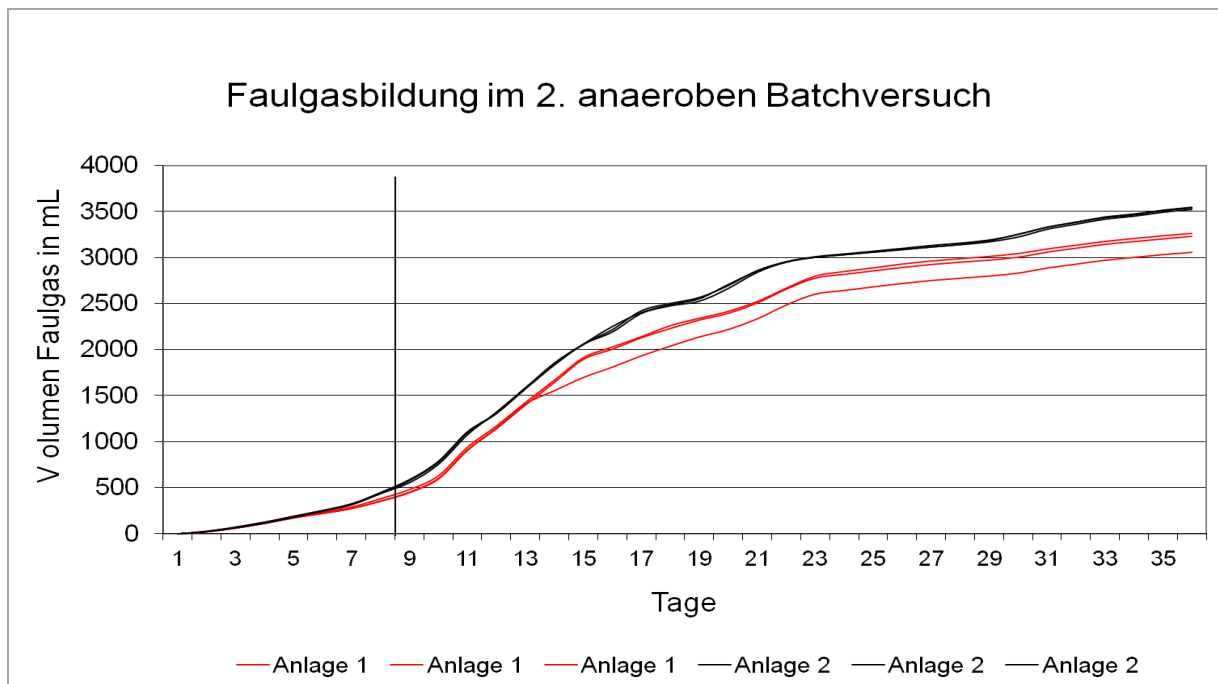


Abbildung 50: Faulgasbildungskurve zum Versuch 2

Tabelle 31: Faulschlammcharakterisierung des 3. anaeroben Batchversuch am 03.02.2014

Datum Beginn 3. Versuch	LIMS-Nr.:	TR [%]	GV [%]	Datum Ende	LIMS-Nr.:	TR [%]	GV [%]
03.02.2014 Kontrollschlamm ohne PAK	P-1401097	2,41	83,23	12.03.2014	P-1402196	1,55	72,14
03.02.2014 Testschlamm mit PAK	P-1401098	2,67	82,99	12.03.2014	P-1402197	1,73	72,11

Mit den bereits genannten Daten wurde auch für diesen Versuch eine Abschätzung vorgenommen, wie hoch der Anteil in die Prozesswässer rückgelöster Spurenstoffe ist und versucht eine geschlossene Bilanz über den Verbleib der Spurenstoffe zu erstellen.

In den Wässern und Schlämmen aus Test- und Kontrollanlage wurden vor und nach der Faulung für die fünf untersuchten Spurenstoffe die in der folgenden Tabelle aufgeführten Konzentrationen bestimmt:

Tabelle 32: Faulversuch CBL 2

Faulversuch CBL 2		TR [%]	Benzo- triazol	Carba- mazepin	Diclo- fenac	Meto- prolol	Sulfame- thoxazol
Testanlage Start							
C Wasserphase	[µg/L]		19	0,64	1,0	0,38	0,12
C Schlammphase	[ng/gTS]	2,6	31.000	670	1.100	1.200	170
Testanlage Ende							
C Wasserphase	[µg/L]		410	2,8	22	1,7	< 0,05
C Schlammphase	[ng/gTS]	1,6	100.000	2.500	5.100	6.100	< 50
Kontrollanlage Start							
C Wasserphase	[µg/L]		16	1,2	1,5	0,47	0,27
C Schlammphase	[ng/gTS]	2,3	1.700	20	200	24	24
Kontrollanlage Ende							
C Wasserphase	[µg/L]		120	4,2	19	2,8	< 0,05
C Schlammphase	[ng/gTS]	1,5	9.500	880	2.800	1.800	< 50

Im dritten Batchversuch betrug die Inkubationszeit insgesamt 38 Tage, wovon neun Tage als Vorinkubation deklariert wurden. Insgesamt sind in dieser Zeit 3762 bis 4084 ml Faulgas pro 500ml-Faulschlammansatz gebildet worden. Die Faulgasbildungskurve nach Abschluss der Vorinkubation ist typisch (Abbildung 51). Der Glühverlust wurde in Referenz- und Kontrollansatz um 11 % gesenkt.

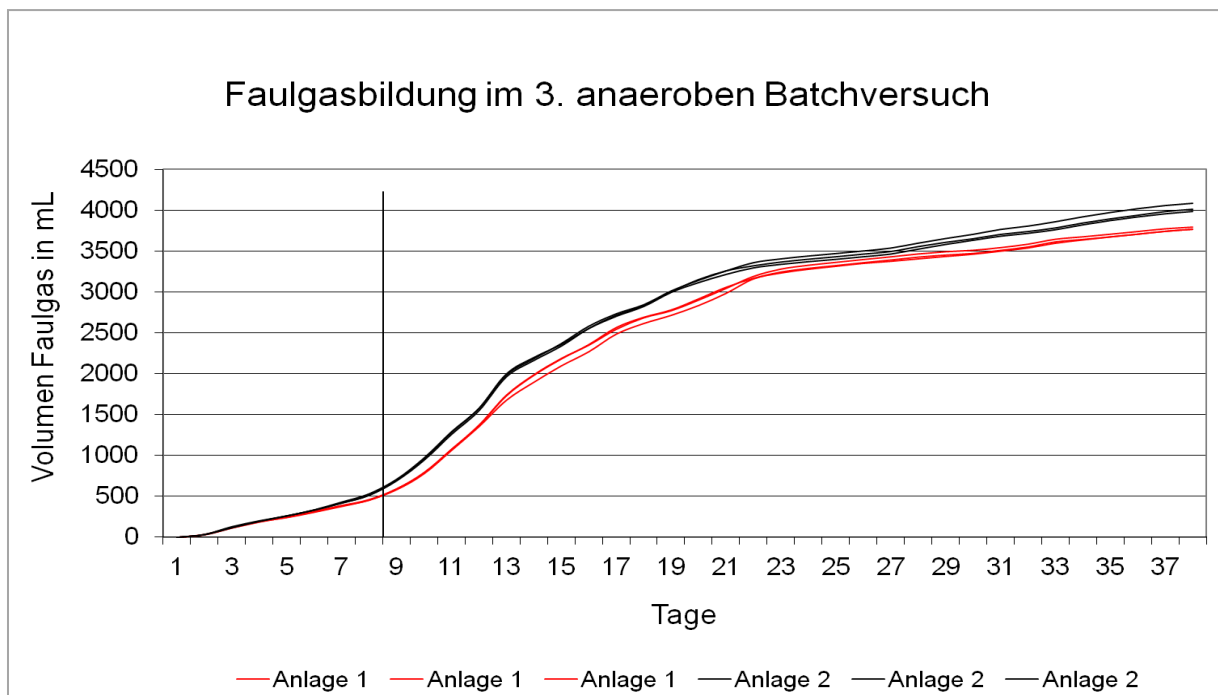


Abbildung 51: Faulgasbildungskurve zum Versuch 3

Vergleich der Faulgasausbeute zwischen dem Sekundärschlamm der Kontroll- und Testanlage (Tabelle 33):

Tabelle 33: Vergleich der Faulgasausbeuten zwischen den Sekundärschlämmen mit und ohne PAK

Faulversuch:	Belebtschlamm aus der Kontrollanlage: Faulgasausbeute [mL Faulgas/1%TR * n Tage]	Belebtschlamm aus der Testanlage: Faulgasausbeute [mL Faulgas/1%TR * n Tage]
1	1630 n. 43 Tagen	1541 n. 43 Tagen
2	1409 n. 36 Tagen	1386 n. 36 Tagen
3	1566 n. 38 Tagen	1507 n. 38 Tagen
Mittelwert:	1535	1478

Wiederum wurde mit den bekannten Daten auch für diesen Versuch eine Abschätzung vorgenommen, wie hoch der Anteil in die Prozesswässer rückgelöster Spurenstoffe ist und versucht eine geschlossene Bilanz über den Verbleib der Spurenstoffe zu erstellen.

In den Wässern und Schlämmen aus Test- und Kontrollanlage wurden vor und nach der Faulung für die fünf untersuchten Spurenstoffe die in der folgenden Tabelle aufgeführten Konzentrationen bestimmt:

Tabelle 34: Faulversuch CBL 3

Faulversuch CBL 3	TR [%]	Benzo-triazol	Carbamazepin	Diclofenac	Metoprolol	Sulfamethoxazol	
Testanlage Start							
C Wasserphase	[µg/L]	28	0,67	2,5	0,80	0,47	
C Schlammphase	[ng/gTS]	2,7	110.000	2.700	2.600	5.300	870
Testanlage Ende							
C Wasserphase	[µg/L]	440	3,6	27	2,2	< 0,05	
C Schlammphase	[ng/gTS]	1,7	35.000	1.300	3.300	3.800	< 50
Kontrollanlage Start							
C Wasserphase	[µg/L]	19	0,88	2,6	1,5	0,57	
C Schlammphase	[ng/gTS]	2,4	1.700	67	830	81	< 50
Kontrollanlage Ende							
C Wasserphase	[µg/L]	40	1,1	5,4	1,7	< 0,05	
C Schlammphase	[ng/gTS]	1,6	1.400	130	n.b.	310	< 50

Fazit Arbeitspaket 4 – Teil II

Zusammenfassend für die Ergebnisse der anaeroben Batchversuche können folgende Aussagen getroffen werden:

- Ein über alle Versuche übereinstimmendes quantitatives Ergebnis zur Rücklösung im Verlauf des Faulprozesses konnte für keinen der betrachteten Spurenstoffe gefunden werden; lediglich für Sulfamethoxazol gibt es Hinweise auf einen vollständigen Abbau und/oder eine vollständige Metabolisierung, da dieses (wie in Teil I) in allen Proben der Testanlage nach Ausfäulung < BG bestimmt wurde.
- Die gelösten Konzentration der Stoffe Benzotriazol, Diclofenac, Carbamazepin bestätigen in allen auswertbaren Versuchen die Ergebnisse aus Teil I und betragen zum Ende aller Batchversuch mit Belebtschlamm der Teststraße höhere Werte als zu Versuchsbeginn.
- Metoprolol weist übereinstimmend mit Teil I sehr geringe Konzentrationserhöhungen auf.
- Die Batchversuche mit Schlamm der Referenzstraße weisen ebenfalls Konzentrationserhöhungen auf.

Diesen Erkenntnissen folgend ergibt sich dringender Forschungsbedarf im Hinblick auf die Rücklösung und die Metabolisierung der Spurenstoffe im Zuge der Behandlung von mit Pulveraktivkohle versetzter Belebtschlämme.

4.5 Arbeitspaket 5: Mathematische Simulation

4.5.1 Ergebnisse der Tracerversuche

NaCl Tracer

Als Ergebnisse der NaCl-Tracerversuche ergeben sich eine Kurve der NaCl-Konzentration über die Zeit (C-Kurve, Abbildung 52) und eine Kurve der zurückgewonnenen Tracermassen im Zeitverlauf (F-Kurve, Abbildung 52). Versuch 5 wurde nicht abgebildet, da die Randbedingungen mit denen aus Versuch 4 identisch waren.

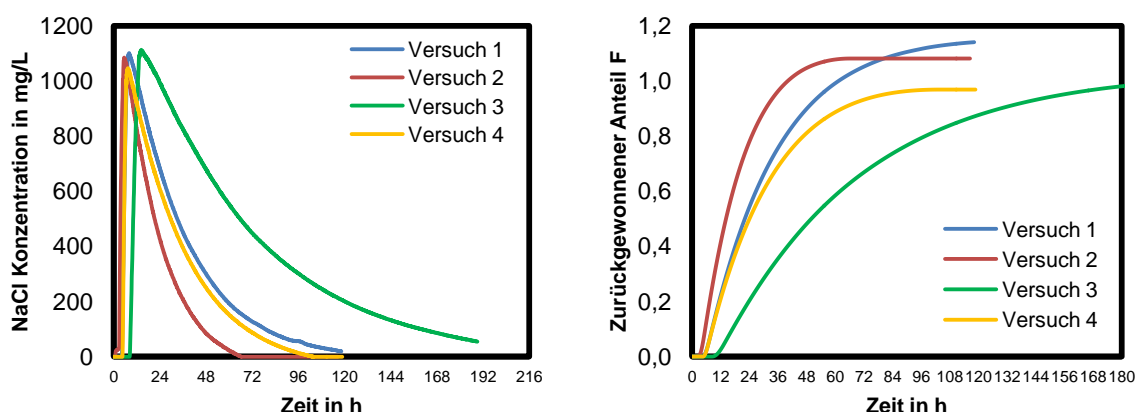


Abbildung 52: C Kurven (links) der Versuche 1 bis 4 und F Kurven (rechts) der Versuche 1 bis 4 mit NaCl Tracer. Versuch 1: $Q_{zu} = 1,6 \text{ m}^3/\text{h}$, Versuch 2: $Q_{zu} = 2,5 \text{ m}^3/\text{h}$, Versuch 3: $Q_{zu} = 0,7 \text{ m}^3/\text{h}$, Versuch 4: $Q_{zu} = 1,6 \text{ m}^3/\text{h}$, $4,8 \text{ m}^3/\text{h}$ interne Rezirkulation, $0,8 \text{ m}^3/\text{h}$ Rücklaufschlamm

Uranin Tracer (Dragocolor®)

Beispielhaft sind an dieser Stelle die Ergebnisse von Versuch 4 in

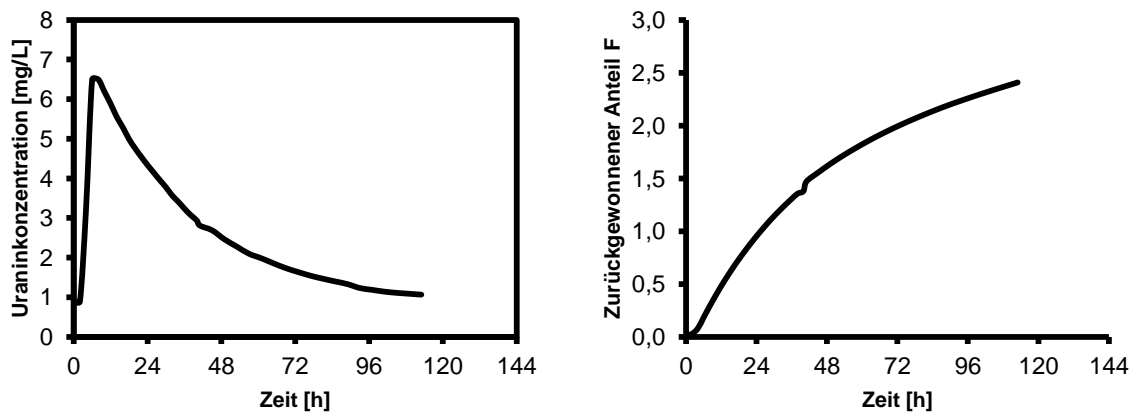


Abbildung 53 dargestellt. Die Betrachtung der C Kurve lässt vermuten, dass der Versuch gut funktioniert hat, da ein zur Salzkonzentration, die parallel bestimmt wurde, ähnlicher Verlauf zu sehen ist. Die F Kurve zeigt jedoch, dass Wiederfindungsraten von fast 250 % erreicht wurden. Hier liegt die Vermutung nahe, dass die erhöhte Salzkonzentration durch Zugabe von NaCl einen starken Einfluss auf den Farbtracer hat.

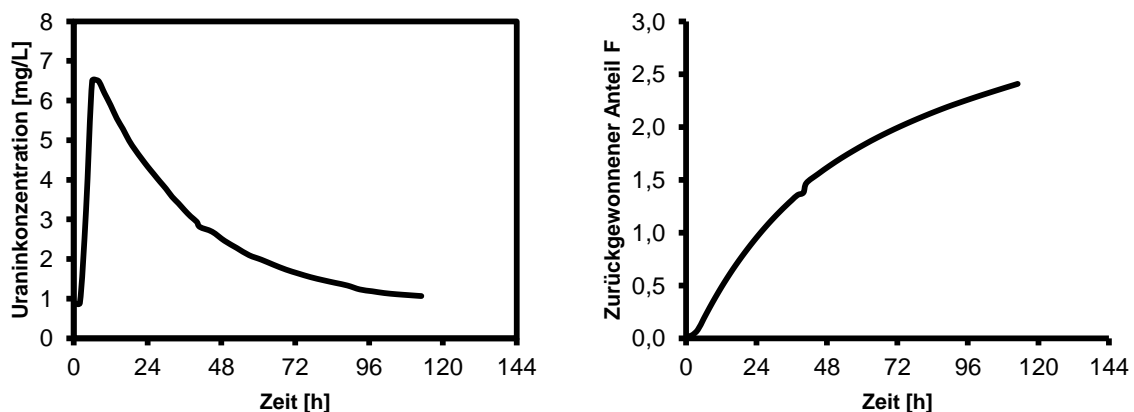


Abbildung 53: Konzentrationskurve (links) und F Kurve (rechts) von Versuch 4 mit Uranin als Tracer

Der letzte Versuch wurde während des laufenden Betriebes der halbtechnischen Versuchsanlage durchgeführt und sollte die bereits für Reinwasser erhaltenen Ergebnisse bestätigen und die Vergleichbarkeit von Uranin mit NaCl als Tracer aufzeigen. Aus diesem Grund wurde er ausschließlich mit Uranin durchgeführt. Die Ergebnisse von Versuch 6, die bei einer Wellenlänge von 479 nm gemessen wurden, sind in Abbildung 57 dargestellt. Die ermittelte Wiederfindungsrate von 116 % zeigt, dass die Genauigkeit von Tracerversuchen mit Uranin auf der Versuchskläranlage Düsseldorf vergleichbar ist mit NaCl.

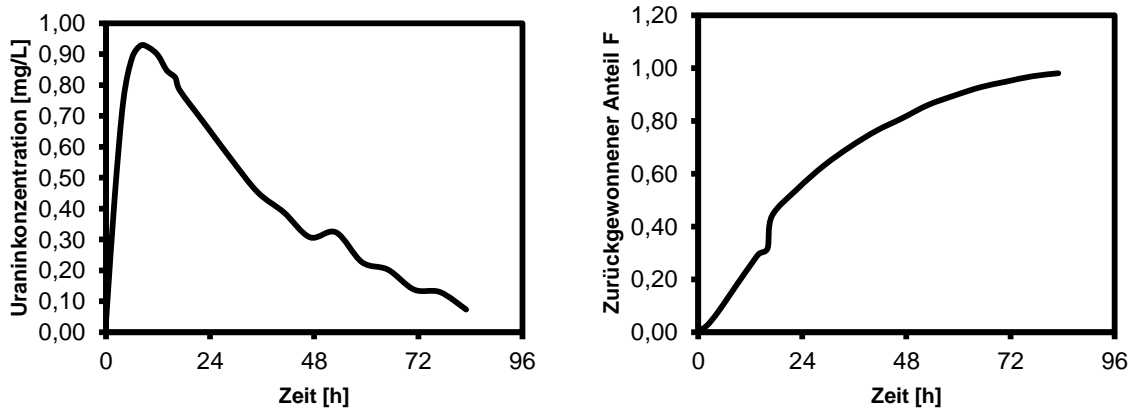


Abbildung 54: C Kurve (links) und F Kurve (rechts) von Versuch 6 mit Uranin als Tracer

4.5.2 Simulationsergebnisse

Modell

Das Belebungsbecken der Versuchskläranlage Düsseldorf (Abbildung 55) wurde in Simba durch zwei volldurchmischten Reaktoren mit je 20 m³ Volumen repräsentiert. Die Prozesse wurden auf Grundlage des selbst definierten Modelles „tracer_model“ abgebildet. Das Nachklärbecken wurde durch einen „NK-Mix Block“ modelliert und die interne Rezirkulation und der Rücklaufschlamm wurden im Modell über konstante Volumenströme gesteuert. Der Überschussschlammvolumenstrom wurde konstant mit 2 % des Zulaufvolumenstromes erfasst.

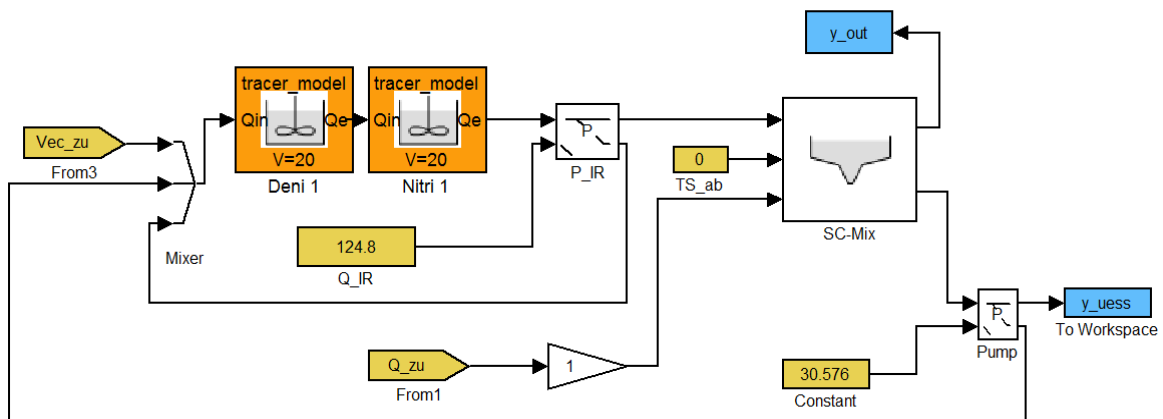


Abbildung 55: Modell der Versuchskläranlage Düsseldorf

Kalibrierung des Modells

Die Kalibrierung des hydraulischen Modells erfolgte auf Basis der Ergebnisse der Tracerversuche. Die gemessenen C und F Kurven wurden zu diesem Zweck mit den Simulationsergebnissen verglichen, die sich durch Abbildung der Szenarien ergaben. In den nachfolgenden Abbildungen werden beispielhaft einige Simulationsergebnisse den entsprechenden Messergebnissen gegenübergestellt.

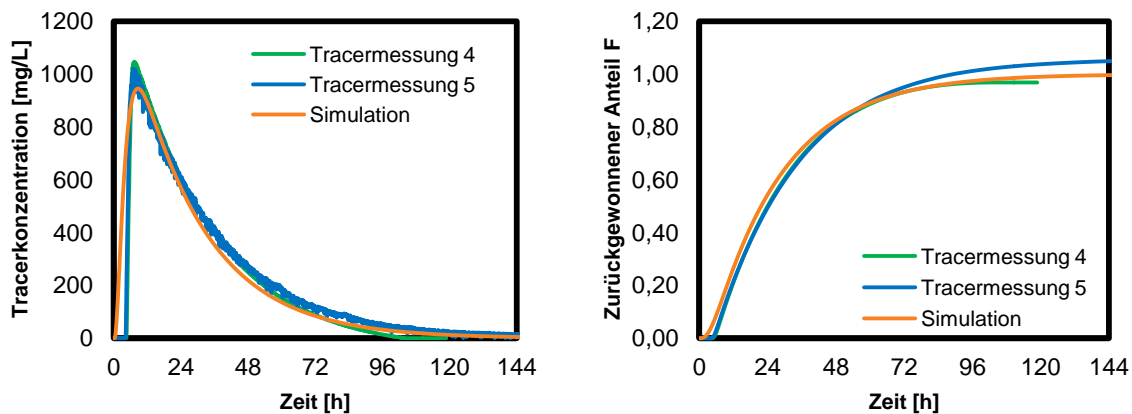


Abbildung 56: Kalibrierung des Modells anhand der C (links) und anhand der F Kurven (rechts) von Versuch 4 und 5 mit einem Zufluss von $1,6 \text{ m}^3/\text{h}$ und interner Rezirkulation sowie Schlammrückführung

Für die Versuche ohne Rezirkulation und Rückführung ergaben sich deutliche Differenzen zwischen den simulierten und gemessenen den C und F Kurven, was darauf schließen lässt, dass das verwendete Modell nicht in der Lage ist, den Betrieb ohne Rezirkulation hinreichend genau abzubilden. Die Simulationsergebnisse zu den Versuchen 4 und 5 (Abbildung 56) spiegeln die Messergebnisse dagegen deutlich besser wieder.

Zur Validierung des kalibrierten Modells wurde der letzte Tracerversuch herangezogen, der mit Uranin bei einem Zufluss von $1,3 \text{ m}^3/\text{h}$, interner Rezirkulation von $5,2 \text{ m}^3/\text{h}$, Schlammrückführung von $1,3 \text{ m}^3/\text{h}$ und Überschussschlammabzug von ca. 2 % des Zulaufvolumenstromes durchgeführt wurde. Die Ergebnisse der Validierung sind in Abbildung 57 dargestellt und bestätigen die Kalibrierung des Modells.

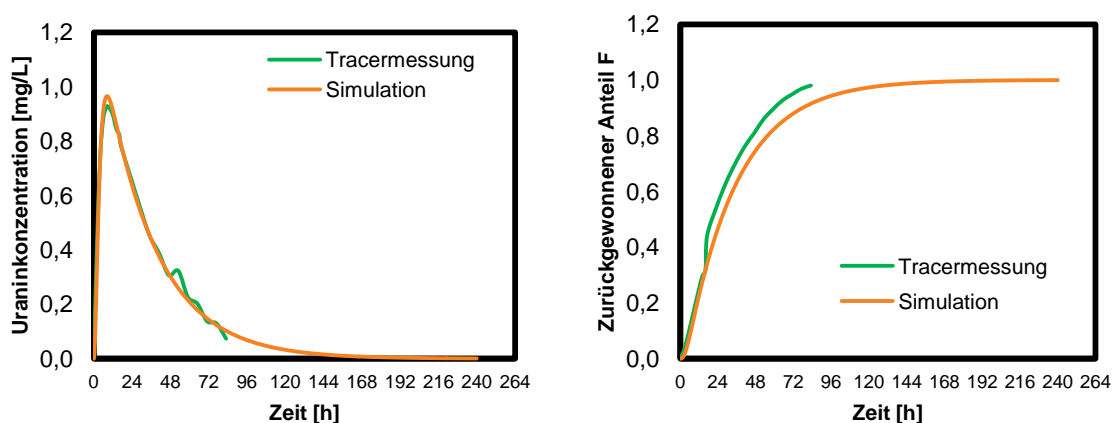


Abbildung 57: Validierung des Modells der Versuchskläranlage Düsseldorf anhand der C Kurve (links) und anhand der F Kurve (rechts) von Versuch 6

Simulation verschiedener Szenarien

Für die Erarbeitung geeigneter Probenahmestrategien zur Überwachung von Spurenstoffen in kommunalen Kläranlagen wurden verschiedene Szenarien simuliert und anschließend mögliche Probenahmestrategien angewendet, um deren Eignung für das jeweilige Szenario zu prüfen.

Zulaufszszenarien

Szenario 1: Stoßweise Auftreten von Spurenstoffen im Kläranlagenzulauf, Zulaufvolumenstrom konstant → Erzeugung eines Peaks für die Dauer von einer Stunde

Szenario 2: Verstärktes Auftreten im Kläranlagenzulauf zweimal pro Tag (z.B. Benzotriazol, Ort et al., 2005), Zulaufvolumenstrom konstant → Erzeugung zweier Peaks von je einer halben Stunde Dauer (14 und 0 Uhr)

Szenario 3: konstanter Zufluss über 24 Stunden → Einmaliger konstanter Zulauf über 24 Uhr und Betrachtung der Verteilung im Ablauf

Szenario 4: Darstellung eines realistischeren Zuflusses → Erzeugung eines dynamischen Tagesgangs und Abbildung im Modell.

Variation der Zulaufvolumenströme

Jedes Szenario wurde mit drei verschiedenen Zulaufvolumenströmen simuliert, um abschätzen zu können, welchen Einfluss Regenereignisse oder minimale Zuflüsse auf die Verteilung von Spurenstoffen im Kläranlagenablauf haben.

Probenahmestrategien

Ziel der Entwicklung einer geeigneten Probenahmestrategie ist es, einen möglichst großen Anteil der Spurenstoffe des Zulaufs in der Ablaufprobe zu erfassen. Aus diesem Grund wurde für die Szenarien 1 bis 3 die Gesamtfracht im Zulauf von 7 bis 7 Uhr mit der Fracht, die zu unterschiedlichen Probenahmezeiträumen erfasst wird, verglichen. Die betrachteten Zeiträume für die Szenarien 1 bis 3 sind in Tabelle 35 zusammengefasst.

Tabelle 35: Zeiträume der Probenahme im Ablauf für die Szenarien 1 bis 3

Dauer	Startzeitpunkt
24 h MP	7 Uhr
24 h MP	(7 + t _R) Uhr (um Aufenthaltszeit verschoben)
48 h MP	7 Uhr
72 h MP	7 Uhr

Für Szenario 4 wurde auch im Zulauf die Dauer der Probenahme variiert, um Frachten aus gleich großen Zeiträumen im Zu- und Ablauf vergleichen zu können. In Tabelle 36 sind die für Szenario 4 gewählten Probenahmezeiträume zusammengestellt.

Tabelle 36: Probenahmezeiträume für Szenario 4 mit dynamischem Tagesgang

Zulauf	Ablauf
24 h MP (7 – 7 Uhr)	24 h MP 7 – 7 Uhr
24 h MP (7 – 7 Uhr)	24 h MP ((7+t _R)– (7+t _R) Uhr)
48 h MP (7 – 7 Uhr)	48 h MP (7 – 7 Uhr)
72 h MP (7 – 7 Uhr)	72 h MP (7 – 7 Uhr)
14 d MP (7 – 7 Uhr)	10 d MP (7 – 7 Uhr)

In Szenario 4 wurde zusätzlich der Unterschied zwischen zeit- und mengenproportionaler Probenahme untersucht. Die Bestimmung der Frachten kann mit mengenproportionaler Probenahme zuverlässiger erfolgen, da der Volumenstrom berücksichtigt wird.

Ergebnisse und Diskussion

Nachfolgend werden die Simulationsergebnisse der verschiedenen Szenarien dargestellt (Böckmann, 2013). Dabei wird neben der Verteilung der Stoffe im Ablauf auch die Tauglichkeit der Probenahmestrategien untersucht.

Szenario 1: 1 Peak im Zulauf

Die Simulationsergebnisse sind für dieses Szenario beispielhaft in Abbildung 58 dargestellt. Die Konzentration im Ablauf steigt direkt nach der Zugabe des Spurenstoffs im Zulauf an und erreicht nach ca. 8,5 h ein Maximum. Der Rückgang der Konzentration im Ablauf erstreckt sich über mehrere Tage. Der grün markierte Bereich stellt den Probenahmezeitraum einer 24 h MP von 7 bis 7 Uhr am gewählten Probenahmetag dar. Die Konzentrationsspitze im Ablauf wird damit gut erfasst, während der nachlaufende Teil in der Probe keine Berücksichtigung findet. Eine Verschiebung der Ablaufprobenahme um die theoretische Aufenthaltszeit t_R wird durch die blaue Markierung gekennzeichnet und beinhaltet die Konzentrationsspitze gar nicht. Die Wiederfindungsrate des Spurenstoffs im Ablauf sind in Abbildung 59 dargestellt. In Tabelle 37 sind die Wiederfindungsraten aller Probenahmestrategien zusammengefasst.

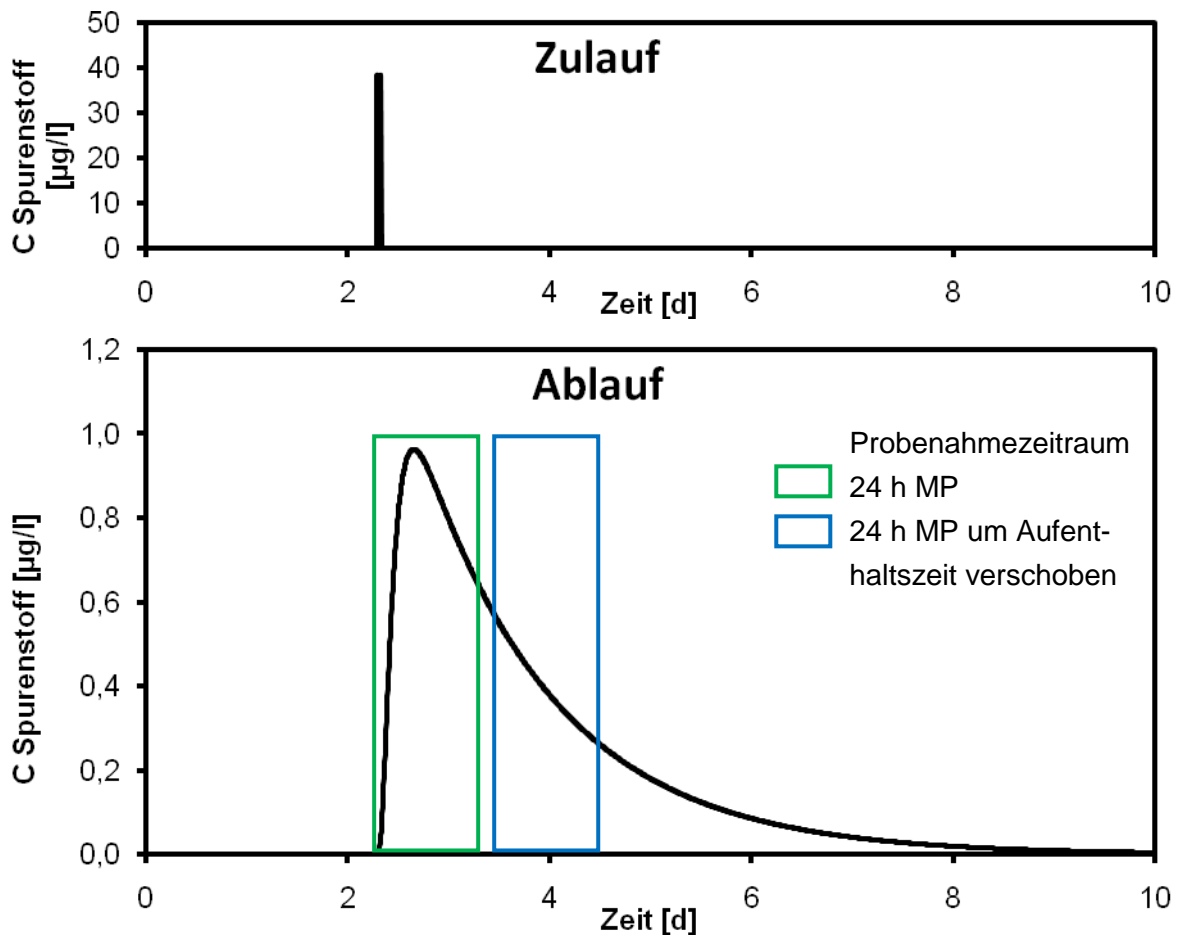


Abbildung 58: Simulierte Spurenstoffkonzentration im Zu- und Ablauf der Versuchskläranlage Düsseldorf für Szenario 1 bei einem konstanten Volumenstrom von 1,3 m³/h

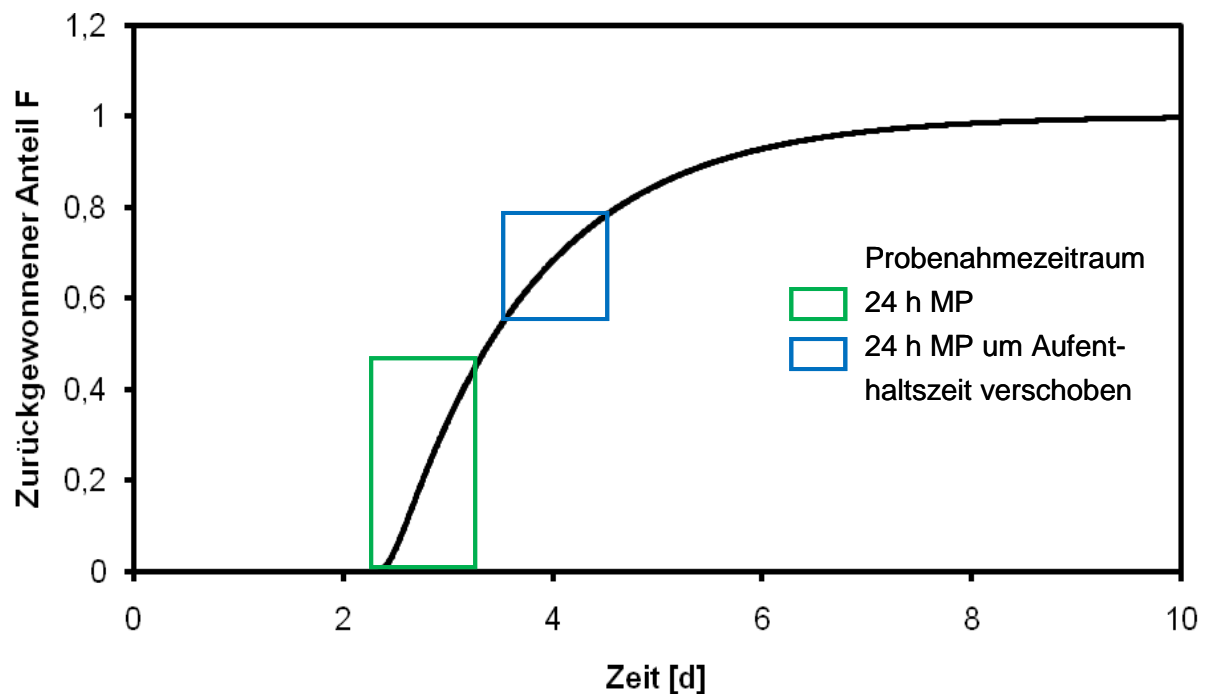


Abbildung 59: Wiederfindungsrate des Spurenstoffs im Ablauf der Versuchskläranlage Düsseldorf über die Zeit

Tabelle 37: Wiederfindungsraten eines Spurenstoffs in verschiedenen Probenahmezeiträumen für Szenario 1 bei einem Volumenstrom von 1,3 m³/h

Probenahme	Zulauf [g]	Ablauf [g]	Rückgewinnung [%]
24 h MP 7 bis 7 Uhr zeitgleich	0,05	0,02	45,32
24 h MP im Ablauf um t _R verschoben	0,05	0,01	22,96
48 h MP	0,05	0,04	72,98
72 h MP	0,05	0,04	86,08

Bei der Simulationen mit Regenwetter- und minimalem Volumenstrom wird deutlich, dass der Anteil des Spurenstoffs, der in einer Ablaufprobe enthalten ist, sehr mit dem Volumenstrom variiert. Im Regenwetterfall ($Q_R = 2,6 \text{ m}^3/\text{h}$) sind in der 24 h MP deutlich mehr als 50 % der Spurenstoffmenge enthalten, während bei minimalem Zufluss ($Q_{\min} = 0,7 \text{ m}^3/\text{h}$) nur knapp 25 % wiedergefunden werden.

Szenario 2: 2 Peaks im Zulauf

Für Szenario 2 weichen die Wiederfindungsraten etwas ab, spiegeln aber im Wesentlichen die Erkenntnisse aus Szenario 1 wieder. Der größte Anteil des Spurenstoffes wird mit über 80 % mithilfe einer 72h-Mischprobe erfasst. Die Wiederfindungsraten für alle Probenahmestrategien sind in Tabelle 38 dargestellt.

Tabelle 38: Wiederfindungsraten eines Spurenstoffs in verschiedenen Probenahmezeiträumen für Szenario 2 bei einem Volumenstrom von 1,3 m³/h

Probenahme	Zulauf [g]	Ablauf [g]	Rückgewinnung [%]
24 h MP 7 bis 7 Uhr zeitgleich	0,05	0,01	21,13
24 h MP im Ablauf um t _R verschoben	0,05	0,02	33,65
48 h MP	0,05	0,03	61,32
72 h MP	0,05	0,04	80,54

Szenario 3: Konstante Konzentration über 24 h

Bei einer konstante Spurenstoffzulaufbelastung über 24 h werden durch eine 24 h-Mischprobe im Ablauf nur 22 % der Zulaufmenge erfasst. Nach 48 h sind es ca. 61 und nach 72 h 81 %. Erst nach ca. 8 Tagen hat die gesamte Spurenstofffracht die Anlage verlassen. Bei einem Volumenstrom von $Q_R = 2,6 \text{ m}^3/\text{h}$ werden nach 24 h schon 42 %, nach 48 h 86 % und nach 72 h 96 % der Spurenstoffmenge die Anlage verlassen. Bei einem minimalen Volumenstrom von $0,7 \text{ m}^3/\text{h}$ werden in einer 24 h MP nur 10 % und nach 72 h nur 58 % der Spurenstoffmenge erfasst.

Szenario 4: Dynamischer Tagesgang

Die Wiederfindungsraten bei verschiedenen Probenahmezeiträumen liegen in diesem Szenario immer bei 100 % der Spurenstoffmenge. Dies liegt daran, dass der gleiche Tagesgang ständig hintereinander simuliert wird und so in einer Probe nicht nur die Spurenstoffmenge des betrachteten Zulaufes bestimmt wird, sondern auch die Spurenstoffanteile der angren-

zenden Tage. Zusätzlich wurde für Szenario 4 der Einfluss von zeit- und mengenproportionaler Probenahme untersucht. Die ermittelten Wiederfindungsraten sind in Tabelle 39 dargestellt.

Tabelle 39: Wiederfindungsraten bei zeit- und mengenproportionaler Probenahme für Szenario 4 mit sich täglich wiederholendem Tagesgang und einem mittlerem Zulaufvolumenstrom von $Q_m = 1,3 \text{ m}^3/\text{h}$

Probenahmezeitraum		Wiederfindungsrate [%]	
Zulauf	Ablauf	Zeitproportional	Mengenproportional
24 h 7 - 7 Uhr		103,79	97,98
24 h 7 - 7 Uhr	24 h (7+t _R) - (7+t _R) Uhr	103,8	97,99
48 h 7 - 7 Uhr		103,79	98,38
72 h 7 - 7 Uhr		103,79	97,99
14 d 7 - 7 Uhr		103,8	98,00

In Tabelle 40 sind zusätzlich die Wiederfindungsraten für einen dynamischen Tagesgang mit erhöhter Spurenstoffkonzentration am Tag der Zulaufprobenahme dargestellt.

Tabelle 40: Wiederfindungsraten bei Erhöhung der Spurenstoffkonzentration

Zeitpunkt des Eintretens der erhöhten Spurenstoffkonzentration:	Wiederfindungsraten [%] bei mengenproportionaler Probenahme über:			
	24 h	48 h	72 h	14 d
Beginn der Probenahme	80,04	95,08	98,16	98,57
1 Tag nach Beginn der Probenahme	90,50	84,88	93,42	98,00
2 Tage nach Beginn der Probenahme	97,98	94,47	88,40	98,00

Anschließend wurde zu verschiedenen Zeiten ein Regenereignis simuliert. Dabei konnte festgestellt werden, dass ein Regenereignis kurz vor Beginn der Probenahme keinen direkten Einfluss auf die Spurenstoffkonzentration im Zulauf ausübt. Die länger anhaltende geringe Konzentration im Ablauf wird jedoch in der Probe erfasst. Daher werden in der 24 h MP 90,8 %, in der 48 h MP 93,01 % und in der 72 h MP 93,88 % wiedergefunden. Würde die Probenahme auf 14 Tage verlängert, wäre der Einfluss eines Regenereignisses kaum noch feststellbar. Findet ein Regenereignis am Ende des ersten Probenahmetages statt, ändert sich der Einfluss auf die Probenahmestrategie. Die niedrigere Konzentration wird in der Zulaufprobe festgestellt. In der Ablaufprobe wird jedoch auch die höhere Konzentration, die vor Eintritt des Regenereignisses vorliegt, erfasst. Insgesamt werden daher 111,03 % in der 24 h MP wiedergefunden. Mit längerer Probenahmedauer wird auch hier der Einfluss des Regenereignisses abgeschwächt, so dass in der 72 h MP 98,78 % wiedergefunden werden. Der Vergleich von zeit- und mengenproportionaler Probenahme zeigt auch hier wieder Unterschiede. Statt 111,03 % werden mit einer zeitproportionalen 24 h MP nur 105,22 % wiedergefunden. Eine kombinierte Variation von Volumenstrom und Konzentration im Zulauf der Anlage verdeutlicht den verstärkten Effekt einer kürzeren Probenahmedauer.

Fazit Arbeitspaket 5

Die Simulationsergebnisse haben gezeigt, dass die Bewertung von Eliminationsleistungen von Spurenstoffen sehr stark durch die gewählte Probenahmestrategie beeinflusst wird. Grund dafür ist das verzögerte Auftreten der Spurenstoffe im Ablauf der Kläranlage über mehrere Tage. In einer 24 h MP wird daher nur ein kleiner Teil der Spurenstoffzulaufmenge erfasst, auch wenn keine Elimination der Stoffe stattgefunden hat. Eine um die theoretische Aufenthaltszeit verschobene Probenahme im Ablauf stellte sich ebenfalls als ungeeignet heraus, da die tatsächliche Aufenthaltszeit in der Regel nicht mit der theoretisch berechneten übereinstimmt. Die zeitgleiche Entnahme von 72 h MP im Zu- und im Ablauf hat sich als effektivste Variante herausgestellt, da hier ein möglichst großer Anteil der Spurenstoffmenge erfasst wird und Variationen durch Konzentrationsanstiege oder Änderungen des Volumenstroms weniger Einfluss auf das Ergebnis der Untersuchung haben. Des Weiteren sind mengenproportionale Probenahmen gegenüber den zeitproportionalen zu bevorzugen, da der Volumenstrom großen Einfluss auf die Aufenthaltszeitverteilung der Spurenstoffe im Ablauf ausübt. Für eine besser angepasste Probenahmestrategie wären Tagesgänge einzelner Stoffe erforderlich, die zum gegenwärtigen Zeitpunkt noch nicht ausreichend bekannt sind und somit nur Annahmen für die jeweilige Art der Zulaufbelastung getroffen werden können.

5 Sonstige Erkenntnisse und Auffälligkeiten

Bei dem Betrieb der Versuchsanlage ergaben sich einige Störungen und Betriebsprobleme, die jedoch im betriebsüblichen Bereich lagen und nicht auf einen besonderen Wartungsaufwand durch die PAK-Dosierung schließen lassen.

An der Dosierungseinrichtung selber kam es relativ häufig zu Verstopfungen, da sich im Dosierbehälter an der Abpumpstelle eine Totzone ausbildete, an der sich die PAK durch die nicht ausreichende Durchmischung absetzte und sich so teilweise zu größeren Bröckchen zusammenballte, die dann in den Pumpenschlauch gezogen wurden und diesen verstopften. Ein weiteres Problem ergab sich durch die niedrige Betriebsgeschwindigkeit der Pumpe. Da die erforderliche Fördermenge am unteren Grenzbereich der Pumpe lag, wurde ein sehr feiner Schlauch mit 6 mm Innendurchmesser gewählt, die Förderleistung betrug je nach Dosierung zwischen 640 und 1.200 mL/h, was vereinzelt eine Sedimentation von Partikeln im Schlauch zur Folge hatte und so ebenfalls zu Verstopfungen führte. Die Verstopfungen konnten jeweils sehr schnell und unkompliziert durch Rückspülvorgänge behoben werden.

Eine Auffälligkeit ergab sich beim Austausch der Rücklaufschlammumpen, die beide während des Anlagenbetriebes einen Defekt aufwiesen. Beim Ausbau der zu Versuchsbeginn neuen Rotoren fiel ein eindeutiger Unterschied in der Oberflächenbeschaffenheit der beiden Rotoren ins Auge (siehe Abbildung 60).

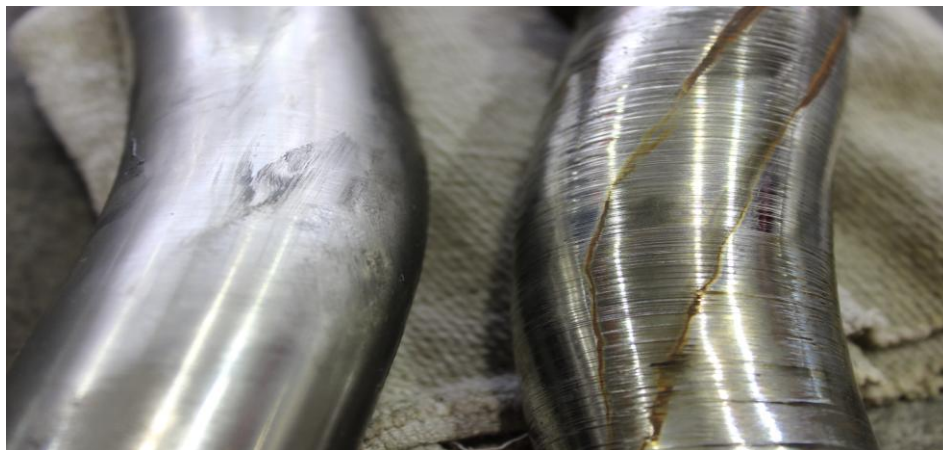


Abbildung 60: Ausgebaute Rotoren der Rücklaufschlammumpen der halbtechnischen Versuchsanlage. Links: Rotor der Referenzstraße ohne sichtbare Verschleißerscheinungen. Rechts: Rotor der Teststraße mit deutlichen Abrasionsspuren.

Während die Oberfläche des Rotors der Referenzstraße blank war und kaum sichtbare Abnutzungserscheinungen aufwies, zeichneten den Rotor der Teststraße deutliche Abrasionsspuren. Die Einkerbungen scheinen in direkten Zusammenhang mit der PAK-Dosierung zu stehen. Die vermehrte Abnutzung durch PAK-Einbindung in den Belebtschlamm ist nicht verwunderlich, da die Wasserwerkskohle eine sehr heterogene Körnung aufwies und zum Teil größere Kohlepartikel in den Belebtschlamm eingebunden wurden. Die dauerhafte Förderung dieses PAK-haltigen Belebtschlammes hat also eine deutlich schnellere und stärkere Abnutzung des Pumpenrotors zur Folge. Dieser Punkt ist bei der Einrichtung eines PAK-Verfahrens auf einer großtechnischen Anlage bei der Pumpenwahl zu beachten.

6 Öffentlichkeitsarbeit

Als wichtiger Teilaspekt dieses Projektes wurde es verstanden, die öffentliche Aufmerksamkeit vermehrt auf das Thema Mikroverunreinigungen im Abwasser zu lenken und über öffentliche Veranstaltungen und fachliche Berichte einen Teil zur Sensibilisierung dieses wichtigen Themas beizutragen.

Dazu gehört sowohl die Teilnahme an öffentlichen Veranstaltungen, die der Information der Bürgerinnen und Bürger dienen, als auch der Austausch mit Politik und Industrie auf speziellen Fachtagungen und zusätzlich die Veröffentlichung von Beiträgen in Zeitungen und Zeitschriften.

Im Rahmen des Tags des Wassers am 22.03.2013 wurde durch den Stadtentwässerungsbetrieb Düsseldorf eine Informationsveranstaltung auf dem Klärwerk Düsseldorf-Süd durchgeführt. Im Rahmen dieser Veranstaltung wurde das Projekt vorgestellt und anschließend die Möglichkeit zur Besichtigung der halbtechnischen Versuchsanlage geboten. Im Anschluss an den Tag des Wassers wurde das Projekt in zahlreichen Zeitungs- und Zeitschriftenartikeln vorgestellt und es erschien zusätzlich ein Fernsehbericht in der WDR-Sendung Lokalzeit Düsseldorf.

Um den Austausch auf der fachlichen Ebene voranzutreiben, präsentierten Herr Dr. Bernd Pehl und Herr Dr.-Ing. Manfred Lübken im Rahmen des 13. IFWW-Fachkolloquiums am 29.05.2013 (Titel: Spurenstoffelimination - wirtschaftliche, technische und ökologische Aspekte) einen Vortrag zum Einsatz von reaktivierter Aktivkohle aus Wasserwerken zur Spurenstoffelimination in kommunalen Kläranlagen am Beispiel Düsseldorf (Lübken et al., 2013). Zusätzlich wurde das Projekt im Rahmen des Bochumer Workshops Siedlungswasserwirtschaft sowie auf der IFAT Entsorga 2014 in München dem Publikum als Poster vorgestellt.

Des Weiteren wird das Projekt an der Ruhr-Universität Bochum in den Vorlesungen Ressourcenmanagement und Innovationen in der Siedlungswasserwirtschaft durch Prof. Dr. Marc Wichern erläutert und in diesem Zusammenhang der Versuch unternommen, die Studierenden auf dieses Themas aufmerksam zu machen und für diesen Bereich der Siedlungswasserwirtschaft zu begeistern.

Abschließend ist ein Erfahrungsbericht im Schwerpunkttheft Spurenstoffe der Korrespondenz Abwasser, Abfall sowie eine weitere Veröffentlichung in der Water Research mit dem vorläufigen Titel „Elimination of micropollutants in municipal WTPs: Efficiency of direct dosage of PAC into the activated sludge tank and fate of micropollutants during anaerobic digestion“ geplant.

7 Schlussfolgerungen und Gesamtbetrachtung

Zusammenfassend kann festgestellt werden, dass sich die reaktivierte Pulveraktivkohle aus dem Wasserwerk Düsseldorf-Holthausen durchaus gut für den Einsatz zur Adsorption einiger Mikroverunreinigungen eignet. Die Dosierung direkt ins Belebungsbecken hat sich dabei als praktikable Verfahrensvariante erwiesen, die ohne großen finanziellen, betriebstechnischen und baulichen Aufwand in ein bestehendes System integrierbar ist.

Mit der direkten Dosierung von $10 \text{ mg}_{\text{PAK}}/\text{L}$ in die Belebung ist eine signifikant bessere Elimination der Stoffe Carbamazepin ($59 \pm 9 \%$), Diclofenac ($57 \pm 9 \%$) und Metoprolol ($65 \pm 11 \%$) im Vergleich zur Referenzstraße (Carbamazepin: $19 \pm 10 \%$, Diclofenac: $42 \pm 12 \%$, Metoprolol: $27 \pm 4 \%$) erzielt worden. Für Benzotriazol und Sulfamethoxazol ergab sich keine deutliche Verbesserung der Elimination gegenüber der Referenzanlage. Die Verdoppelung der PAK-Konzentration auf $20 \text{ mg}/\text{L}$ zeigte nur für Metoprolol und Sulfamethoxazol einen Effekt. Für Metoprolol ergab sich eine um 5-%-Punkte verbesserte mittlere Elimination, während sich für Sulfamethoxazol im Mittel eine deutlich höhere Elimination zeigte ($20 \text{ mg}_{\text{PAK}}/\text{L}$: $69 \pm 7 \%$, $10 \text{ mg}_{\text{PAK}}/\text{L}$: $43 \pm 18 \%$).

Die Ergebnisse der Absetzversuche und auch der Routineanalytik der Belebtschlämme zeigten, dass die direkte PAK-Dosierung eine leichte Verbesserung der Absetzeigenschaften zur Folge hat. Der Schlammvolumenindex der Testanlage betrug im Mittel $122 \text{ mL}/\text{g}_{\text{TS}}$ und lag damit $19 \text{ mL}/\text{g}_{\text{TS}}$ unter dem Mittelwert der Referenzstraße.

Für den Einfluss der Aktivkohle auf die Schlammentwässerung kann keine eindeutige Aussage getroffen werden, da die angewandte Methodik nicht zu hinreichend reproduzierbaren Ergebnissen führte und diese stark variierten. Die vorliegenden Ergebnisse deuten insgesamt darauf hin, dass sich die Schlämme mit und ohne PAK bei der Entwässerung sehr ähnlich verhalten.

Mit den Versuchen zur Desorption im anaeroben Milieu konnte kein abschließendes quantitatives Ergebnis für die ausgewählten Mikroverunreinigungen ermittelt werden, obgleich es für die Stoffe Benzotriazol, Diclofenac und Carbamazepin während der anaeroben Batchversuche mit Belebtschlamm zu Erhöhungen der Spurenstoffkonzentration in der Wasserphase kommt. Die Konzentration von Sulfamethoxazol lag im Gegensatz zu den genannten Spurenstoffen nach den anaeroben Versuchen unter der Bestimmungsgrenze, so dass von einem vollständigen Abbau oder einer vollständigen Metabolisierung dieser Substanz ausgegangen werden kann. Die Metoprololkonzentration wurde in den anaeroben Versuchen nur geringfügig erhöht. Die anaeroben Versuche mit Belebtschlamm der Referenzstraße ohne PAK-Dosierung zeigen, dass dort ebenfalls eine Konzentrationserhöhung in der Wasserphase stattfindet. Teilweise ist die Rücklösung der Spurenstoffe Benzotriazol, Diclofenac und Carbamazepin dort in ähnlicher Größenordnung wie die Rücklösung, die im PAK-angereicherten Schlamm zu messen ist.

Es bleibt demnach offen, ob die beobachtete Konzentrationsänderungen in der flüssigen Phase des Anerobreaktors eine Folge der Hydrolyse des Faulschlammes oder eine tatsächliche Rücklösung von der PAK ist.

Durch das Arbeitspaket Simulation konnte der große Einfluss der Probenahmestrategie auf die ermittelten Eliminationsleistungen der Spurenstoffe aufgezeigt werden. Hierbei hat sich die zeitgleiche Entnahme von 72-Stunden-Mischproben im Zu- und im Ablauf als die beste Variante herausgestellt. Dadurch wird ein möglichst großer Anteil der Spurenstofffracht erfasst und so haben Variationen durch Konzentrationsanstiege oder Änderungen des Volumenstroms nur geringen Einfluss auf das Bilanzergebnis. Des Weiteren ist die mengenproportionale der zeitproportionalen Probenahme gegenüber zu bevorzugen. Um die Probenahme stoffspezifisch genauer anpassen zu können, wäre die Kenntnis der Tagesgänge einzelner Mikroschadstoffe erforderlich.

Den Erkenntnissen dieses Projektes folgend ergibt sich in einigen Punkten vertiefter Forschungsbedarf. Zum einen sollten sowohl zum Einsatz der Wasserwerkskohle als auch zur Direktdosierung weitere Untersuchungen durchgeführt werden, um genaueren Aufschluss über die teils von der Literatur abweichenden Eliminationsleistungen zu erhalten. Dabei wäre zu klären, welche Adsorptionskapazität die verwendete Wasserwerkskohle aufweist und ob diese mit der Kapazität einer Industriekohle vergleichbar ist. Für die nachfolgenden Schlammbehandlungsstufen konnten durch die direkte Dosierung von Pulveraktivkohle ins Belebungsbecken keine Nachteile festgestellt werden. Dennoch sollten zu diesem Thema weitere Untersuchungen erfolgen. Dabei wären besonders Betrachtungen im Pilotmaßstab von Vorteil, da Eindick- und Entwässerungsergebnisse aus dem Labormaßstab nur schwer auf Großanlagen übertragbar sind.

Zum anderen ergibt sich weiterer dringender Forschungsbedarf im Hinblick auf eine mögliche Rücklösung, den Abbau und die Metabolisierung der Spurenstoffe im Zuge der anaeroben Stabilisierung von mit PAK versetzten Belebtschlämmen. Dabei ist es vor allem relevant, die tatsächliche Rücklösung von der Kohle zu quantifizieren. Zu diesem Zweck sind weitere Vergleichsuntersuchungen mit Belebtschlamm ohne Aktivkohlezusatz erforderlich. Zum gegenwärtigen Zeitpunkt kann noch nicht vollkommen ausgeschlossen werden, dass signifikante Spurenstoffanteile über die Prozesswässer der Kläranlage in die Belebungsstufe zurückgeführt werden.

8 Literaturverzeichnis

Abegglen, C.; Siegrist, H. (2012) Mikroverunreinigungen aus kommunalem Abwasser: Verfahren zur weitergehenden Elimination auf Kläranlagen, Bundesamt für Umwelt BAFU, Bern

Arge (2011) Elimination von Arzneimittelrückständen in kommunalen Kläranlagen. Arbeitsgemeinschaft Spurenstoffe NRW, Teilprojekt 6 (Arge), Ministerium für Klimaschutz, Umwelt, Landwirtschaft, Natur- und Verbraucherschutz des Landes Nordrhein-Westfalen (MKULNV). Schlussbericht Phase 1

Arge (2013) Elimination von Arzneimittelrückständen in kommunalen Kläranlagen. Arbeitsgemeinschaft Spurenstoffe NRW, Teilprojekt 6 (Arge), Ministerium für Klimaschutz, Umwelt, Landwirtschaft, Natur- und Verbraucherschutz des Landes Nordrhein-Westfalen (MKULNV). Schlussbericht Phase 2

ATV (1992) ATV-Arbeitsbericht: Entwässerungskennwerte. Korrespondenz Abwasser, Abfall, 3, 401-408

Baumgart, H.-C.; Fischer, M.; Loy H. (2007) Handbuch für Umwelttechnische Berufe. 8. Auflage, Oberhaching: F. Hirthammer Verlag GmbH, ISBN 978-3-88721-190-5

Bendt, T. (2012) Laborkläranlagen mit Stickstoffelimination und vermehrter biologischer Phosphorelimination. Vom Wasser Das Journal, Vol. 110,(4), 115 -119

Berger, H., Foissner, W., Kohmann, F. (1997) Bestimmung und Ökologie der Mikrosaprobien nach DIN 38410, Stuttgart, Jena, Lübeck, Ulm, ISBN3-437-25026-4

Biebersdorf, N.; Schröder, M.; Palmowski, L.; Veltmann, K.; Kaste, A. (2012) Kosten der Mikroschadstoffentfernung/Energieverbrauch-Energiebedarf von Verfahren zur Elimination von organischen Mikroschadstoffen. 2. Fachsymposium Mikroschadstoffe.NRW 2012, Abgerufen am 11. Februar 2014 von Kompetenzzentrum Mikroschadstoffe.NRW <http://www.masterplan-wasser.nrw.de/data/files/595/Biebersdorf-Kurzfassung.pdf>

Bischofsberger, W.; Dichtl, N.; Rosenwinkel, K.-H.; Seyfried, C. F. (2005) Anaerobtechnik. 2. Auflage, Berlin Heidelberg: Springer-Verlag. ISBN 3-540-06850-3

Bornemann, C.; Pinnekamp, J. (2012) Ertüchtigung kommunaler Kläranlagen, insbesondere kommunaler Flockungsfiltrationsanlagen durch den Einsatz von Aktivkohle - Elimination von Arzneimitteln und organischen Spurenstoffen: Entwicklung von Konzeptionen und innovativen, kostengünstigen Reinigungsverfahren. Abschlussbericht: MIKROFlock, AZ IV+7+042 600 001E, Aachen

Böckmann, D (2013) Darstellung der Aufenthaltszeitverteilung von Mikroverunreinigungen am Beispiel der Kläranlage Schwerte und der Versuchskläranlage Düsseldorf - Ableitung von Strategien zur Optimierung der Probenahme. Masterarbeit, Ruhr-Universität Bochum, Bochum

Bosch, H.; Kleerebezem, G. J.; Marset, P. (1976) Activated carbon from activated sludge. Water Pollution Control Federation, Vol. 48 (3)

Boyle, N. J.; Evans, G.M. (2013) Influence of nanoparticles on the polymer-conditioned dewatering of wastewater sludges. Water Science Technology, 67(9), 2117-2123

Braha, A. und Groza, G. (2006) Moderne Abwassertechnik, 1. Auflage, Weinheim, ISBN 3-527-31270-6

Brendel, U. (1997) Einsatz von Aktivkohle in der kommunalen Abwasserreinigung. IN: Gewässerschutz - Wasser - Abwasser (GWA), Bd. 167, Aachen, ISBN 3-93259-044-9

Carballa, M.; Omil, F; Lema, J. M.; Llompart, M; Garcia-Jares C.; Rodriguez, I.; Gomez, M.; Ternes, T (2004) Behavior of pharmaceuticals, cosmetics and hormones in a sewage treatment plant. Water Research, 38, 2918–2926

Çeçen, F.; Aktaş, Ö. (2012) Activated carbon for water and wastewater treatment: Integration of adsorption and biological treatment. 1. Ausgabe, Wiley-VCH, Weinheim and Germany, ISBN 978-3-527-32471-2

Clara, M.; Gans, O.; Humer, F.; Weiß, S.; Zieritz, I. (2010) ANTIBIOTIKA IM GRUNDWASSER - Sondermessprogramm im Rahmen der Gewässerzustandsüberwachungsverordnung. Umweltbundesamt GmbH, REPORT REP-0258, Wien

Coskun, P. (2014) Einfluss von PAK-Dosierung in die biologische Reinigungsstufe auf das Entwässerungsverhalten des Belebtschlammes. Ruhr-Universität Bochum, Bochum

De Walle, F. B., Chian, E. S. K. (1977) Biological regeneration of powdered activated carbon added to activated sludge units. Water Research, 11, 439–446

Denkert, R. (1988). Einflüsse auf die Leistungsfähigkeit und Wirtschaftlichkeit einer prozeßgesteuerten Dekantier-Zentrifuge zur Überschußschlammeindickung. Bochum: Verein zur Förderung des Lehrstuhls für Wasserwirtschaft und Umwelttechnik II (Siedlungswasserwirtschaft) an der Ruhr-Universität Bochum e.V.

DIN 38 409-1 (1987) Deutsche Einheitsverfahren zur Wasser-, Abwasser- und Schlamm-Untersuchung, Bestimmung des Gesamttrockenrückstandes, des Filtrattrockenrückstandes und des Glührückstandes, Teil 1, 18. Lieferung, ISBN 978-3-410-23525-5 (Beuth), ISBN 978-3-527-33141-3 (Wiley-VCH)

DIN 38 409-2 (1987) Deutsche Einheitsverfahren zur Wasser-, Abwasser- und Schlamm-Untersuchung, Bestimmung der abfiltrierbaren Stoffe und des Glühverlustes, Summarische Wirkungs- und Stoffkenngrößen, Teil 2, 18. Lieferung, ISBN 978-3-410-23525-5 (Beuth), ISBN 978-3-527-33141-3 (Wiley-VCH)

DIN 38 409-2 (1987) Deutsche Einheitsverfahren zur Wasser-, Abwasser- und Schlamm-Untersuchung, Bestimmung des Gesamttrockenrückstandes, des Filtrattrockenrückstandes und des Glührückstandes, Teil 2, 18. Lieferung, ISBN 978-3-410-23525-5 (Beuth), ISBN 978-3-527-33141-3 (Wiley-VCH)

DIN 38410-1 (2005) Deutsche Einheitsverfahren zur Wasser-, Abwasser- und Schlamm-Untersuchung, Biologisch-ökologische Gewässeruntersuchung (Gruppe M), Teil 1: Bestimmung des Saprobienindex in Fließgewässern, 62. Lieferung, ISBN 978-3-410-23525-5 (Beuth), ISBN 978-3-527-33141-3 (Wiley-VCH)

DIN 38414-8 (1985) Deutsche Einheitsverfahren zur Wasser-, Abwasser- und Schlamm-Untersuchung, Schlamm und Sediment (Gruppe S), Bestimmung des Faulverhaltens, Teil 8, 15. Lieferung, ISBN 978-3-410-23525-5 (Beuth), ISBN 978-3-527-33141-3 (Wiley-VCH)

DIN EN 12879-3a (2001) Deutsche Einheitsverfahren zur Wasser-, Abwasser- und Schlamm-Untersuchung, Schlamm und Sediment (Gruppe S), Bestimmung des Glühverlustes der Trockenmasse, Teil 3a, 51. Lieferung, ISBN 978-3-410-23525-5 (Beuth), ISBN 978-3-527-33141-3 (Wiley-VCH)

DIN EN 12880-2a (2001) Deutsche Einheitsverfahren zur Wasser-, Abwasser- und Schlamm-Untersuchung, Schlamm und Sediment (Gruppe S), Bestimmung des Trockenrückstandes und des Wassergehalts, Teil 2a, 51. Lieferung, ISBN 978-3-410-23525-5 (Beuth), ISBN 978-3-527-33141-3 (Wiley-VCH)

DIN EN 14701-1 (2006) Charakterisierung von Schlämmen – Filtrationseigenschaften – Bestimmung der kapillaren Fließzeit. Teil 1, Berlin: Beuth Verlag GmbH

DIN EN 14702-1 (2010) Deutsche Einheitsverfahren zur Wasser-, Abwasser- und Schlamm-Untersuchung, Charakterisierung von Schlämmen- Absetzeigenschaften, Teil 1: Bestimmung der Absetzbarkeit (Bestimmung des Schlammvolumens und des Schlammvolumenindex), 79. Lieferung, ISBN 978-3-410-23525-5 (Beuth), ISBN 978-3-527-33141-3 (Wiley-VCH)

DIN EN 1484-3 (1998) Deutsche Einheitsverfahren zur Wasser-, Abwasser- und Schlamm-Untersuchung, Anleitung zur Bestimmung des gesamten organischen Kohlenstoffs (TOC) und des gelösten organischen Kohlenstoffs (DOC), Teil 3, 40. Lieferung, ISBN 978-3-410-23525-5 (Beuth), ISBN 978-3-527-33141-3 (Wiley-VCH)

DWA (2006) Weiterbildendes Studium Wasser und Umwelt Bauhaus-Universität Weimar; Abwasserbehandlung, 1. Auflage, Freiburg, ISBN 3-86068-272-5

DWA-M 383 (2008) Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall e.V.: Merkblatt DWA-M 383 Kennwerte der Klärschlammmentwässerung. Hennef, ISBN 978-3-941089-29-7

Fahlenkamp, H.; Nöthe, T.; Nowotny, N.; Ries, T.; von Sonntag, C. (2006) Abschlussbericht zum Forschungsvorhaben Untersuchungen zum Eintrag und zur Elimination von gefährlichen Stoffen in kommunalen Kläranlagen Teil 2, Technische Universität Dortmund

Fahlenkamp, H.; T. Nöthe (2006) Abschlussbericht zum Forschungsvorhaben: Einsatz und Wirkungsweise oxidativer Verfahren zur Nachbehandlung von Abwasser aus kommunalen Kläranlagen Teil 2b und 3, Technische Universität Dortmund

Feldmann, D. F. (2005) Modellberechnungen zum Verhalten und Verbleib von Arzneimittelrückständen im Krankenhausabwasser und Beurteilungsmöglichkeiten ihres ökotoxikologischen Gefährdungspotentials, Technische Universität Berlin, Berlin

Götz, C.; Kase, R.; Ort, C.; Singer, H.; Bergmann, S. (2012) Mikroschadstoffe aus kommunalem Abwasser: Stoffflussmodellierung, Situationsanalyse und Reduktionspotenziale für Nordrhein-Westfalen, Studie im Auftrag des MKULNV-NRW, Düsseldorf

Haist-Gulde, B. ; Riegel, M.; Baldauf, G. (2012) Einsatz beladener Aktivkohlen aus der Trinkwasseraufbereitung zur weitergehenden Abwasserbehandlung. Gwf-Wasser I Abwasser, 153(5), 592-601

Hanisch, B.; Abbas, B.; Kratz, W. (2002) Ökotoxikologische Bewertung von Humanarzneimitteln in aquatischen Ökosystemen, Landesumweltamt Brandenburg (LUA), Potsdam

Ivashechkin, P. (2006) Elimination organischer Spurenstoffe aus kommunalem Abwasser, Bd. 205 von Gewässerschutz, Wasser, Abwasser. Aachen

Kopp, J. (2001) Wasseranteile in Klärschlammuspensionen - Messmethode und Praxisrelevanz. Schriftenreihe des Instituts für Siedlungswasserwirtschaft, Braunschweig, Band 66

Kopp, J. (2009) Theoretische Grundlagen zur Entwässerbarkeit von Schlämmen. Fachtagung der VSA-Kommission «ARA», 13.03.2009, Zürich

Langergraber, G., Alex, J., Weissenbacher, N., Woerner, D., Ahnert, M., Frehmann, T., Halft, N., Hobus, I., Plattes, M., Spering, V., Winkler, S. (2008) Generation of diurnal variation for dynamic simulation. *Water Science and Technology*, 59(9), 1483-1486

Lauterbach, S. (2014) Einfluss der Dosierung von Pulveraktivkohle auf die Absetzeigenschaften von Belebtschlamm. Ruhr-Universität Bochum, Bochum

Liebig, M. (2005) Untersuchungen zur Umweltrisikoaabschätzung von Humanpharmaka und Inhaltsstoffen von Körperpflegeprodukten vor dem Hintergrund europäischer Bewertungskonzepte. Universität Darmstadt, Fachbereich Biologie und Informatik, Frankfurt

Lübken, M.; Clausen, K.; Pehl, B.; Wichern, M. (2013) Elimination organischer Spurenstoffe aus kommunalem Abwasser unter Einsatz reaktivierter Pulveraktivkohle aus Trinkwasserwerken. 13. IFWW-Fachkolloquium, 29.05.2013, Haltern am See

Luo, Y.; Guo, W.; Ngo, H. H.; Nghiem, L. D.; Hai, F. I.; Zhang, J.; Liang, S.; Wang, X. C. (2014) A review on the occurrence of micropollutants in the aquatic environment and their fate and removal during wastewater treatment. *Science of the Total Environment*, 473–474, 619–641

Meißner, M. (2008) Arzneimittel in der Umwelt: Natur als Medikamentendeponie. *Deutsches Ärzteblatt*, 105(24)

Metzger, S.; Kapp, H. (2008) Einsatz von Pulveraktivkohle zur Elimination von Mikroverunreinigungen. VSA-Fachtagung, 28. Oktober 2008, Bern

Metzger, S.; Rößler, A.; Kapp, H. (2012) Spurenstoffbericht: Erweiterung des Klärwerks Mannheim um eine Adsorptionsstufe zur Verbesserung der Abwasserreinigung, Hochschule Biberach

Nam, S.-W.; Choi, D.-J.; Kim, S.-K.; Her, N.; Zoh, K.-D. (2014) Adsorption characteristics of selected hydrophilic and hydrophobic micropollutants in water using activated carbon. *Journal of hazardous materials*, Vol. 270: 144 – 152

Pinnekamp, J., Bolle, F.-W. (2011) Energiebedarf von Verfahren zur Elimination von organischen Spurenstoffen - Phase I, Abschlussbericht, IV-7-042 600 003 J, Aachen

Reddersen, K. (2004) Das Verhalten von Arzneimittelrückständen im Wasserkreislauf Berlins. Technische Universität Berlin, Berlin

Sørensen, T. (1948) A method of establishing groups of equal amplitude in Plant sociology based on similarity of species and its application to analyses of the vegetation on Danish commons. Kongelige Danske Videnskabernes Selskab 5 (4), 1 – 34

Sattelberger, R. (1999) Arzneimittelrückstände in der Umwelt. Umweltbundesamt GmbH, Wien

Ternes, T. A.; Joss, A. (2006) Human pharmaceuticals, hormones and fragrances: The challenge of micropollutants in urban water management. IWA Publishing, London and New York, ISBN 978-1843-39093-0

Thomann, M. (2013) Versuchsaufbau und erzielte Resultate beim Grossversuch – ARA Flos-Wetzikon. Holinger AG, Wetzikon, 15. November 2013

VSA (2013) Verband Schweizer Abwasser- und Gewässerschutzfachleute: VSA-Plattform "Verfahrenstechnik Mikroverunreinigungen". Abgerufen am 11. Februar 2014 aus Newsletter Nr. 2: "PAK-Dosierung in die Belebung" auf der ARA Flos in Wetzikon: http://www.micropoll.ch/fileadmin/user_upload/Redaktion/Aktuell/Newsletter_2.pdf

Will, J.; Högel, C.; Klopp, R. (2013) Vorkommen und Herkunft der Industriechemikalien Benzotriazole und TMMD im Oberflächenwasser und kommunalen Abwasser – Beispiel Ruhr. KA Korrespondenz Abwasser, Abfall, 60(8), 684-690

Zippel, M.; Hannappel, S.; Duscher, K.; Scheytt, T., Müller, B. (2010) Mathematische Simulation des Eintrages von Arzneimitteln aus Oberflächengewässern in das Grundwasser durch Uferfiltration, Technische Universität Berlin, Dessau-Roßlau

Zwickenpflug, B.; Böhler, M.; Sterkele, B.; Joss, A.; Siegrist, H.; Traber, J.; Gujer, W.; Markus; Behl, M. (2010) Einsatz von Pulveraktivkohle zur Elimination von Mikroverunreinigungen aus kommunalem Abwasser: Abschlussbericht: MicroPoll, Dübendorf

Anhang

Anhang A: Routineanalytik April 2013	103
Anhang B: Routineanalytik Mai 2013.....	105
Anhang C: Routineanalytik Juni 2013.....	107
Anhang D: Routineanalytik Juli 2013.....	109
Anhang E: Routineanalytik August 2013.....	111
Anhang F: Routineanalytik September 2013	113
Anhang G: Routineanalytik Oktober 2013.....	115
Anhang H: Routineanalytik November 2013.....	117
Anhang I: Routineanalytik Dezember 2013.....	119
Anhang J: Routineanalytik Januar 2014	121
Anhang K: Mikroorganismen im Belebtschlamm der halbtechnischen Versuchsanlage mit Angaben der Häufigkeitsstufen 1- 7 (1= Einzelfund, 7= Massenhaft).....	123
Anhang L: Ergebnisse der Spurenstoffanalytik	128
Anhang M: Ergebnisse aus der Zentrifugation zu Versuch A.....	131
Anhang N: Ergebnisse aus der Zentrifugation zu Versuch B	131
Anhang O: Ergebnisse aus der Zentrifugation zu Versuch C	132
Anhang FF: Ergebnisse aus der Zentrifugation zu Versuch D	132
Anhang Q: Ergebnisse aus der Zentrifugation zu Versuch D (Wiederholung).....	133
Anhang R: Ergebnisse aus der Zentrifugation zu Versuch E bis G	133
Anhang S: Ergebnisse aus der Zentrifugation zu Versuch H	134
Anhang T: Ergebnisse aus der Zentrifugation zu Versuch I	134
Anhang U: CST-Werte der einzelnen Versuchsreihen	134
Anhang V: Daten zu den anaeroben Batchversuchen an der RUB (Versuchsreihe 1: 36°C, 25 d).....	135
Anhang W: Daten zu den anaeroben Batchversuchen an der RUB (Versuchsreihe 2: 55-56°C, 25 d).....	136
Anhang X: Daten zu den anaeroben Batchversuchen an der RUB (Versuchsreihe 2: 36°C, 39 d).....	137

Anhang A: Routineanalytik April 2013

Monatsbericht 04 / 2013			:Aus K : Messen			rot=ausgegeben		Belebung Testanlage 2		Belebung Kontrollanlage 1							
Datum	Tag	Lims-Nr.	Lims-Nr.	Lims-Nr.	Pges [mg/l]	TNb [mg/l]	TOC [mg/l]	Testanlage 2 Volumenstr. [m³/d]	Kontrollanlage 1 Volumenstr. [m³/d]	Lims-Nr.	TS [mg/l]	GV [%]	oTS [mg/l]	Lims-Nr.	TS [mg/l]	GV [%]	oTS [mg/l]
01.04.2013	Montag	3057	3059	3058	10,3	79,2	214	31,7	31,2	3061	-	-	-	3060	-	-	-
02.04.2013	Dienstag	3092	3091	3091	8,8	72,7	214	31,9	31,0	3129	3,57	92,72	3,31	3128	3,25	84,31	2,74
03.04.2013	Mittw.och	3125	3127	3126	8,16	72,4	199	32,0	31,2	3129	3,57	92,72	3,31	3128	3,25	84,31	2,74
04.04.2013	Donnerstag	3160	3162	3161	8,65	80,2	203	32,3	31,2	3193	2,67	75,42	2,02	3192	2,36	76,98	1,82
05.04.2013	Freitag		3220	3219			220	32,0	31,6								
06.04.2013	Samstag		3236	3235			196	31,8	31,4								
07.04.2013	Sonntag	3273	3275	3274	8,86	77,1	220	28,0	31,3	3277	2,90	78,28	2,29	3276	3,03	81,19	2,46
08.04.2013	Montag	3330	3327	3326	7,69	74,5	219	26,4	36,0								
09.04.2013	Dienstag		3388	3387	5,68	50,3	154	26,4	36,0								
10.04.2013	Mittw.och	3386	3431	3430	6,56	74,0	173	28,8	31,2	3390	3,53	82,19	2,89	3389	3,71	85,91	3,19
11.04.2013	Donnerstag	3429	3454	3453	6,16	66,2	149	31,2	31,2								
12.04.2013	Freitag	3552	3482	3481			140	31,2	31,2	3456	3,7	82,79	3,06	3455	3,28	82,97	3,72
13.04.2013	Samstag	3553					176	31,2	31,2								
14.04.2013	Sonntag	3496	3498	3497	9,51	66,2	207	31,2	31,2								
15.04.2013	Montag	3534	3536	3535	8,41	87,7	190	31,2	31,2	3538	3,60	83,29	3,00	3537	3,72	85,01	3,17
16.04.2013	Dienstag	3583	3582	3582	7,32	67,5	197	31,2	31,2(?)								
17.04.2013	Mittw.och	3608	3610	3609	8,28	76,6	183	31,2	28,8	3612	3,73	82,21	3,07	3611	3,64	84,5	3,08
18.04.2013	Donnerstag	3653	3655	3654	9,12	79,7	181	33,6	28,8								
19.04.2013	Freitag		3689	3688			183	33,6	28,8	3691	3,71	84,16	3,12	3690	3,86	86,07	3,32
20.04.2013	Samstag		3707	3706			203	31,2	31,2								
21.04.2013	Sonntag	3721	3723	3722	9,46	75,2	224	31,2	31,2								
22.04.2013	Montag	3758	3760	3759	9,74	86,1	230	31,2	31,2	3762	3,58	83,25	2,98	3761	3,25	75,02	2,44
23.04.2013	Dienstag		3805	3804	8,82	72,8	229	31,2	31,2								
24.04.2013	Mittw.och	3838	3840	3839	8,81	85,8	210	31,2	31,2	3842	3,75	83,16	3,12	3741	3,63	83,83	3,04
25.04.2013	Donnerstag	3902	3904	3903	9,16	93,8	243	31,2	31,2								
26.04.2013	Freitag		3936	3935			156	31,2	31,2	3938	3,92	85,16	3,34	3937	3,89	86,32	3,36
27.04.2013	Samstag		3958	3957			147	31,2	31,2								
28.04.2013	Sonntag	3972	3974	3973	8,43	83,7	180	31,2	31,2								
29.04.2013	Montag	4008	4010	4009	8,49	93,8	181	31,2	31,2	4012	3,65	82,37	3,01	4011	3,62	83,81	3,03
30.04.2013	Dienstag		4049	4048													

Monatsbericht 04 / 2013		Nachklärung Ablauf Testanlage 2										Nachklärung Ablauf Kontrollanlage 1									
Datum	Tag	Lims-Nr.	Lims-Nr.	NH4-N [mg/l]	NO3-N [mg/l]	P-Ges. [mg/l]	TOC [mg/l]	DOC [mg/l]	NO2-N [mg/l]	Lims-Nr.	Lims-Nr.	NH4-N [mg/l]	NO3-N [mg/l]	P-Ges. [mg/l]	TOC [mg/l]	DOC [mg/l]	NO2-N [mg/l]				
01.04.2013	Montag	3063								3062											
02.04.2013	Dienstag	3094	3067	0,02	4,62	2,13	45	14	0,01	3093	3064	0,10	1,32	0,24	12	12	0,01				
03.04.2013	Mittwoch	3131		0,02	4,58	1,17	11	11		3130		0,03	3,83	1,40	11	11					
04.04.2013	Donnerstag	3164	3166	0,02	4,94	1,95	14	14	0,02	3163	3165	0,03	4,00	2,45	13	13	0,03				
05.04.2013	Freitag																				
06.04.2013	Samstag																				
07.04.2013	Sonntag	3279		0,01	4,88	2,10	19	18		3278		0,02	3,92	2,85	19	19					
08.04.2013	Montag	3329		0,03	3,93	2,33	20	18		3328	3280	0,03	3,75	2,99	21	20	0,02				
09.04.2013	Dienstag	3392		0,02	3,17	2,81	17	16		3391		0,03	2,82	1,85	17	16					
10.04.2013	Mittwoch	3433		0,015	3,05	3,62	17	16		3432		0,03	3,19	2,77	18	17					
11.04.2013	Donnerstag	3467	3435	0,014	3,29	3,37	14	14	0,01	3466	3434	0,03	2,72	2,54	15	14	0,013				
12.04.2013	Freitag																				
13.04.2013	Samstag																				
14.04.2013	Sonntag	3500		0,01	3,92	3,48	15	15		3499		0,02	3,31	3,17	15	15					
15.04.2013	Montag	3540	3542	0,02	4,49	1,65	16	16	0,013	3539	3541	0,03	3,74	1,78	17	17	0,023				
16.04.2013	Dienstag	3585		0,02	4,89	2,01	16	16		3584		0,04	3,87	2,20	18	18					
17.04.2013	Mittwoch	3614		0,02	4,63	2,77	18	16		3613		0,05	3,91	3,08	16	16					
18.04.2013	Donnerstag	3657	3659	0,027	5,13	3,43	17	17	0,024	3656	3658	0,06	4,65	3,61	18	17	0,036				
19.04.2013	Freitag																				
20.04.2013	Samstag																				
21.04.2013	Sonntag	3725		0,018	5,12	3,82	17	17		3724		0,03	4,29	3,92	18	18					
22.04.2013	Montag	3764	3766	0,033	5,02	1,70	19	19	0,015	3763	3765	0,05	4,12	2,00	20	20	0,022				
23.04.2013	Dienstag	3807		0,027	4,36	1,05	17	17		3806		0,05	3,93	1,44	17	17					
24.04.2013	Mittwoch	3844		0,031	3,85	1,45	17	17		3843		0,04	3,45	0,88	16	16					
25.04.2013	Donnerstag	3906	3908	0,032	3,59	1,40	17	17	0,025	3905	3907	0,05	2,90	2,20	17	17	0,027				
26.04.2013	Freitag																				
27.04.2013	Samstag																				
28.04.2013	Sonntag	3976		0,046	4,91	1,43	15	15		3975		0,05	4,05	1,90	15	15					
29.04.2013	Montag	4014	4016	0,018	4,71	2,00	11	11	0,016	4013	4015	0,03	4,40	2,72	11	11	0,017				
30.04.2013	Dienstag	4051								4050											

Anhang B: Routineanalytik Mai 2013

Monatsbericht 05 / 2013			=Aus K : Messen																
Datum	Tag	Lims-Nr.	Lims-Nr.	Ablauf Vorklämung						2		1		Belabung Testanlage 2			Belabung Kontrollanlage 1		
				Lims-Nr.	Pges [mg/l]	TNb [mg/l]	TOC [mg/l]	Testanlage Volumenstr. [m³/d]	Kontrollanlage Volumenstr. [m³/d]	Lims-Nr.	TS [mg/l]	GV [%]	oTS [mg/l]	Lims-Nr.	TS [mg/l]	GV [%]	oTS [mg/l]		
01.05.2013	Mitwoch	4113	4115	4114			174	31,2	31,2	4117			4116						
02.05.2013	Donnerstag	4143	4145	4144			194	31,2	31,2										
03.05.2013	Freitag		4168	4167			165	31,2	31,2	4170			4169						
04.05.2013	Samstag		4193	4192			167	31,2	31,2										
05.05.2013	Sonntag	4207	4209	4208	7,98	84,5	171	31,2	31,2										
06.05.2013	Montag	4250	4252	4251	8,96	77	177	31,2	31,2	4254			4253						
07.05.2013	Dienstag		4302	4301	5,98	45,3	124	31,2	31,2										
08.05.2013	Mitwoch	4329	4331	4330	6,41	60,4	150	31,2	31,2	4333			4332						
09.05.2013	Donnerstag	4356	4358	4357	7,33	74,1	177	31,2	31,2										
10.05.2013	Freitag		4380	4379			212	31,2	31,2	4382	3,65	83,9	3,06	4381	3,37	84,47	2,85		
11.05.2013	Samstag		4414	4413			211	31,2	31,2										
12.05.2013	Sonntag	4428	4430	4429	7,52	65,3	178	31,2	31,2										
13.05.2013	Montag	4464	4466	4465	6,83	52	161	31,2	31,2	4468	3,54	83,51	2,96	4467	3,45	85,6	2,95		
14.05.2013	Dienstag		4530	4529	7,8	63,5	202	31,2	31,2										
15.05.2013	Mitwoch	4551	4553	4553	8,25	74,6	197	31,2	31,2	4555	3,75	84,52	3,17	4554	3,58	86,06	3,08		
16.05.2013	Donnerstag	4595	4597	4596	7,57	47,8	148	31,2	31,2										
17.05.2013	Freitag		4621	4620			175	28,8	31,2	4623			4622						
18.05.2013	Samstag		4639	4638			182	28,8	31,2										
19.05.2013	Sonntag	4653	4655	4654	8,35	66,3	204	28,8	31,2										
20.05.2013	Montag	4685	4687	4686	6,58	49,9	150	28,8	31,2										
21.05.2013	Dienstag		4718	4717	6,66	56,6	171	28,8	31,2										
22.05.2013	Mitwoch	4759	4761	4760	3,49	38,6	104	31,2	31,2	4763	3,6	82,47	2,97	4762	3,07	81,37	2,49		
23.05.2013	Donnerstag	4816	4815	4814	4,88	35,8	109	31,2	31,2										
24.05.2013	Freitag		4814	4813			161	31,2	31,2										
25.05.2013	Samstag		4859	4858			193	31,2	31,2										
26.05.2013	Sonntag	4873	4875	4874	3,87	39,2	115	31,2	31,2										
27.05.2013	Montag	4911	4913	4912	7,92	64,4	188	31,2	31,2										
28.05.2013	Dienstag		4951	4950	7,64	67	197	33,6	31,2										
29.05.2013	Mitwoch	4972	4974	4973	4,38	34,1	108	33,6	31,2	4976	3,75	83,92	3,15	4975	3,51	84,46	2,97		
30.05.2013	Donnerstag	5000	5002	5001	5,42	51,4	127	33,6	31,2										
31.05.2013	Freitag		5025	5024			160	31,2	31,2										

Monatsbericht 05 / 2013										Nachklärung Ablauf Testanlage 2							Nachklärung Ablauf Kontrollanlage 1						
Datum	Tag	Lims-Nr.	Lims-Nr.	NH4-N [mg/l]	NO3-N [mg/l]	P-Ges. [mg/l]	TOC [mg/l]	DOC [mg/l]	NO2-N [mg/l]	Lims-Nr.	Lims-Nr.	NH4-N [mg/l]	NO3-N [mg/l]	P-Ges. [mg/l]	TOC [mg/l]	DOC [mg/l]	NO2-N [mg/l]						
01.05.2013	Mittwoch	4119	4149							4118	4148												
02.05.2013	Donnerstag	4147																					
03.05.2013	Freitag																						
04.05.2013	Samstag																						
05.05.2013	Sonntag	4211		0,478	3,18	2,66	10	10		4210		0,902	2,26	3,95	11	11							
06.05.2013	Montag	4256	4258	0,19	0,13				0,042	4255	4257	1,19	0,13				0,04						
07.05.2013	Dienstag	4303								4303													
08.05.2013	Mittwoch	4335								4334													
09.05.2013	Donnerstag	4360	4362	0,03	3,81	1,83	13	12		4359	4361	0,25	3,04	1,9	15	14							
10.05.2013	Freitag																						
11.05.2013	Samstag																						
12.05.2013	Sonntag	4432		0,021	3,88	1,12	15	14		4431		0,04	2,44	1,87	15	15							
13.05.2013	Montag	4470	4472	0,014	2,64	0,433	13	13	0,01	4469	4471	0,028	2,08	1,47	13	13	0,008						
14.05.2013	Dienstag	4532		0,015	4,06	0,701	13	13		4531		0,019	3,11	2,17	13	13							
15.05.2013	Mittwoch	4557		0,019	3,84	0,761	14	13		4556		0,022	2,84	2,16	14	13							
16.05.2013	Donnerstag	4999	4604	0,015	3,22	0,479	13	12		4598	4609	0,079	2,35	1,86	14	13							
17.05.2013	Freitag																						
18.05.2013	Samstag																						
19.05.2013	Sonntag	4657								4656													
20.05.2013	Montag	4689		0,034	2,75	2,11	15	13		4688		0,02	3,74	0,89	13	13							
21.05.2013	Dienstag	4720		0,024	2,91	1,4	13	12		4719		0,021	3,73	0,404	12	12							
22.05.2013	Mittwoch	4765		0,027	1,83	1,09	11	10		4764		0,016	1,88	0,33	10	10							
23.05.2013	Donnerstag	4817	4819	0,016	2,56	1,28	9	9	0,009	4816	4818	0,02	1,88	1,75	10	9	0,007						
24.05.2013	Freitag																						
25.05.2013	Samstag																						
26.05.2013	Sonntag	4877		0,008	3,15	1,24	11	10		4876		0,027	2,38	2,38	11	10							
27.05.2013	Montag	4915		0,012	4,01	1,87	11	10		4914		0,026	3,08	2,66	12	12							
28.05.2013	Dienstag	4953	72-h-DPN	0,015	3,31	1,13	12	12		4952	72-h-DPN	0,025	2,68	1,94	12	12							
29.05.2013	Mittwoch	4978							0,01	4977							0,011						
30.05.2013	Donnerstag	5004								5003													
31.05.2013	Freitag																						

Anhang C: Routineanalytik Juni 2013

Monatsbericht 06 / 2013			: =Aus K: Messen														
Datum	Tag	Lims-Nr.	Lims-Nr.	Lims-Nr.	Ablauf Vorklämung			2		1		Belegung Testanlage 2			Belegung Kontrollanlage 1		
					Pges [mg/l]	TNb [mg/l]	TOC [mg/l]	Testanlage Volumenstr. [m³/d]	Kontrollanlage Volumenstr. [m³/d]	Lims-Nr.	TS [mg/l]	GV [%]	OTS [mg/l]	Lims-Nr.	TS [mg/l]	GV [%]	OTS [mg/l]
01.06.2013	Samstag		5067	5066	7,05	67,4	140	31,2	31,2								
02.06.2013	Sonntag	5083	5085	5084	7,88	77,7	176	31,2	31,2								
03.06.2013	Montag	5120	5122	5121	7,88	77,7	210	31,2	31,2								
04.06.2013	Dienstag		5175	5174	7,40	62,8	214	31,2	31,2								
05.06.2013	Mittwoch	5199	5001	5200	8,21	72,7	221	31,2	31,2	5203	3,75	82,81	3,11	5202	3,36	83,87	2,81
06.06.2013	Donnerstag	5232	5284	5233	7,98	72,8	211	31,2	31,2								
07.06.2013	Freitag						206	31,2	31,2								
08.06.2013	Samstag						200	31,2	31,2								
09.06.2013	Sonntag	5308			8,21	74,3	212	31,2	31,2								
10.06.2013	Montag	5342			8,00	74,6	227	31,2	31,2								
11.06.2013	Dienstag				7,28	66	236	31,2	31,2								
12.06.2013	Mittwoch	5428			8,49	73,4	220	31,2	31,2	5430	3,99	82,5	3,29	5429	3,65	83,53	3,05
13.06.2013	Donnerstag	5456			6,94	58,9	180	31,2	31,2								
14.06.2013	Freitag						182	31,2	31,2								
15.06.2013	Samstag						172	31,2	31,2								
16.06.2013	Sonntag	5507			8,76	77,4	204	31,9	31,7								
17.06.2013	Montag	5543					219	31,9	31,7								
18.06.2013	Dienstag				7,96	63,5	175	31,9	31,7								
19.06.2013	Mittwoch	5614			8,21	75,4	176	31,9	31,7	5616	3,79	85,63	3,25	5615	3,39	85,97	2,91
20.06.2013	Donnerstag	5649			5,39	42,2	134	32,6	31,2								
21.06.2013	Freitag						132	32,2	30,2								
22.06.2013	Samstag						189	32,2	30,2								
23.06.2013	Sonntag	5704			8,95	67,6	208	32,2	30,2								
24.06.2013	Montag	5739			8,66	62,5	216	31,9	31,0	5741	2,94			5740	2,91		
25.06.2013	Dienstag				7,50	63,4	184	31,9	31,0								
26.06.2013	Mittwoch	5797			9,57	75,7	180	31,9	31,0	5799	3,01	80,92	2,43	5798	2,77	82,54	2,23
27.06.2013	Donnerstag	5824			7,04	55,8	142	30,5	31,0								
28.06.2013	Freitag						112	29,8	31,0								
29.06.2013	Samstag						94	29,8	31,0								
30.06.2013	Sonntag	5892			7,74	69,2	160	29,8	31,0								

Monatsbericht 06 / 2013		Nachklärung Ablauf Testanlage 2							Nachklärung Ablauf Kontrollanlage 1							BS Testanl. 2		BS Testanl. 1						
Datum	Tag	Lims-Nr.	Lims-Nr.	NH4-N [mg/l]	N03-N [mg/l]	P-Ges. [mg/l]	TOC [mg/l]	DOC [mg/l]	NO2-N [mg/l]	Lims-Nr.	Lims-Nr.	NH4-N [mg/l]	N03-N [mg/l]	P-Ges. [mg/l]	TOC [mg/l]	DOC [mg/l]	NO2-N [mg/l]	Schl.-V [ml/l]	SVI [ml/g]	Schl.-V [ml/l]	SVI [ml/g]			
01.06.2013	Samstag																							
02.06.2013	Sonntag	5087		0,011	3,78	1,09	12	12		5086		0,034	3,15	1,83	13	13								
03.06.2013	Montag	5124		0,023	4,24	0,46	15	14		5123		0,038	3,68	1,24	16	16								
04.06.2013	Dienstag	5177		0,029	3,98	0,32	16	16		5176		0,03	3,54	0,951	18	18								
05.06.2013	Mittwoch	5205		0,02	3,7	0,24	17	17		5204		0,02	3,27	0,86	18	18								
06.06.2013	Donnerstag	5236	5238	0,02	4,01	0,2	15	15	0,001	5235	5237	0,03	2,39	0,347	16	16	0,001							
07.06.2013	Freitag																							
08.06.2013	Samstag																							
09.06.2013	Sonntag	5310		0,02	3,42	0,47	16	15		5309		0,042	3,22	1,00	18	17								
10.06.2013	Montag	5344		0,031	4,23	0,386	14	14		5643		0,039	3,75	0,6	17	16								
11.06.2013	Dienstag	5397		0,029	3,95	0,221	15	15		5396		0,047	3,62	0,396	17	17								
12.06.2013	Mittwoch	5432		0,027	4,35	0,23	15	15		5431		0,036	3,9	0,42	19	18								
13.06.2013	Donnerstag	5458	5460	0,032	4,11	0,26	12	12	0,015	5457	5459	0,034	3,61	0,586	15	15	0,02							
14.06.2013	Freitag																							
15.06.2013	Samstag																							
16.06.2013	Sonntag	5509		0,032	4,01	0,51	14	13		5508		0,04	3,3	1,17	15	14								
17.06.2013	Montag	5545	72-h-DPN	0,022	4,54	0,754	14	14		5544	72-h-DPN	0,045	3,28	1,54	16	15								
18.06.2013	Dienstag	5589	5589	0,022	4,54	0,754	14	14		5587	5587	0,045	3,28	1,54	16	15								
19.06.2013	Mittwoch	5618	5618	0,022	4,54	0,754	14	14		5617	5617	0,045	3,28	1,54	16	15								
20.06.2013	Donnerstag	5651	5653	0,042	4,2	2,26	13	11	0,014	5650	5652	0,042	3,16	3,13	13	12	0,023							
21.06.2013	Freitag																							
22.06.2013	Samstag																							
23.06.2013	Sonntag	5706		0,022	3,88	2,62	13	12		5705		0,04	3,02	3,1	15	13								
24.06.2013	Montag	5743		0,016	3,8	0,506	16	15		5742		0,026	2,85	1,06	18	16		560	190		470	162		
25.06.2013	Dienstag	5778		0,021	3,78	0,243	15	15		5777		0,031	2,99	0,434	17	16								
26.06.2013	Mittwoch	5801		0,023	4,92	0,377	13	12		5800		0,037	3,78	0,903	14	13								
27.06.2013	Donnerstag	5826	5828	0,03	3,67	1,01	10	9,8	0,011	5827	5825	0,038	2,85	1,90	12	11	0,01							
28.06.2013	Freitag																							
29.06.2013	Samstag																							
30.06.2013	Sonntag	5894		0,023	3,62	2,32	9,1	8,1		5893		0,038	2,85	2,73	9,8	9,4								

Anhang D: Routineanalytik Juli 2013

Monatsbericht 07 / 2013		:-Aus K : Messen															
Datum	Tag	Lims-Nr.	Lims-Nr.	Lims-Nr.	Ablauf Vorklärrung			2		1		Belebung Testanlage 2 (Mikroskopie mittwochs)			Belebung Kontrollanlage 1 (Mikroskopie mittwochs)		
					Pges [mg/l]	TNb [mg/l]	TOC [mg/l]	Testanlage Volumenstr. [m³/d]	Kontrollanlage Volumenstr. [m³/d]	Lims-Nr.	TS [g/l]	GV [%]	oTS [g/l]	Lims-Nr.	TS [g/l]	GV [%]	oTS [g/l]
01.07.2013	Montag	5989			8,15	72,1	172	33,4	32,6			3,31			2,84		
02.07.2013	Dienstag				7,50	71,8	176	33,4	32,6								
03.07.2013	Mittwoch	6092			4,93	48,3	118	32,6	33,8	6094	3,13	80,07	2,51	6093	2,55	80,75	2,06
04.07.2013	Donnerstag	6132			6,49	67,3	180	32,6	32,2								
05.07.2013	Freitag						163	32,6	32,2								
06.07.2013	Samstag						175	32,6	32,2								
07.07.2013	Sonntag	6193			7,73	74,7	188	32,6	32,2								
08.07.2013	Montag	6228			7,36	67,6	198	32,6	32,2			3,08			2,92		
09.07.2013	Dienstag				6,12	54,9	153	32,6	32,2								
10.07.2013	Mittwoch	6302			7,65	73,2	218	32,6	32,2	6304	3,02	80,7	2,44	6303	2,89	82,38	2,34
11.07.2013	Donnerstag	6339			8,12	77,7	216	32,6	32,2								
12.07.2013	Freitag						183	32,6	32,2								
13.07.2013	Samstag						169	32,6	32,2								
14.07.2013	Sonntag	6391			7,87	69,8	186	32,6	32,2								
15.07.2013	Montag	6428			7,46	77,8	174	32,2	32,6			3,03			2,83		
16.07.2013	Dienstag				9,40	70,6	181	32,6	32,2								
17.07.2013	Mittwoch	6522			8,07	79,0	192	32,6	32,2	6524	3,27	82,42	2,70	6523	2,68	83,41	2,24
18.07.2013	Donnerstag	6575			7,69	82,2	190	32,6	32,2								
19.07.2013	Freitag						64	35,0	32,2								
20.07.2013	Samstag						165	35,0	32,2								
21.07.2013	Sonntag	6635			7,85	82,2	189	35,0	32,2								
22.07.2013	Montag	6673			7,79	71,2	192	32,6	32,2			2,56			2,55		
23.07.2013	Dienstag				5,96	59,9	158	32,6	32,2								
24.07.2013	Mittwoch	6740			6,89	67,7	177	32,6	32,2	6742	2,81	82,21	2,31	6741	2,88	82,99	2,39
25.07.2013	Donnerstag	6765			3,63	36,6	86	32,6	32,2								
26.07.2013	Freitag						117	30,5	32,2								
27.07.2013	Samstag						113	30,5	32,2								
28.07.2013	Sonntag	6818			5,66	70,5	127	30,5	32,2								
29.07.2013	Montag	6855	72-h-DFN-Sp.-St.		6,49	68,5	150	32,8	32,2			2,84			2,74		
30.07.2013	Dienstag				5,08	58,6	149	32,8	32,2								
31.07.2013	Mittwoch	6916			5,54	61,9	136	32,9	32,2	6918	3,04	81,62	2,48	6917	2,65	82,59	2,19

Monatsbericht 07 / 2013		Nachklärung Ablauf Testanlage 2										Nachklärung Ablauf Kontrollanlage 1										BS Testanl. 2 BS Kontrollanl.				
Datum	Tag	Lims-Nr.	Lims-Nr.	NH4-N [mg/l]	NO3-N [mg/l]	P-Ges. [mg/l]	TOC [mg/l]	DOC [mg/l]	NO2-N [mg/l]	Lims-Nr.	Lims-Nr.	NH4-N [mg/l]	NO3-N [mg/l]	P-Ges. [mg/l]	TOC [mg/l]	DOC [mg/l]	NO2-N [mg/l]	Schl.-V [ml/l]	SVI [ml/g]	Schl.-V [ml/l]	SVI [ml/g]					
01.07.2013	Montag	5993	72h DPN	0,031	4,42	1,71	10	10		5992	72h DPN	0,034	3,31	2,39	12	10		530	160	460	162					
02.07.2013	Dienstag	6050								6049								591		590						
03.07.2013	Mittw och	6096								6095																
04.07.2013	Donnerstag	6134	6136	0,036	4,03	2,44	12	11	0,009	6133	6135	0,045	3,17	2,72	13	12	0,007									
05.07.2013	Freitag																									
06.07.2013	Samstag																									
07.07.2013	Sonntag	6195		0,033	4,76	1,69	15	14		6194		0,042	3,75	2,57	16	14										
08.07.2013	Montag	6232	72h DPN	0,03	4,37	0,857	16	16		6231	72h DPN	0,045	3,53	1,25	19	17		440	143	420	144					
09.07.2013	Dienstag	6265								6264								6230		6229						
10.07.2013	Mittw och	6306								6305																
11.07.2013	Donnerstag	6341	6343	0,034	4,62	0,397	16	15	0,013	6340	6342	0,032	4,00	0,65	17	16	0,012									
12.07.2013	Freitag																									
13.07.2013	Samstag																									
14.07.2013	Sonntag	6393		0,036	5,05	0,624	17	16		6392		0,041	4,19	1,15	20	17										
15.07.2013	Montag	6432	72h DPN							6431	72h DPN	0,039	4,19	2,09	16	15		420	139	480	170					
16.07.2013	Dienstag	6492								6491								6430		6429						
17.07.2013	Mittw och	6526								6525																
18.07.2013	Donnerstag	6577	6579	0,041	4,94	1,28	14	13	0,013	6576	6578	0,047	4,38	2,38	15	15	0,013									
19.07.2013	Freitag																									
20.07.2013	Samstag																									
21.07.2013	Sonntag	6637		0,038	5,08	1,09	15	14		6636		0,041	4,28	2,08	16	15										
22.07.2013	Montag	6677	72h DPN	0,043	4,28	0,877	18	15		6676	72h DPN	0,054	3,94	1,67	16	16		360	141	400	156					
23.07.2013	Dienstag	6721								6720								6675		6674						
24.07.2013	Mittw och	6744								6743																
25.07.2013	Donnerstag	6767	6769	0,049	3,62	1,19	14	13	0,011	6766	6768	0,049	3,03	2,09	15	15	0,01									
26.07.2013	Freitag																									
27.07.2013	Samstag																									
28.07.2013	Sonntag	6820		0,043	4,27	2,73	12	11		6819		0,055	3,64	3,38	14	12										
29.07.2013	Montag	6859	72h DPN	0,029	4,64	2,71	11	11		6858	72h DPN	0,038	3,82	3,2	13	13		360	127	400	146					
30.07.2013	Dienstag	6894																6857		6856						
31.07.2013	Mittw och	6920								6919																

Anhang E: Routineanalytik August 2013

Monatsbericht 08 / 2013			:Aus KM : Messen				Ablauf Vorklärung		Belabung Testanlage 2			Belabung Kontrollanlage 1					
Datum	Tag	Lims-Nr.	Lims-Nr.	Lims-Nr.	Pges [mg/l]	TNb [mg/l]	TOC [mg/l]	Testanlage 2 Volumenstr. [m³/d]	Kontrollanlage Volumenstr. [m³/d]	Lims-Nr.	TS [g/l]	GV [%]	oTS [g/l]	Lims-Nr.	TS [g/l]	GV [%]	oTS [g/l]
01.08.2013	Donnerstag	6982			6,73	65,4	170	32,8	32,2								
02.08.2013	Freitag						137	32,9	32,2								
03.08.2013	Sonntag						131	32,9	32,2								
04.08.2013	Sonntag	7046			6,82	66,1	185	32,9	32,2								
05.08.2013	Montag	7082	72h DPN		6,34	62,1	193	32,9	32,2	7084	2,96			7083	2,54		
06.08.2013	Dienstag				6,38	64,2	164	32,9	32,2								
07.08.2013	Mittwoch	7150			6,67	63,5	176	32,2	31,4	7152	3,1	82,34	2,55	7151	2,76	84,24	2,33
08.08.2013	Donnerstag	7175			6,46	63,0	171	32,2	31,4								
09.08.2013	Freitag						156	32,2	31,4								
10.08.2013	Sonntag						152	32,2	31,4								
11.08.2013	Sonntag	7229			6,74	70,3	157	32,2	31,4								
12.08.2013	Montag	7264	72h DPN		6,71	64,7	149	31,4	32,2	7266	2,98			7265	2,71		
13.08.2013	Dienstag				7,12	71,4	181	31,4	32,2								
14.08.2013	Mittwoch	7338			7,21	68	190	31,4	32,2	7340	2,72	80,74	2,2	7339	2,61	82,19	2,15
15.08.2013	Donnerstag	7368			7,44	65,7	185	31,4	32,2								
16.08.2013	Freitag						169	31,4	32,2								
17.08.2013	Sonntag						200	31,4	32,2								
18.08.2013	Sonntag	7454			6,49	55,7	161	31,4	32,2								
19.08.2013	Montag	7492			4,66	49,3	110	31,4	32,2	7494	2,79			7493	2,35		
20.08.2013	Dienstag	7561	72h DPN		6,6	69,5	203	31,4	32,2								
21.08.2013	Mittwoch	7554			8,83	70,9	271	32,2	31,4	7556	2,9	81,1	2,35	7555	2,21	79,7	1,76
22.08.2013	Donnerstag	7598			8,77	69,8	242	32,9	32,9								
23.08.2013	Freitag						204	32,9	28,1								
24.08.2013	Sonntag						175	32,9	28,1								
25.08.2013	Sonntag	7648			5,38	48,9	134	32,9	28,1								
26.08.2013	Montag	7684	72h DPN		6,00	59,2	175	32,9	33,4	7686	2,95			7685	2,60		
27.08.2013	Dienstag				7,18	70,5	204	32,9	33,4								
28.08.2013	Mittwoch	7748			8,36	68,1	232	32,9	32,9	7750	2,99	84,0	2,51	7749	2,57	80,0	2,07
29.08.2013	Donnerstag	7786			8,48	69,3	209	33,4	32,9								
30.08.2013	Freitag						194										
31.08.2013	Sonntag						174										

Monatsbericht 08 / 2013													Nachklärung Ablauf Testanlage 2					Nachklärung Ablauf Kontrollanlage 1					BS Testanl. 2 BS Kontrollanl.				
Datum	Tag	Lims-Nr.	Lims-Nr.	NH4-N [mg/l]	NO3-N [mg/l]	P-Ges. [mg/l]	TOC [mg/l]	DOC [mg/l]	NO2-N [mg/l]	Lims-Nr.	Lims-Nr.	NH4-N [mg/l]	NO3-N [mg/l]	P-Ges. [mg/l]	TOC [mg/l]	DOC [mg/l]	NO2-N [mg/l]	Schl.-V [ml/l]	SVI [ml/g]	Schl.-V [ml/l]	SVI [ml/g]						
01.08.2013	Donnerstag	6984	6987	0,026	3,71	2,62	16	15	0,011	6983	6986	0,026	3,71	2,62	16	15	0,009										
02.08.2013	Freitag																										
03.08.2013	Samstag																										
04.08.2013	Samstag	7046		0,029	4,39	1,19	14	14		7047		0,041	3,55	1,56	17	16											
05.08.2013	Montag	7082	72h DPN	9,64	2,46	4,22	16	16		7085	72h DPN	10,6	1,96	5,61	19	14		360	122	400	157						
06.08.2013	Dienstag	7130								7129																	
07.08.2013	Mittw. och	7154								7153																	
08.08.2013	Donnerstag	7177	7179	0,79	5,23	<0,5	12	10	0,419	7176	7178	1,34	4,27	<0,5	13	12	0,753										
09.08.2013	Freitag									Sp08.08	Sp09.08	6,59	6,97														
10.08.2013	Samstag									Sp09.08	Sp08.08	0,022	3,31														
11.08.2013	Samstag	7231		0,027	4,62	0,18	11	10		7230		0,039	3,69	0,263	13	12											
12.08.2013	Montag	7268	72h DPN	0,023	4,46	0,258	11	11		7267	72h DPN	0,025	3,46	0,505	12	11		360	121	380	140						
13.08.2013	Dienstag	7306								7305																	
14.08.2013	Mittw. och	7342								7341																	
15.08.2013	Donnerstag	7370	7372	0,059	4,65	0,36	12	12	0,01	7369	7371	0,044	3,72	0,695	14	13	0,012										
16.08.2013	Freitag																										
17.08.2013	Samstag																										
18.08.2013	Samstag	7456		0,043	4,31	0,756	14	14		7455		0,039	3,36	1,30	15	15											
19.08.2013	Montag	7531								7530								320	115	340	115						
20.08.2013	Dienstag	7496	72h DPN	0,045	3,59	0,847	14	13		7495	72h DPN	0,03	2,89	1,10	16	15											
21.08.2013	Mittw. och	7558								7557																	
22.08.2013	Donnerstag	7591	7593						0,012	7590	7592						0,012										
23.08.2013	Freitag																										
24.08.2013	Samstag																										
25.08.2013	Sonntag	7650		0,028	3,50	0,283	15	14		7649		0,02	3,11	0,322	17	16											
26.08.2013	Montag	7688	72h DPN	0,057	4,02	0,825	14	14		7687	72h DPN	0,029	3,48	1,42	15	15		340	115	360	138						
27.08.2013	Dienstag	7725								7724																	
28.08.2013	Mittw. och	7752								7751																	
29.08.2013	Donnerstag	7788	7790	0,035	4,17	0,606	16	16	0,013	7784	7789	0,032	3,76	0,983	17	17	0,013										
30.08.2013	Freitag																										
31.08.2013	Samstag																										

Anhang F: Routineanalytik September 2013

Monatsbericht 09 / 2013			: =Aus K : Messen			Ablauf Vorklä rung			2			1			Belebung Testanlage 2			Belebung Kontrollanlage 1		
Datum	Tag	Lims-Nr.	Lims-Nr.	Lims-Nr.	Pges [mg/l]	TNB [mg/l]	TOC [mg/l]	Testanlage Volumenstr. [m³/d]	Kontrollanlage Volumenstr. [m³/d]	Lims-Nr.	TS [g/l]	GV [%]	OTS [g/l]	Lims-Nr.	TS [g/l]	GV [%]	OTS [g/l]			
01.09.2013	Sonntag	7872			8,07	71,0	199	32,9	33,4											
02.09.2013	Montag	7913	72-h-DPN f.	Spurenst.	8,37	70,9	253	32,9	33,4	7915	2,78			7914	2,47					
03.09.2013	Dienstag				7,98	72,6	234	30,5	30,5											
04.09.2013	Mittw och	7978	7978		8,74	72,6	254	30,7	31,2	7980	2,75	81	2,23	7979	2,55	81,2	2,07			
05.09.2013	Donnerstag	8015			8,54	69,0	244	30,7	31,2											
06.09.2013	Freitag						143	30,7	31,2											
07.09.2013	Samstag						136	30,7	31,2											
08.09.2013	Sonntag	8086			3,76	38,3	100	30,7	31,2											
09.09.2013	Montag	8121	(Regen->keine 72h DP		4,16	38,3	109	30,7	31,2	8123	2,87			8122	2,63					
10.09.2013	Dienstag	8185	(Regen->keine 72h DP		4,52	39,4	114	29,9	30,7											
11.09.2013	Mittw och	8230	(Regen->keine 72h DP		4,16	40,8	116	30,7	31,7	8232	2,73	79,63	2,17	8231	2,71	81,22	2,2			
12.09.2013	Donnerstag	8273			5,62	49,8	139	31,7	31,2											
13.09.2013	Freitag						181	31,4	31,0											
14.09.2013	Samstag						113	31,4	31,0											
15.09.2013	Sonntag	8337			6,7	59,4	165	31,4	31,0											
16.09.2013	Montag	8374	(Regen->keine 72h DP		4,45	36,4	112	31,4	31,0	8376	2,77			8375	2,81					
17.09.2013	Dienstag				6,4	54,0	166	31,7	30,7											
18.09.2013	Mittw och	8440			5,86	54,8	143	31,7	30,7	8442	2,88	80,69	2,32	8441	2,87	80,2	2,31			
19.09.2013	Donnerstag	8467			7,41	76,6	178	31,7	33,1											
20.09.2013	Freitag	8585	DPN f.	Spurenst.			170	31,7	33,1											
21.09.2013	Samstag						215	31,7	33,1											
22.09.2013	Sonntag	8542			10,2	71,9	230	31,7	33,1											
23.09.2013	Montag	8579			9,8	65,0	243	31,7	33,1	8581	2,79			8580	2,85					
24.09.2013	Dienstag	8759	72-h-DPN f.	Spurenst.	8,56	72,4	224	31,7	33,1											
25.09.2013	Mittw och	8689			9,27	73,3	229	31,0	31,9	8691	2,95	80,81	2,38	8690	2,91	83,23	2,42			
26.09.2013	Donnerstag	8731			9,84	81,6	283	30,7	31,9											
27.09.2013	Freitag	8831	72-h-DPN f.	Spurenst.			253	30,7	31,9											
28.09.2013	Samstag						193	30,7	31,9											
29.09.2013	Sonntag	8790			8,81	75,2	209	30,7	31,9											
30.09.2013	Montag	8826			9,58	76,3	240	30,7	31,9	8828	2,56			8827	2,67					

Monatsbericht 09 / 2013		Nachklärung Ablauf Testanlage 2										Nachklärung Ablauf Kontrollanlage 1										BS Testanl. 2 BS Kontrollanl.					2		1			
Datum	Tag	Lims-Nr.	Lims-Nr.	NH4-N	N03-N	P-Ges.	TOC	DOC	NO2-N	Lims-Nr.	Lims-Nr.	NH4-N	N03-N	P-Ges.	TOC	DOC	NO2-N	Schl.-V	SVI	Schl.-V	SVI	Schl.-V	SVI	Abf. Testanlag	Abf. Kontrolle	AFS	AFS					
				[mg/l]	[mg/l]	[mg/l]	[mg/l]	[mg/l]	[mg/l]			[mg/l]	[mg/l]	[mg/l]	[mg/l]	[mg/l]	[mg/l]	[ml/l]	[ml/g]	[ml/l]	[ml/g]	[ml/l]	[ml/g]	[mg/l]	[mg/l]	[mg/l]	[mg/l]					
01.09.2013	Sonntag	7874		0,056	4,47	0,916	17	15		7873		0,047	3,65	1,56	17	16		300	108	360	146											
02.09.2013	Montag	7917	72-DPN	0,044	4,88	0,802	16	16		7916	72DPN	0,047	3,79	1,05	16	16																
03.09.2013	Dienstag	7960								7959																						
04.09.2013	Mittwoch	7982								7981																						
05.09.2013	Donnerstag	8017	8019	0,058	4,27	0,795	17	16	0,021	8016	8018	0,06	3,17	0,868	17	16	0,018															
06.09.2013	Freitag																															
07.09.2013	Samstag																															
08.09.2013	Sonntag	8088		0,055	3,81	2,86	14	14		8087		0,053	3,13	2,52	14	14																
09.09.2013	Montag	8125	(Regen)	0,087	3,44	5,05	11	9,9		8124	(Regen)	0,046	2,75	4,36	10	10		280	98	360	137				4,7	2,6						
10.09.2013	Dienstag	8185	(Regen)	0,035	2,97	5,11	8,2	8,2		8184	(Regen)	0,033	2,45	4,4	8,2	8,2										2,0	1,1					
11.09.2013	Mittwoch	8234	(Regen)	0,039	2,61	4,87	9,4	9,4		8233	(Regen)	0,03	2,19	4,36	9,1	9,1										2,1	1,6					
12.09.2013	Donnerstag	8275	8277	0,037	3,49	4,77	9,6	9,6	0,11	8274	8276	0,035	2,83	4,4	9,7	9,6	0,009									3,2	2,7					
13.09.2013	Freitag																															
14.09.2013	Samstag																															
15.09.2013	Sonntag	8339		0,04	3,59	2,89	12	12		8338		0,034	3,06	3,03	11	11											2,2	2,8				
16.09.2013	Montag	8378	(Regen)	0,035	2,25	2,66	10	8,6		8377	(Regen)	0,025	1,96	2,88	8,9	8,9		280	101	380	135					2,9	2,4					
17.09.2013	Dienstag	8420		0,034	3,48	3,45	9,9	8,9		8419		0,026	3,02	3,36	9	8,5											3,2	3,1				
18.09.2013	Mittwoch	8444		0,041	2,83	2,82	9,8	8,6		8443		0,025	2,36	2,82	8,6	8,2											3,4	4,5				
19.09.2013	Donnerstag	8469	8471	0,05	4,04	3,21	9,1	8,6	0,014	8468	8470	0,03	3,36	3,10	8,3	8,3	0,01										2,0	1,7				
20.09.2013	Freitag		8586	72-h-DPN						8587	72-h-DPN																					
21.09.2013	Samstag																															
22.09.2013	Sonntag	8544		0,027	4,43	1,36	12	12		8543		0,007	4,09	2,37	12	12												3,1	3,4			
23.09.2013	Montag	8583		0,038	4,21	1,02	11	11		8582		0,018	3,56	1,63	10	10		253	91	360	126						4,7	3,8				
24.09.2013	Dienstag	8638	72-h-DPN	0,06	4,96	0,99	9,9	9,8		8637	72-h-DPN	1,71	3,61	2,74	10	10											7,6	6,9				
25.09.2013	Mittwoch	8693								8692																						
26.09.2013	Donnerstag	8733	8735						0,031	8732	8734						0,033															
27.09.2013	Freitag	8792	72-h-DPN	0,065	5,25	0,768	14	12		8791	72-h-DPN	0,037	4,00	0,688	13	11												6,5	6,1			
28.09.2013	Samstag																															
29.09.2013	Sonntag																															
30.09.2013	Montag	8830		0,055	5,05	1,1	13	11		8829		0,038	3,94	1,64	12	9,6		260	102	340	127						5,8	5,3				

Anhang G: Routineanalytik Oktober 2013

Monatsbericht 10 / 2013				-Ausl.: Messen				Ablauf Vorklämung				Belebung Testanlage 2				Belebung Kontrollanlage 1			
Datum	Tag	Lims-Nr.	Lims-Nr.	Pges [mg/l]	TNb [mg/l]	TOC [mg/l]	Testanlage 2 Volumenstr. [m³/d]	Kontrollanlage Volumenstr. [m³/d]	Lims-Nr.	TS [g/l]	GV [%]	oTS [g/l]	Lims-Nr.	TS [g/l]	GV [%]	oTS [g/l]			
01.10.2013	Dienstag	8956	72-h-DPN	8,8	69,5	223	31,9	29,8	8956	2,79	79,38	2,22	8955	2,76	80,31	2,22			
02.10.2013	Mittwoch	8954		8,73	77,2	222	31,9	29,8											
03.10.2013	Donnerstag	8977		8,55	81,5	203	31,9	29,8											
04.10.2013	Freitag	9084	72-h-DPN			187	31,9	29,8											
05.10.2013	Samstag					171	31,9	29,8											
06.10.2013	Sonntag	9039		8,07	59,8	196	31,9	29,8											
07.10.2013	Montag	9078	72-h-DPN	8,1	76,0	196	31,9	31,0	9080	2,69			9079	2,83					
08.10.2013	Dienstag			7,88	736,0	192	31,0	31,9											
09.10.2013	Mittwoch	9149		8,45	66,0	187	31,0	32,2	9151	2,83	84,45	2,33	9150	2,82	82,47	2,33			
10.10.2013	Donnerstag	9202		6,49	65,5	147	31,0	32,2											
11.10.2013	Freitag					140	31,0	30,0											
12.10.2013	Samstag					186	31,0	30,0											
13.10.2013	Sonntag	9265		12,8	63,8	288	31,0	30,0											
14.10.2013	Montag	9301	72-h-DPN	7,6	62,7	195	31,0	30,0	9303	3,18			9302	3,09					
15.10.2013	Dienstag		entfällt	7,56	42,2	161	30,7	31,0											
16.10.2013	Mittwoch	9386		7,23	54,4	182	30,7	30,7	9388	3,12	84,4	2,63	9387	3,00	84,3	2,53			
17.10.2013	Donnerstag	9459		6,82	52,6	188	30,7	31,0											
18.10.2013	Freitag	9560	72-h-DPN			202	31,0	33,6											
19.10.2013	Samstag					217	31,0	33,6											
20.10.2013	Sonntag	9517		8,73	67,5	225	31,0	33,6											
21.10.2013	Montag	9554	72-h-DPN	8,81	70,6	225	30,7	31,0	9556	2,71			9555	2,80					
22.10.2013	Dienstag			8,22	69,2	235	32,4	29,8											
23.10.2013	Mittwoch	9622		5,59	45,5	165	32,4	29,8	9624	3,26	81,6	2,66	9623	2,94	81,7	2,40			
24.10.2013	Donnerstag	9653		7,53	61,3	219	31,7	31,0											
25.10.2013	Freitag					219	28,6	31,0											
26.10.2013	Samstag					140	-	-											
27.10.2013	Sonntag	9706		7,43	63,8	178	-	-											
28.10.2013	Montag	9744		6,02	48,4	153	-	-	9746	2,67			9745	2,57					
29.10.2013	Dienstag			7,84	71,1	200	-	29,8											
30.10.2013	Mittwoch	9798		8,38	75,9	197	-	-	9800	2,52	80,1	20,2	9799	2,48	79,5	1,97			
31.10.2013	Donnerstag	9826				204													

Monatsbericht 10 / 2013										Nachklärung Ablauf Testanlage 2					Nachklärung Ablauf Kontrollanlage 1					BS Testanl. BS Kontrolla					2		1	
Datum	Tag	Lims-Nr.	Lims-Nr./NH4-NN03-N ² -Ges.	TOC	DOC	NO2-N	Lims-Nr.	Lims-Nr./NH4-NN03-N ² -Ges	TOC	DOC	NO2-N	Schl.-V	SVI	Schl.-V	SVI	Schl.-V	SVI	Abi. Tester	Abi. Kontrolle	AFS	AFS							
			[mg/l]	[mg/l]	[mg/l]	[mg/l]		[mg/l]	[mg/l]	[mg/l]	[mg/l]	[ml/l]	[ml/g]	[ml/l]	[ml/g]	[ml/l]	[ml/g]			[mg/l]	[mg/l]							
01.10.2013	Dienstag	8927	72-h-DPN	0,05	5,14	0,75	13	13	8926	72-h-DPN	0,03	3,99	1,3	13	12					4,4	3,9							
02.10.2013	Mittwoch	8958							8957																			
03.10.2013	Donnerstag								8979	72-h-DPN																		
04.10.2013	Freitag	8980	72-h-DPN																									
05.10.2013	Samstag																											
06.10.2013	Sonntag	9041		0,05	3,92	1,57	10	10	9040		0,03	3,26	2,7	9,8	9,8					4,4	5,0							
07.10.2013	Montag	9082	72-h-DPN	0,04	5,39	1,97	9,5	9,5	9081	72-h-DPN	0,03	4,51	3,2	11	10	260	96	340	120	1,8	4,2							
08.10.2013	Dienstag	9120							9119																			
09.10.2013	Mittwoch	9153							9152																			
10.10.2013	Donnerstag	9204		0,06	3,74	2,68	9,2	9	9203		0,06	3,24	4	10,3	9,8					4,3	6,9							
11.10.2013	Freitag																											
12.10.2013	Samstag																											
13.10.2013	Sonntag	9267		0,03	3,99	3,00	11	10	9266		0,03	3,23	3,5	12	11					2,1	2,2							
14.10.2013	Montag	9305	72-h-DPN	0,04	3,35	1,56	12	12	9304	72-h-DPN	0,04	2,97	2,6	14	14	320	101	360	116	3,4	5,8							
15.10.2013	Dienstag	9362	entfällt						9361	entfällt																		
16.10.2013	Mittwoch	9390							9389																			
17.10.2013	Donnerstag	9461		0,04	3,10	1,57	14	12	9460		0,04	2,78	3	15	14					4,3	6,5							
18.10.2013	Freitag	9562	72-h-DPN	0,03	3,36	1,60	16	13	9561	72-h-DPN	0,03	3,96	0,67	14	12					4,7	4,2							
19.10.2013	Samstag																											
20.10.2013	Sonntag	9519							9518																			
21.10.2013	Montag	9558	72-h-DPN	0,04	3,30	0,38	9,8	9,8	9557	72-h-DPN	0,04	3,11	1	13	13	340	125	380	136	2,4	3,7							
22.10.2013	Dienstag	9594							9493																			
23.10.2013	Mittwoch	9626							9625																			
24.10.2013	Donnerstag	9655		0,05	3,33	0,52	9,7	9,7	9654		0,04	3,07	2	13	12					3,6	5,6							
25.10.2013	Freitag	9708	72-h-DPN	0,05	3,30	0,32	13	11	9707	72-h-DPN	0,04	2,91	1,2	15	12					4,8	5,6							
26.10.2013	Samstag																											
27.10.2013	Sonntag																											
28.10.2013	Montag	9748	72-h-DPN	0,29	3,77	0,62	8,2	8,2	9747	72-h-DPN	0,55	3,35	1,4	10	9,6	320	120	340	132	3,8	4,9							
29.10.2013	Dienstag	9777							9776																			
30.10.2013	Mittwoch	9802							9801																			
31.10.2013	Donnerstag	9828							9827											0,041								

Anhang H: Routineanalytik November 2013

Monatsbericht 11 / 2013				:=Aus K: Messen				Ablauf Vorklämung		2		1		Belebung Testanlage 2		Belebung Kontrollanlage	
Datum	Tag	Lims-Nr.	Lims-Nr.	Lims-Nr.	Pges [mg/l]	TNb [mg/l]	TOC [mg/l]	Testanlage Volumenstr. [m³/d]	Kontrollanlage Volumenstr. [m³/d]	Lims-Nr.	TS [g/l]	GV [%]	OTS [g/l]	Lims-Nr.	TS [g/l]	GV [%]	OTS [g/l]
01.11.2013	Freitag						195										
02.11.2013	Samstag						103										
03.11.2013	Sonntag	9909			5,82	48,9	132										
04.11.2013	Montag	9944			4,91	36,5	110			9946	2,67						
05.11.2013	Dienstag				5,12	46,0	118							9945	2,56		
06.11.2013	Mittwoch	10063			5,42	43,1	133			10065	2,42	82,2	1,98	10064	2,08	81,2	1,64
07.11.2013	Donnerstag	10106			4,06	33,4	110										
08.11.2013	Freitag						103										
09.11.2013	Samstag						142										
10.11.2013	Sonntag	10165			6,29	56,0	177										
11.11.2013	Montag	10201			7,03	69,8	223			10203	2,56			10202	2,48		
12.11.2013	Dienstag				7,58	67,7	210										
13.11.2013	Mittwoch	10281			7,11	67,8	205			10283	2,88	85,7	2,48	10282	2,69	84,0	2,26
14.11.2013	Donnerstag	10342			7,80	68,4	209										
15.11.2013	Freitag						166										
16.11.2013	Samstag						213										
17.11.2013	Sonntag	10395			8,12	79,7	234										
18.11.2013	Montag	10430			8,09	74,6	217			10432	2,65			10431	2,43		
19.11.2013	Dienstag				7,80	80,9	229	27,8	27,1								
20.11.2013	Mittwoch	10495			8,53	71,8	240	27,8	27,1	10497	2,59	81,9	2,12	10496	2,44	82,4	2,01
21.11.2013	Donnerstag	10530			7,97	84,0	228										
22.11.2013	Freitag						214										
23.11.2013	Samstag						241	31,9	32,6								
24.11.2013	Sonntag	10531			8,49	72,3	194	31,9	32,6								
25.11.2013	Montag	10627			8,39	79,8	194	31,9	32,6	10629	2,68			10628	2,69		
26.11.2013	Dienstag				7,96	81,8	201	31,9	32,4								
27.11.2013	Mittwoch	10712			8,39	74,4	211	32,2	32,4	10714	2,61	82,3	2,15	10713	2,58	82,7	2,13
28.11.2013	Donnerstag	10749			7,78	68,0	190	32,2	32,4								
29.11.2013	Freitag						152										
30.11.2013	Samstag						148										

Monatsbericht 11 / 2013															
Nachklärung Ablauf Testanlage 2						Nachklärung Ablauf Kontrollanlage 1						BS Testanl BS Kontro			
Datum	Tag	ims-N/ims-N/NH4-N/NO3-N-P-Ges.	TOC	DOC	NO2-N	ims-N/ims-N/NH4-N/NO3-N-P-Ges.	TOC	DOC	NO2-N	Schl.-V	SVI	Schl.-V	SVI	Abl. Testa	Abl. Kontro
		[mg/l]	[mg/l]	[mg/l]	[mg/l]	[mg/l]	[mg/l]	[mg/l]	[mg/l]	[ml/l]	[ml/g]	[ml/l]	[ml/g]	[mg/l]	[mg/l]
01.11.2013	Freitag	9911 72h DP	0,04	3,07	1	8,5	8,5			9910 72h DP	0,05	2,91	1,94	7,2	7,2
02.11.2013	Samstag														
03.11.2013	Sonntag														
04.11.2013	Montag	9948 72h DP	2,07	2,78	3,49	9,5	7,3			9947 72h DP	0,06	2,76	3,17	9,5	7,5
05.11.2013	Dienstag	49925								####					
06.11.2013	Mittwoch	49967								####					
07.11.2013	Donnerstag	10108	10110	2,03	1,17	7,5	7,4	0,01		####	10109	2,00	3,76	9,0	8,0
08.11.2013	Freitag	10167	72h DP	0,03	2,87	2,02	11	9,8		####	72h DP	0,04	2,67	3,21	13
09.11.2013	Samstag														
10.11.2013	Sonntag														
11.11.2013	Montag	10205		0,04	4,37	1,12	12	11		####					
12.11.2013	Dienstag	10252		0,03	3,8	0,47	14	13		####	0,06	3,57	0,92	15	14
13.11.2013	Mittwoch	10285		0,04	4,07	0,49	15	14		####	0,52	3,36	1,4	15	14
14.11.2013	Donnerstag	10344	10346	0,04	4,78	1,20	14	14	0,02	####	10345	1,05	3,95	1,78	18
15.11.2013	Freitag	10397	72h DP	0,03	4,89	2,21	15	14		####	72h DP	0,04	4,15	1,82	18
16.11.2013	Samstag														
17.11.2013	Sonntag														
18.11.2013	Montag	10434		0,04	4,79	1,08	15	14		####	0,05	3,98	1,18	15	14
19.11.2013	Dienstag	10465		0,07	4,65	1,05	16	16		####	0,06	3,93	1,16	17	16
20.11.2013	Mittwoch	10499		0,04	4,61	0,68	17	15		####	0,04	3,90	0,80	17	16
21.11.2013	Donnerstag	10532	10534	0,04	4,2	0,74	14	14	0,03	####	10533	0,04	3,66	0,82	18
22.11.2013	Freitag	10593	72h DP	0,04	5,04	0,56	16	14		####	72h DP	0,03	4,26	0,59	16
23.11.2013	Samstag														
24.11.2013	Sonntag														
25.11.2013	Montag	10631		0,05	5,78	0,97	13	12		####	0,05	4,98	1,12	14	12
26.11.2013	Dienstag	10686		0,06	5,43	2,14	12	11		####	0,05	4,71	2,21	13	11
27.11.2013	Mittwoch	10716		0,05	5,29	2,62	11	11		####	0,04	4,65	2,78	12	11
28.11.2013	Donnerstag	10751	10753	0,04	4,93	2,45	12	11	0,04	####	10752	0,03	4,23	2,66	13
29.11.2013	Freitag	10829	72h DP	0,04	4,81	3,2	11	11		####	72h DP	0,03	4,32	3,4	12
30.11.2013	Samstag														

Anhang I: Routineanalytik Dezember 2013

Monatsbericht 12 / 2013				:=Aus k : Messen				Ablauf Vorkürung		2		1		Belebung Testanlage 2				Belebung Kontrollanlage 1			
Datum	Tag	Lims-Nr.	Lims-Nr.	Lims-Nr.	Pges [mg/l]	TNb [mg/l]	TOC [mg/l]	olumenstr/olumenstr	olumenstr	Lims-Nr.	TS [g/l]	GV [%]	ots [g/l]	Lims-Nr.	TS [g/l]	GV [%]	ots [g/l]				
01.12.2013	Sonntag	10827			7,69	73,8	185	31,9	31,9												
02.12.2013	Montag	10868	7zh DPN	Spurenst	8,24	75,8	189	31,9	31,9	10870	2,81			10869	2,61						
03.12.2013	Dienstag				8,54	73,7	202	31,9	31,9												
04.12.2013	Mittwoch	10971			7,66	72,3	199	31,9	31,9	10973	2,84	87,4	2,45	10972	2,87	87,1	2,50				
05.12.2013	Donnerstag	11001		Belebschl im Zul.	17,7	91,8	338	31,9	31,9												
06.12.2013	Freitag						110	31,9	31,9												
07.12.2013	Samstag						151	31,9	31,9												
08.12.2013	Sonntag	11062			7,1	65,7	204	31,9	31,9												
09.12.2013	Montag	11098	7zh DPN	Spurenst	8,42	77,8	232	31,9	31,4	44099				44099							
10.12.2013	Dienstag				8,64	94,4	218	31,9	31,4		2,66	84,1	2,34	11176	2,56	83,1	2,13				
11.12.2013	Mittwoch	11175			8,64	94,4	218	31,9	31,4												
12.12.2013	Donnerstag	11578			8,27	87,5	215	32,2	31,7												
13.12.2013	Freitag	12059	7zh DPN	Spurenst			184	31,9	31,9												
14.12.2013	Samstag						136	31,9	31,9												
15.12.2013	Sonntag	12059			6,85	66,8	165	31,9	31,9												
16.12.2013	Montag	12095			7,47	72,2	196	31,9	31,9	44997				44996							
17.12.2013	Dienstag				8,08	79,1	183	32,2	31,4												
18.12.2013	Mittwoch	12156			8,63	79,2	200	32,2	31,4	12158	2,61	82,2	2,56	12157	2,72	83,9	2,28				
19.12.2013	Donnerstag	12189			7,12	35,7	112	32,2	32,2												
20.12.2013	Freitag	12214		7zh DPN	Spurenst		136	31,7	31,7												
21.12.2013	Samstag						175	31,7	31,7												
22.12.2013	Sonntag	12246			4,7	42,8	117	31,7	31,7												
23.12.2013	Montag	12273			5,3	46,2	130	31,7	31,7												
24.12.2013	Dienstag	12215	7zh DPN	Spurenst	5,15	39,6	136	31,7	31,7	44275				44274							
25.12.2013	Mittwoch	42346					115	31,7	31,7	42348				42347							
26.12.2013	Donnerstag				7,6	82,2	181	31,7	31,7												
27.12.2013	Freitag	12216		7zh DPN	Spurenst		184	31,7	31,7												
28.12.2013	Samstag						105	31,7	31,7												
29.12.2013	Sonntag	12389			5,8	49,0	127		31,7												
30.12.2013	Montag	12217	7zh DPN	Spurenst			155		31,7	12417	2,47			12416	2,46						
31.12.2013	Dienstag				7,96	43,1	157	31,4	31,4												

Monatsbericht 12 / 2013																									
Nachklärung Ablauf Testanlage 2						Nachklärung Ablauf Kontrollanlage 1						BS Testanl. ; BS Kontrolla													
Datum	Tag	lms-Nr.-lms-Nr.-NH4-NO3-N ² -Ges. [mg/l]	TOC [mg/l]	DOC [mg/l]	NO2-N [mg/l]	lms-Nr.-lms-Nr.-NH4-NN03-NP-Ges. [mg/l]	TOC [mg/l]	DOC [mg/l]	NO2-N [mg/l]	Schl.-V [ml/l]	SVI [ml/g]	Schl.-V [ml/l]	SVI [ml/g]	Abi. Testanl. AFS [mg/l]	Abi. Kontrolla AFS [mg/l]										
01.12.2013	Sonntag																								
02.12.2013	Montag	10872	72h DP	0,03	5,32	3,17	10	9,6		10871	72h DP	0,03	4,49	3,35	12	11	300	107	370	142	4,6	6,2			
03.12.2013	Dienstag	49925								49924															
04.12.2013	Mittwoch	49975								49974															
05.12.2013	Donnerstag	11003		0,04	4,32	2,61	13	12	0,03	11002	11004	0,02	3,8	2,91	14	10	0,03					2,4	6,2		
06.12.2013	Freitag	11064		0,04	3,39	2,47	11	11		11063		0,02	2,91	2,64	13	12						3,6	7,0		
07.12.2013	Samstag																								
08.12.2013	Sonntag																								
09.12.2013	Montag	11102	72h DP	0,05	4,84	1,33	14	13		11101	72h DP	0,02	4,08	1,49	16	15						5,5	6,7		
10.12.2013	Dienstag	44447								44446															
11.12.2013	Mittwoch	44479								44478															
12.12.2013	Donnerstag	11580		0,05	5,025	0,67	13	12	0,05	11579	11581	0,07	4,27	1,17	15	13	0,05						1,1	2,8	
13.12.2013	Freitag	12061	72h DP	0,05	4,91	1,63	11	11		2060	72h DP	0,03	3,73	2,18	13	12							1,3	2,6	
14.12.2013	Samstag																								
15.12.2013	Sonntag																								
16.12.2013	Montag	42999								42998															
17.12.2013	Dienstag	12130		0,05	5,95	2,63	13	10		12129		0,03	4,66	3,33	12	10						3,5	6,0		
18.12.2013	Mittwoch	12160		0,06	5,98	2,75	11	11		12159		0,04	4,57	3,0,80	12	11						4,2	6,2		
19.12.2013	Donnerstag	12191		0,05	3,5	2,88	11	9,8	0,05	12190	12192	0,04	2,66	3,47	11	10	0,03								
20.12.2013	Freitag	12248	72h	0,05	5,04	3,19	10	9,7		12247	72h	0,04	3,78	3,22	13	10									
21.12.2013	Samstag																								
22.12.2013	Sonntag																								
23.12.2013	Montag	12277	24h	0,06	3,06	3,13	8	7,8		12276	24h	0,02	2,58	3,16	8,3	8,3									
24.12.2013	Dienstag	12297	72h	0,05	4,76	3,43	8,8	8,4	0,04	12296	72h	0,02	4,03	3,49	8,8	8,8	0,03						3,2	4,4	
25.12.2013	Mittwoch	42929								42928															
26.12.2013	Donnerstag	42949								42948															
27.12.2013	Freitag	12391	72h	0,06	4,43	3,53	9,8	8,6		12390	72h	0,01	3,66	3,57	9,1	8,4						2,6	3,7		
28.12.2013	Samstag																								
29.12.2013	Sonntag																								
30.12.2013	Montag	12419	72h	0,03	4,91	3,56	8,4	8,4		12418	72h	0,01	4,09	4	9,2	9,1						3,3	5,4		
31.12.2013	Dienstag	42442								42441															

Anhang J: Routineanalytik Januar 2014

Monatsbericht 1 / 2014				:=Aus := Messen				2		1		Belebung Testanlage 2			Belebung Kontrollanlage 1		
Datum	Tag	Lims-Nr.	Lims-Nr.	Pges	TNb	TOC	Testanlage	Kontrollanlage	Lims-Nr.	TS	GV	oTS	Lims-Nr.	TS	GV	oTS	
				[mg/l]	[mg/l]	[mg/l]	[m³/d]	[m³/d]		[g/l]	[%]	[g/l]		[g/l]	[%]	[g/l]	
01.01.2014	Mittwoch	95		8,3	60,6	158	31,4	31,4									
02.01.2014	Donnerstag	135		7,30	61,8	161	31,4	31,4	97	2,58	82,95	2,14	96	2,54	84,25	2,14	
03.01.2014	Freitag					153	31,4	31,4									
04.01.2014	Samstag					151	31,4	31,4									
05.01.2014	Sonntag	185		6,2	48,9	143	31,4	31,4									
06.01.2014	Montag	229		7,39	69,7	175	31,4	31,4	231	2,58			230	2,33			
07.01.2014	Dienstag			7,3	67,9	184	31,4	31,4									
08.01.2014	Mittwoch	311		7,11	59,8	169	31,9	31,9	313	2,7	84,07	2,27	312	2,61	84,67	2,21	
09.01.2014	Donnerstag	351		5,82	46,5	137	31,9	31,9									
10.01.2014	Freitag	410	Zh-DPV			175	31,9	31,9									
11.01.2014	Samstag					211	31,9	31,9									
12.01.2014	Sonntag	410		7,1	73,0	202	31,4	32,4									
13.01.2014	Montag	446		7,26	73,9	202	31,9	31,7	448	2,49			447	2,41			
14.01.2014	Dienstag		Zh-DPV	7,10	65,1	206	31,7	31,2									
15.01.2014	Mittwoch	525		7,7	69,0	201	31,7	31,2	527	2,78	78,9	2,79	526	2,63	84,09	2,21	
16.01.2014	Donnerstag	561		6,06	56,0	136	31,7	31,2									
17.01.2014	Freitag	629	Zh-DPV			156											
18.01.2014	Samstag					202											
19.01.2014	Sonntag	629		9,06	85,5	211											
20.01.2014	Montag	670		8,51	82,1	206	31,4	31,4	672	2,68			671	2,7			
21.01.2014	Dienstag			8,42	70,0	175	31,4	31,4									
22.01.2014	Mittwoch					174	31,7	31,9	753	2,9	85,12	2,47	752	2,73	86,05	2,35	
23.01.2014	Donnerstag	811		7,56	67,0	160	31,7	31,9									
24.01.2014	Freitag						31,7	31,9									
25.01.2014	Samstag							ohne									
26.01.2014	Sonntag	882		4,47	41,5	103											
27.01.2014	Montag																
28.01.2014	Dienstag																
29.01.2014	Mittwoch						0	0	937	2,61	83,35	2,17	936	2,57	84,66	2,18	
30.01.2014	Donnerstag	991		7,67	81,7	216											
31.01.2014	Freitag																

Monatsbericht 1 / 2014																					
Nachklärang Ablauf Testanlage 2						Nachklärang Ablauf Kontrollanlage 1						BS Testanl. BS Kontroll		2	1						
Datum	Tag	lms-Nr.	lms-Nr.NH4-N	N03-N-P-Ges.	TOC	DOC	NO2-N	lms-Nr.	lms-Nr.NH4-N	N03-N-P-Ges.	TOC	DOC	NO2-N	Schl.-V	SVI	Schl.-V	SVI	AFS	AFS		
			[mg/l]	[mg/l]	[mg/l]	[mg/l]	[mg/l]		[mg/l]	[mg/l]	[mg/l]	[mg/l]	[mg/l]	[ml/l]	[ml/g]	[ml/l]	[ml/g]	[mg/l]	[mg/l]		
01.01.2014	MtW och	99						98													
02.01.2014	Donnerstag	139	137	0,122	4,6	3,41	11	138	136	0,013	3,94	3,96	11	9	0,04			5,3	7,2		
03.01.2014	Freitag	187	72h	21	2,15	10	27	186	72h	12,9	1,28	12,4	26	17				24,0	23,0		
04.01.2014	Samsdag																				
05.01.2014	Sonntag			13,6						19,5											
06.01.2014	Montag	233		3,25	4,45	0,14	10	232		0,27	3,53	0,17	11	9,3		360	140	380	163	5,9	7,7
07.01.2014	Tisdag	277		0,029	4,49	0,18	12	277		0,031	3,78	0,56	14,0	11,0				5,7	6,6		
08.01.2014	MtW och	315		0,032	4,2	1,6	14	314		0,022	3,53	1,7	15	14				4,1	5,9		
09.01.2014	Donnerstag	353	355	0,043	2,59	2,79	15	352	354	0,03	2,08	1,7	16	15	0,04			5,8	6,9		
10.01.2014	Freitag	412	72h-DP	0,03	5,19	20,8	16	441	72h-DP	0,03	4,24	3,1	16,0	17				7,2	8,7		
11.01.2014	Samsdag																				
12.01.2014	Sonntag																				
13.01.2014	Montag	450		0,03	5,61	1,45	17	449		0,034	4,56	2,29	17	16		380	153	340	169	7,0	8,6
14.01.2014	Tisdag	488	72h-DP	0,1	5,32	2,26	21	487	72h-DP	0,62	4,7	0,5	24	20				9,0	11,0		
15.01.2014	MtW och	529						528													
16.01.2014	Donnerstag	568						565							0,05						
17.01.2014	Freitag	631	72h-DP	0,049	6,13	4,21	23	630	72h-DP	0,04	5,1	3,7	22	20				9,3	7,7		
18.01.2014	Samsdag																				
19.01.2014	Sonntag																				
20.01.2014	Montag	674						673								360	134	370	137		
21.01.2014	Tisdag	813	72h-DP	0,042	6,25	4,36	12	812	72h-DP	0,033	4,83	4,36	13	12				11,7	9,6		
22.01.2014	MtW och															330	114	370	136		
23.01.2014	Donnerstag																				
24.01.2014	Freitag	877	72h-DP	0,032	4,43	4,52	14		72h-DP	0,022	3,4	4,5	13	11				10,8	8,2		
25.01.2014	Samsdag																				
26.01.2014	Sonntag																				
27.01.2014	Montag																				
28.01.2014	Tisdag	993	72h-DP	0,103	5,35	3,96	12	992	72h-DP	0,067	4,33	4,39	12	11				6,8	6,1		
29.01.2014	MtW och															320	123	400	156		
30.01.2014	Donnerstag																				
31.01.2014	Freitag	1090	72h-DP	0,052	4,75	4,19	21	1089	72h-DP	0,024	4,1	4,5	18	17				16,2	7,1		

Anhang K: Mikroorganismen im Belebtschlamm der halbtechnischen Versuchsanlage mit Angaben der Häufigkeitsstufen 1- 7 (1= Einzelfund, 7= Massenhaft)

1= Referenzanlage 2= Testanlage	27.03.2013					03.04.2013					10.04.2013					17.04.2013					24.04.2013					15.05.2013					22.05.2013					29.05.2013									
	1	2	a	b	c	1	2	a	b	c	1	2	a	b	c	1	2	a	b	c	1	2	a	b	c	1	2	a	b	c	1	2	a	b	c	1	2	a	b	c					
Aspidisca cicada	1	1	1	1	1	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2
Aspidisca lynceus	1	1	1	1	1																																								
Litonotus lamella																																													
Vorticella convallaria-Gr.	4	4	1	1	1	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3
Opercularia coarctata	1	1	1	1	1	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2
Opercularia bimariginata																																													
Carchesium spp.																																													
Zoothamnium spp.																																													
Euploides spp.																																													
Tritlignostoma cucullus																																													
Trachelophyllum spp.	1	1	1	1	1	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2
Coleps hirtus	3	3	1	1	1	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2
Spirostomum spp.	3	3	1	1	1	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3
Gastronautus spp.																																													
Vaginicola spp.	2	2	1	1	1	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2
Holophrya spp.	1	1	1	1	1	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2
Slentor spp.																																													
Uronema nigricans	2	1	1	1	1	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2
Trochilla minuta	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2
Manuelophrys parasitica																																													
Tokophrya infusionum	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
Tokophrya quadripartita																																													
Rotaria spp.	2	1	1	1	1	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2
Lecane spp.																																													
Lepadella spp.																																													
Nematoden																																													
Aeolosoma spp.																																													
Nais spp.																																													
Chaetogaster spp.																																													
Cephalodella spp.																																													
Macrobiotus spp.	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
Bodo salians																																													
Peranema trichophorum	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
Petalonomas ventriferacia	2	1	1	1	1																																								
Entosiphon sulcatum																																													
Mayorella spp.																																													
Cochliopodon spp.	4	4	1	1	1	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4
Arcella vulgaris	1	2	1	1	1	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2
Euplypha spp.	3	3	1	1	1	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2
Zoedioea spp.	5	5	1	1	1	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5
Microthrix parvicella	4	4	1	1	1	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4
Spirochaeta spp.	4	4	1	1	1	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4
Typ 021N	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2
SUMMEN	18	4	5	0,8	0,70967742	17	4	5	0,79069767	16	4	5	0,7804878	14	4	5	0,7567568	18	4	5	0,8	13	4	5	0,74285714	14	4	5	0,75675676																

	1 = Referenzanlage		2 = Testanlage		31.07.2013		07.08.2013		14.08.2013		21.08.2013		28.08.2013		03.09.2014		11.09.2013		18.09.2013					
	a	b	a	b	a	b	a	b	a	b	a	b	a	b	a	b	a	b	a	b	a	b		
Aspidisca cicada			1	2	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2		
Aspidisca lynceus			4	3	1	1	3	2	3	2	3	1	3	1	3	1	3	1	3	1	3	1		
Litonotus lamella			2	3	1	1	3	2	2	2	3	1	3	1	3	1	3	1	3	1	3	1		
Vorticella convallaria-Gr.			1	2	1	1	3	1	1	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2	1		
Opercularia coarctata			1	2	1	1	3	1	1	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2	1		
Opercularia bimariginata			3	3	1	1	2	3	1	2	2	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2	1		
Carchesium spp.																								
Zoothamnium spp.																								
Euploes spp.																								
Trithigmostoma cucullus										1														
Trachelophyllum spp.										1														
Coleps hirtus										1														
Spirostomum spp.			2	2	1	1	1	2	2	1	2	3	1	1	2	1	2	1	2	1	2	1		
Gastronautus spp.			1	3	3	1	1	2	2	1	2	1	1	1	2	1	2	1	2	1	2	1		
Vaginicola spp.										1					1									
Holophya spp.										2					2									
Slentor spp.																								
Uronema nigricans			1				1																	
Trochilia minuta			3	3	1	1	1	3	1	3	1	1	1	2	2	1	2	3	1	3	3	1		
Manuelophrys parasitica																								
Tokophrya infusionum																								
Tokophrya quadripartita																								
Rotaria spp.							2	2	2	1	2	2	1	1	1	1	1	1	1	2	3	1		
Lecane spp.																								
Lepadella spp.																								
Nematoden																								
Aeolosoma spp.			1																					
Nais spp.			1																					
Chaetogaster spp.																								
Cephalodella spp.																								
Macrobiotus spp.			2				1	2	2	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1		
Bodo salians																								
Paranema trichophorum																								
Petalomonas ventricata																								
Entosiphon sulcatum																								
Mayorella spp.																								
Cochilopodon spp.																								
Arcella vulgaris			3	2	1	1	3	3	3	1	1	1	1	3	2	1	3	2	1	3	2	1		
Euplytha spp.			1																					
Zooqloea spp.			1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1		
Microthrix parvicella			2	2	1	1	3	4	1	1	2	1	1	4	3	1	4	4	1	3	3	1		
Spirchaeta spp.			5	5	1	1	2	2	2	1	1	1	1	4	4	1	4	4	1	4	5	1		
Typ 021N			2	3	1	1	2	3	3	1	1	1	1	2	4	1	4	5	1	4	3	1		
SUMMIEN			5				12	4	5	13	4	5	11	4	5	13	4	5	10	4	5	16	4	5
Schrensens-Index			742				0,72727273			0,74285714			0,70967742			0,74285714			0,6896552			0,7428571		0,7804878

	25.09.2013					02.10.2013					09.10.2013					16.10.2013					22.10.2013					30.10.2013					06.11.2013					13.11.2013					20.11.2013																			
	beide					beide					beide					beide					beide					beide					beide					beide																								
	1	2	a	b	c	1	2	a	b	c	1	2	a	b	c	1	2	a	b	c	1	2	a	b	c	1	2	a	b	c	1	2	a	b	c	1	2	a	b	c	1	2	a	b	c															
Aspidisca cicada	1					1					1					1					1					1					1					1					1					1														
Aspidisca lynceus	1					1					1					1					1					1					1					1					1					1														
Litonotus lamella																																																												
Vorticella convallaria-Gr.	3	2	1	1		4	3	1	1		2	3	1	1		2	3	1	1		2	3	1	1		2	3	1	1		2	3	1	1		2	3	1	1		2	3	1	1		2	3	1	1		2	3	1	1						
Opercularia coarctata	4	3	1	1		3	5	1	1		3	2	1	1		3	3	1	1		4	3	1	1		2	1	1	1		2	1	1	1		2	2	1	1		2	2	1	1		2	2	1	1		2	2	1	1		2	2	1	1	
Opercularia birmarginata																																																												
Carchesium spp.																																																												
Zoothamnium spp.																																																												
Euplotes spp.																																																												
Tritrigonostoma cucullus																																																												
Trachelophyllum spp.																																																												
Coleps hirtus																																																												
Spirostomum spp.	2	2	1	1		2	3	1	1		2	3	1	1		2	2	1	1		2	2	1	1		2	2	1	1		2	2	1	1		2	2	1	1		2	2	1	1		2	2	1	1		2	2	1	1		2	2	1	1	
Gastronautus spp.	2	2	1	1		2	2	1	1		2	2	1	1		2	2	1	1		2	2	1	1		2	2	1	1		2	2	1	1		2	2	1	1		2	2	1	1		2	2	1	1		2	2	1	1		2	2	1	1	
Vaginicola spp.	1	2	1	1		1	2	1	1		1	2	1	1		1	2	1	1		1	2	1	1		1	2	1	1		1	2	1	1		1	2	1	1		1	2	1	1		1	2	1	1		1	2	1	1		1	2	1	1	
Holophrya spp.	1					1					1					1					1					1					1					1					1					1					1									
Slantor spp.																																																												
Uronema nigricans																																																												
Trochilla minuta																																																												
Manuelophrys parasitica																																																												
Tokophrya intusonium																																																												
Tokophrya quadrupartita																																																												
Rotaria spp.	2	1	1	1		2	3	1	1		2	3	1	1		2	2	1	1		2	2	1	1		2	2	1	1		2	2	1	1		2	2	1	1		2	2	1	1		2	2	1	1		2	2	1	1						
Lecane spp.																																																												
Lepadella spp.																																																												
Nematoden																																																												
Aeolosoma spp.																																																												
Nais spp.																																																												
Chaetogaster spp.																																																												
Cephalodella spp.																																																												
Macrobrotius spp.	1	2	1	1																																																								
Bodo salians																																																												
Peranema trichophorum																																																												
Petalomonas ventritraccia																																																												
Entosiphon sulcatum																																																												
Mayorella spp.	1	3	1	1																																																								
Cochliopodon spp.	1	2	1	1																																																								
Arcella vulgaris	2	2	1	1																																																								
Euphypha spp.	2	1	1	1																																																								
Zooploea spp.	2	1	1	1																																																								
Microthrix parvicella	2	2	1	1																																																								
Spirochaeta spp.	4	4	1	1																																																								
Typ 021N	5	3	3	1																																																								
SUMMEN	13	4	5			10	4	5			12	4	5			10	4	5			12	4	5			10	4	5			12	4	5			10	4	5			12	4	5			14	4	5												
Söhrensens-Index	0,74286714					0,68965617					0,72727273					0,6896552					0,72727271					0,7272727					0,7272727					0,7567568					0,727																			

1= Referenzanlage 2= Testanlage	27.11.2013		04.12.2013		11.12.2013		18.12.2013		24.12.2013		30.12.2013		08.01.2014		15.01.2014		22.01.2014			
	a	b	a	b	a	b	a	b	a	b	a	b	a	b	a	b	a	b		
Aspidisca cicada																				
Aspidisca lynceus		1								2	2			3			2		1	
Litonotus lamella										1	1			1			2		1	
Vorticella convallaria-Gr.	3	3	1		4	3	1		3	3	1		4	4	1		4	5	1	
Opercularia coarctata	4	3	1		4	3	1		3	4	1		4	4	1		1	2	1	
Opercularia bimarignata	2		1																	
Carchesium spp.																				
Zoothamnium spp.	2																			
Euplates spp.																				
Tritigmostoma cucullus	4	3	1		3				2		1		1	2	2		4	3	1	
Tritigmostoma cucullus																				
Trachyophyllum spp.	2				1				1				1	2	2		3	2	1	
Coleps hirtus	1				1	2	2	1	2	2	1		1	2	2		2	2	1	
Spirostomum spp.	3	2	1		3	2	1		2	3	1		3	2	1		1	2	1	
Gastronautus spp.																				
Vaginicola spp.	1	2	2	1	2	1	1		1	2			1	2			2	2	1	
Holophrya spp.																				
Stentor spp.																				
Uronema nigricans																				
Trochilia minuta	1				1				1				1				1		1	
Manuelophrys parasitica	4	3	1		4	3	1		4	2	1		3	3	1		3	3	1	
Tokophrya infusionum	1	2																		
Tokophrya quadripartita																				
Rotaria spp.	1																			
Rotaria spp.																				
Lecane spp.	2				1	2			1	1	1						1	2	1	
Lepadella spp.																				
Nematoden																				
Aeolosoma spp.																				
Nais spp.																				
Chaetogaster spp.																				
Cephalodella spp.																				
Macrobiotus spp.	1	2	2	1	2	1	1		1	2	1		1	1	1		1	2	2	
Bodo salians																				
Peranema trichophorum																				
Petalomonas ventrtrica	1				1				1											
Entosiphon sulcatum																				
Mayorella spp.																				
Coelilopodon spp.																				
Arcella vulgaris	1	2	1		2	2	1		1	2	1		1	2	1		2	2	1	
Euplypha spp.																				
Zoodioea spp.																				
Microrhix parvicella	3	2	1		4	4	1		5	3	1		5	3	1		5	5	1	
Spirochaeta spp.																				
Typ 021N	4	5	1		4	5	1		4	3	1		5	4	1		5	5	1	
SUMMEN	5	10	4	5	11	4	5	12	4	5	11	4	5	12	4	5	13	4	5	
Schrensens-Index	273	0,689655	0,709677	0,727273	0,7096774	0,7272727	0,7096774	0,7272727	0,7096774	0,7272727	0,7096774	0,7272727	0,7096774	0,7272727	0,7428571	0,70967	11	4	11	4

Anhang L: Ergebnisse der Spurenstoffanalytik

Proben- bezeichnung	Datum	Probennummer	TOC [mg/l]	DOC [mg/l]	TNB [mg/l]	NH ₄ -N [mg/l]	NO ₃ -N [mg/l]	P [mg/l]	Benzotriazol [µg/l]	Carbamazepin [µg/l]	Didifenac [µg/l]	Metoprolol [µg/l]	Sulfamethoxazol [µg/l]	Bemerkung
Ablauf Vorklärung	28.-29.05.2013	P-1304936	197	12		0,03	2,7	1,9	28	0,94	3,3	1,2	0,9	70170m³/d
Ablauf Anlage 1	28.-31.05.2013	P-1304952	12	12		0,03	2,7	1,9	7,6	0,79	1,6	0,76	0,25	70170 / 219080 / 114380 m³/d
Elimination [%]			94	12					73	16	52	37	72	ohne PAK
Ablauf Straße 2	28.-31.05.2013	P-1304953	12	12		0,02	3,3	1,1	7,1	0,76	1,5	0,71	0,28	ohne PAK
Elimination [%]			94						75	19	55	41	69	ohne PAK
Ablauf Vorklärung	17.-18.06.2013	P-1305543	219			0,05	3,3	1,5	41	1,1	3,3	2,8	0,73	73610 m³/d
Ablauf Anlage 1	17.-20.06.2013	P-1305544	16	15		0,03	3,3	1,5	28	0,85	2,4	2,2	0,28	73610 / 77960 / 87680 m³/d
Elimination [%]			93						32	23	27	21	62	ohne PAK
Ablauf Straße 2	17.-20.06.2013	P-1305545	14	14		0,02	4,5	0,75	24	0,64	1,9	1,2	0,24	ohne PAK
Elimination [%]			94						41	42	42	57	67	mit 10mg/l PAK seit 31.05.
Ablauf Vorklärung	01.-02.07.2013	P-1305989	172		72		8,2	8,2	22	1,2	4,8	2,1	0,79	72380 m³/d
Ablauf Anlage 1	01.-04.07.2013	P-1305992	12	10		0,03	3,3	2,4	5,8	1,1	1,9	1,2	0,43	72380 / 75030 / 182440 m³/d
Elimination [%]			93						74	8	60	43	46	ohne PAK
Ablauf Straße 2	01.-04.07.2013	P-1305993	10	10		0,03	4,4	1,7	4,5	0,56	1,4	0,72	0,45	mit 10mg/l PAK seit 31.05.
Elimination [%]			94						80	53	71	66	43	mit 10mg/l PAK seit 31.05.
Ablauf Vorklärung	08.-09.07.2013	P-1306228	198		68		7,4	7,4	18	1,8	4,6	1,5	0,68	74960 m³/d
Ablauf Anlage 1	08.-11.07.2013	P-1306231	19	17		0,05	3,5	1,3	6,2	1,3	2,6	1,3	0,38	74960 / 62870 / 78850 m³/d
Elimination [%]			90						66	28	43	13	44	ohne PAK
Ablauf Straße 2	08.-11.07.2013	P-1306232	16	16		0,03	4,4	0,86	4,8	0,74	2,1	0,6	0,33	mit 10mg/l PAK seit 31.05.
Elimination [%]			92						73	59	54	60	51	mit 10mg/l PAK seit 31.05.
Ablauf Vorklärung	15.-16.07.2013	P-1306428	174		78		7,5	7,5	28	2,3	4	2,4	0,65	71890 m³/d
Ablauf Anlage 1	15.-18.07.2013	P-1306431	16	15		0,04	4,2	2,1	12	2,1	2,4	2,3	0,46	71890 / 74850 / 71260 m³/d
Elimination [%]			91						57	9	40	4	29	ohne PAK
Ablauf Straße 2	15.-18.07.2013	P-1306432	14	14		0,03	4,8	1,1	10	0,77	1,7	0,52	0,33	mit 10mg/l PAK seit 31.05.
Elimination [%]			92						64	67	58	78	49	mit 10mg/l PAK seit 31.05.
Ablauf Vorklärung	22.-23.07.2013	P-1306673	192		71		7,8	7,8	26	2,3	4,1	1,7	0,64	71400 m³/d
Ablauf Anlage 1	22.-25.07.2013	P-1306676	16	16		0,05	3,9	1,7	7,2	1,9	2,2	1,3	0,46	71400 / 98370 / 74920 m³/d
Elimination [%]			92						72	17	46	24	28	ohne PAK
Ablauf Straße 2	22.-25.07.2013	P-1306677	18	15		0,04	4,3	0,88	7	1	1,3	0,56	0,46	mit 10mg/l PAK seit 31.05.
Elimination [%]			91						73	89	68	67	28	mit 10mg/l PAK seit 31.05.
Ablauf Vorklärung	29.07.-01.08.2013	P-1306855	150		69		6,5	6,5	19	1,2	2,9	2,3	0,79	69250 / 74540 / 91540 m³/d
Ablauf Anlage 1	29.07.-01.08.2013	P-1306858	13	13		0,04	3,8	3,2	6,8	1,1	2,1	1,6	0,71	mit 10mg/l PAK seit 31.05.
Elimination [%]			91						64	8	28	30	10	ohne PAK
Ablauf Straße 2	29.07.-01.08.2013	P-1306859	11	11		0,03	4,6	2,7	7	0,44	1,4	0,58	0,52	mit 10mg/l PAK seit 31.05.
Elimination [%]			93						63	63	52	75	34	mit 10mg/l PAK seit 31.05.
Ablauf Vorklärung	05.-08.08.2013	P-1307082	193		62,1		6,34	6,34	23	1,5	3,7	2,2	0,58	66620 / 66110 / 74360 m³/d
Ablauf Anlage 1	05.-08.08.2013	P-1307085	19	14		10,6	1,96	5,61	9,4	1,2	2,8	1,9	0,47	mit 10mg/l PAK seit 31.05.
Elimination [%]			90						59	20	24	14	19	ohne PAK
Ablauf Straße 2	05.-08.08.2013	P-1307086	16	16		9,64	2,46	4,22	5,5	0,59	1,8	1,3	0,54	mit 10mg/l PAK seit 31.05.
Elimination [%]			92						76	61	51	41	7	mit 10mg/l PAK seit 31.05.
Ablauf Vorklärung	12.-15.08.2013	P-1307264	149		64,7		6,71	6,71	69	1,7	3	2,8	0,76	77380 / 64830 / 68770 m³/d
Ablauf Anlage 1	12.-15.08.2013	P-1307267	12	11		0,025	3,46	0,505	10	1,1	1,9	2,1	0,42	mit 10mg/l PAK seit 31.05.
Elimination [%]			92						86	35	37	25	45	ohne PAK
Ablauf Straße 2	12.-15.08.2013	P-1307268	11	11		0,023	4,46	0,258	7,9	0,47	1,2	0,76	0,3	mit 10mg/l PAK seit 31.05.
Elimination [%]			93						89	72	60	73	61	mit 10mg/l PAK seit 31.05.
Ablauf Vorklärung	20.-23.08.2013	P-1307561	203		69,5		6,6	6,6	31	1,5	3,7	2	0,25	64810 / 64060 / 63920 m³/d
Ablauf Anlage 1	20.-23.08.2013	P-1307595	16	15		0,03	2,89	1,1	11	1	2	1,4	0,11	mit 10mg/l PAK seit 31.05.
Elimination [%]			92						65	33	46	30	56	ohne PAK
Ablauf Straße 2	20.-23.08.2013	P-1307596	14	13		0,045	3,59	0,847	8,8	0,54	1,3	0,57	0,13	mit 10mg/l PAK seit 31.05.
Elimination [%]			93						72	64	65	72	48	mit 10mg/l PAK seit 31.05.

Proben- bezeichnung	Datum	Probennummer	TOC	DOC	TNB	NH ₄ -N	NO ₃ -N	P	Benzotriazol	Carbamazepin	Diclofenac	Metoprolol	Sulfamethoxazol	Bemerkung
Ablauf Vorkürung	26.-29.08.2013	17-20.08.2013	175	175	59,2		6	18	2	3,4	2,2	0,63	95270 / 52520 / 64120 m ³ /d	
Ablauf Anlage 1	26.-29.08.2013	P-1307684	15	15	0,029	3,48	1,42	4	1,5	1,5	1,1	0,34		
Elimination [%]			91	91	0,057	4,02	0,852	78	25	56	50	46	ohne PAK	
Ablauf Straße 2	26.-29.08.2013	P-1307688	14	14	0,057	4,02	0,852	80	54	62	66	46	mit 10 mg/l PAK seit 31.05.	
Elimination [%]			92	92				80	54	62	66	46		
Ablauf Vorkürung	02.-05.09.2013	P-1307913	253	253	71		8,4	43	1,4	3,2	3,9	1	63540 / 55170 / 68170 m ³ /d	
Ablauf Anlage 1	02.-05.09.2013	P-1307916	16	16	0,047	3,79	1,05	10	1,3	1,5	2,2	0,5	ohne PAK	
Elimination [%]			94	94				77	7	53	44	50		
Ablauf Straße 2	02.-05.09.2013	P-1307917	16	16	0,044	4,88	0,802	12	0,75	1,2	1,3	0,46	mit 10 mg/l PAK seit 31.05.	
Elimination [%]			94	94				72	46	63	67	54		
Ablauf Vorkürung	20.-23.09.2013	P-1308585	230	230	71,9		10,2	23	1,4	3,8	3	0,79	66110 / 54860 / 62340 m ³ /d	
Ablauf Anlage 1	20.-23.09.2013	P-1308587	12	12	0,007	4,09	2,37	9,1	0,92	1,7	1,7	0,51	ohne PAK	
Elimination [%]			95	95				60	34	55	43	35		
Ablauf Straße 2	20.-23.09.2013	P-1308586	12	12	0,027	4,43	1,36	8,2	0,47	1,3	0,73	0,39	mit 20 mg/l PAK seit 19.09.	
Elimination [%]			95	95				64	66	66	76	51		
Ablauf Vorkürung	24.-27.09.2013	P-1308759	224	224	72,4		8,56	31	1,3	4,7	2,5	0,92	67060 / 53540 / 65550 m ³ /d	
Ablauf Anlage 1	24.-27.09.2013	P-1308837	10	10	1,71	3,61	2,74	11	1	2,8	2,1	0,43	ohne PAK	
Elimination [%]			96	96				65	23	40	16	53		
Ablauf Straße 2	24.-27.09.2013	P-1308838	9,9	9,8	0,06	4,96	0,99	7,6	0,5	1,4	0,68	0,31	mit 20 mg/l PAK seit 19.09.	
Elimination [%]			96	96				75	62	70	73	66		
Ablauf Vorkürung	27.-30.09.2013	P-1308831	253	253			4	33	1,2	4,1	2,7	1	65850 / 51800 / 60080 m ³ /d	
Ablauf Anlage 1	27.-30.09.2013	P-1308791	13	11	0,037	4	0,688	11	1,1	1,3	2	1,7	0,4	
Elimination [%]			95	95				67	8	51	37	60	ohne PAK	
Ablauf Straße 2	27.-30.09.2013	P-1308792	14	12	0,065	5,25	0,768	11	0,66	1,9	1,1	0,36	mit 20 mg/l PAK seit 19.09.	
Elimination [%]			94	94				67	45	54	59	64		
Ablauf Vorkürung	01.-04.10.2013	P-1308956	223	223	63,5		8,8	38	1,7	5,6	3,1	0,9	62250 / 62250 / 62370 m ³ /d	
Ablauf Anlage 1	01.-04.10.2013	P-1308926	13	12	0,03	3,99	1,33	13	1,6	2,9	2,2	0,49	ohne PAK	
Elimination [%]			94	94				63	6	48	29	46		
Ablauf Straße 2	01.-04.10.2013	P-1308927	13	13	0,05	5,14	0,75	10	0,69	2,3	0,7	0,34	mit 20 mg/l PAK seit 19.09.	
Elimination [%]			94	94				74	59	59	77	62		
Ablauf Vorkürung	04.-07.10.2013	P-1309084	187	187			3,0	30	1,3	2,3	0,72	0,72	83720 / 82760 / 61820 m ³ /d	
Ablauf Anlage 1	04.-07.10.2013	P-1308979	100	100			11	11	0,94	1,4	0,39	0,39	ohne PAK	
Elimination [%]			100	100				8,3	35	39	1,1	46		
Ablauf Straße 2	04.-07.10.2013	P-1308980	100	100			7,2	7,2	60	5,2	1,1	0,25	kein Ergebnis für Metoprolol	
Elimination [%]			100	100				18	1,4	1,3	2,4	0,73	mit 20 mg/l PAK seit 19.09.	
Ablauf Vorkürung	07.-10.10.2013	P-1309078	196	196	76		8,1	18	0,91	0,97	1,5	0,4	67400 / 54880 / 82350 m ³ /d	
Ablauf Anlage 1	07.-10.10.2013	P-1309081	11	10	0,03	4,51	3,23	6,4	0,25	2,5	38	45	ohne PAK	
Elimination [%]			94	94				64	35	25	38	45		
Ablauf Straße 2	07.-10.10.2013	P-1309082	9,5	9,5	0,04	5,39	1,97	6,1	0,52	0,79	0,75	0,25	mit 20 mg/l PAK seit 19.09.	
Elimination [%]			95	95				66	63	39	69	66		
Ablauf Vorkürung	18.-21.10.2013	P-1309560	225	225	67,5		8,73	16	1,2	3,3	2,6	0,97	71050 / 55670 / 69460 m ³ /d	
Ablauf Anlage 1	18.-21.10.2013	P-1309561	14	12	0,03	3,96	0,67	6,3	0,89	0,67	1,8	0,48	ohne PAK	
Elimination [%]			94	94				61	26	80	31	51		
Ablauf Straße 2	18.-21.10.2013	P-1309562	16	13	0,03	3,36	1,6	5,4	0,33	0,93	0,55	0,21	mit 20 mg/l PAK seit 19.09.	
Elimination [%]			93	93				66	73	72	79	78		
Ablauf Vorkürung	02.-05.12.2013	P-1310668	189	189	75,8		8,24	29	1,3	4,1	3,1	1,1	65920 / 66080 / 72520 m ³ /d	
Ablauf Anlage 1	02.-05.12.2013	P-1310671	12	11	0,03	4,49	3,35	9,8	1	2,9	1,8	0,54	ohne PAK	
Elimination [%]			94	94				66	23	29	42	51		
Ablauf Straße 2	02.-05.12.2013	P-1310672	10	9,6	0,03	5,32	3,17	7,2	0,48	1,7	0,74	0,26	mit 20 mg/l PAK seit 19.09.	
Elimination [%]			95	95				75	63	59	76	76		
Ablauf Vorkürung	09.-12.12.2013	P-1311098	232	232			4,08	1,49	1,7	2	1,7	0,93	69290 / 67230 / 66530 m ³ /d	
Ablauf Anlage 1	09.-12.12.2013	P-1311101	16	15	0,02	4,08	1,49	39	1,2	1,5	1,3	0,4	ohne PAK	
Elimination [%]			93	93				49	29	25	24	57		
Ablauf Straße 2	09.-12.12.2013	P-1311102	14	13	0,05	4,84	1,33	30	0,6	1,1	0,65	0,25	mit 20 mg/l PAK seit 19.09.	
Elimination [%]			94	94				61	65	45	62	73		

Proben- bezeichnung	Datum	Probennummer	TOC [mg/l]	DOC [mg/l]	TNB [mg/l]	NH ₄ N [mg/l]	NO ₃ -N [mg/l]	P [mg/l]	Benzotriazol [µg/l]	Carbamazepin [µg/l]	Diclofenac [µg/l]	Metoprolol [µg/l]	Sulfamethoxazol [µg/l]	Bemerkung
Ablauf Vorklärung	13. - 16.12.2013	17.-20.06.2013 P-1312059	184	13	12	0,03	3,73	2,18	31	1,5	3,1	2,8	0,66	66160 / 120730 / 73710 m ³ /d
Ablauf Anlage 1	13. - 16.12.2013	P-1312060	93	11	11	0,05	4,91	1,63	10	1,3	2,6	1,6	0,43	ohne PAK
Ablauf Strasse 2	13. - 16.12.2013	P-1312064	94	9,4	9,4	0,05	4,91	1,63	10	0,77	1,7	0,81	0,24	mit 20 mg/l PAK seit 19.09.
Ablauf Vorklärung	20. - 23.12.2013	P-1312214	136	13	10	0,04	3,78	3,22	10	0,76	2,5	1,4	0,89	87320 / 66510 / 112970 m ³ /d
Ablauf Anlage 1	20. - 23.12.2013	P-1312247	90	9,0	9,0	0,05	5,04	3,19	68	2,0	7,6	4,6	0,32	ohne PAK
Ablauf Strasse 2	20. - 23.12.2013	P-1312248	93	9,3	9,3	0,05	5,04	3,19	73	0,32	100	7,7	0,23	kein Ergebnis für Diclofenac
Ablauf Vorklärung	30.12.13 - 02.01.14	P-1312217	155	9,2	9,1	0,01	4,09	4	20	0,93	3,1	2,4	0,59	mit 20 mg/l PAK seit 19.09.
Ablauf Anlage 1	30.12.13 - 02.01.14	P-1312418	94	8,4	8,4	0,03	4,91	3,56	61	1,6	3,8	2	0,17	64360 / 66070 / 64840 m ³ /d
Ablauf Strasse 2	30.12.13 - 02.01.14	P-1312419	95	8,4	8,4	0,03	4,91	3,56	69	0,38	1,2	0,54	0,29	ohne PAK
Ablauf Vorklärung	10.01 - 13.01.2014	P-1401410	175	16	17	0,03	4,24	3,1	13	1,4	3,8	2	0,97	mit 20 mg/l PAK seit 19.09.
Ablauf Anlage 1	10.01 - 13.01.2014	P-1401411	91	16	15	0,03	5,19	20,8	5,2	1,4	2,5	1,5	0,38	73620 / 74340 / 63990 m ³ /d
Ablauf Strasse 2	10.01 - 13.01.2014	P-1401412	91	16	15	0,03	5,19	20,8	60	1,3	3,4	2,5	0,61	ohne PAK
Ablauf Vorklärung	14.01 - 17.01.2014	P-1400600	206	24	20	0,62	4,7	0,5	62	0,97	3,4	2	0,82	mit 20 mg/l PAK seit 19.09.
Ablauf Anlage 1	14.01 - 17.01.2014	P-1400487	88	21	19	0,1	5,32	2,26	4,8	0,93	2,8	1,9	0,44	67150 / 66350 / 109680 m ³ /d
Ablauf Strasse 2	14.01 - 17.01.2014	P-1400488	90	21	19	0,1	5,32	2,26	51	4	1,8	5	0,24	ohne PAK
Ablauf Vorklärung	17.01 - 20.01.2014	P-1400629	156	22	20	0,04	5,1	3,7	58	0,55	2	0,79	0,71	mit 20 mg/l PAK seit 19.09.
Ablauf Anlage 1	17.01 - 20.01.2014	P-1400630	86	23	20	0,049	6,13	4,21	6,8	0,97	3,6	1,6	0,88	76830 / 68270 / 63700 m ³ /d
Ablauf Strasse 2	17.01 - 20.01.2014	P-1400631	85	23	20	0,049	6,13	4,21	4,2	0,93	2,8	1,4	0,36	ohne PAK
Elimination [%]									38	4	22	13	59	
Elimination [%]									2,8	0,56	1,8	0,6	0,27	
Elimination [%]									59	42	50	63	69	mit 20 mg/l PAK seit 19.09.

Anhang M: Ergebnisse aus der Zentrifugation zu Versuch A

Probe	Drehzahl [U/min]	Laufzeit [min]	Überstand [mL]	Schlammvolumen [mL]	volumetrischer Feststoffgehalt [g/L]	reduzierter Wasseranteil [%]
o. AK	4700	3	76	4	52,0	4,9
m. AK			76,5	3,5	70,9	6,8
o. AK	4000	3	77	3	69,3	6,7
m. AK			76,5	3,5	70,9	6,8
o. AK	3000	3	75	5	41,6	3,9
m. AK			75,5	4,5	55,1	5,2
o. AK	2000	3	73	7	29,7	2,7
m. AK			74,5	5,5	45,1	4,2
o. AK	1500	3	0	0	2,6	0,0
m. AK			0	0	3,1	0,0
o. AK	1000	3	0	0	2,6	0,0
m. AK			0	0	3,1	0,0
o. AK	4700	1	75	5	41,6	3,9
m. AK			75,5	4,5	55,1	5,2
o. AK	4700	5	76	4	52,0	4,9
m. AK			76,5	3,5	70,9	6,8
o. AK	4700	10	76,5	3,5	59,4	5,7
m. AK			76,5	3,5	70,9	6,8
o. AK	4700	15	76,5	3,5	59,4	5,7
m. AK			76	4	62,0	5,9
o. AK	4700	20	76,5	3,5	59,4	5,7
m. AK			77	3	82,7	8,0

Anhang N: Ergebnisse aus der Zentrifugation zu Versuch B

Probe	Drehzahl [U/min]	Laufzeit [min]	Überstand [mL]	Schlammvolumen [mL]	volumetrischer Feststoffgehalt [g/L]	reduzierter Wasseranteil [%]
o. AK	4700	3	476	24	42,9	4,1
m. AK			478	22	48,6	4,6
o. AK	3700	3	477,5	22,5	45,8	4,4
m. AK			472	28	38,2	3,6
o. AK	2700	3	0	0	2,1	0,0
m. AK			0	0	2,1	0,0
o. AK	4700	1	480	20	51,5	4,9
m. AK			477	23	46,5	4,4
o. AK	4700	5	481	19	54,2	5,2
m. AK			482	18	59,4	5,7
o. AK	4700	10	480	20	51,5	4,9
m. AK			481	19	56,3	5,4

Anhang O: Ergebnisse aus der Zentrifugation zu Versuch C

Probe	Drehzahl [U/min]	Laufzeit [min]	Überstand [mL]	Schlammvolumen [mL]	volumetrischer Feststoffgehalt [g/L]	reduzierter Wasseranteil [%]
o. AK	4700	3	473	27	36,1	3,4
m. AK			471	29	34,0	3,2
o. AK	3700	3	471	29	33,6	3,2
m. AK			470	30	32,8	3,1
o. AK	2700	3	0	0	2,0	0,0
m. AK			0	0	2,0	0,0
o. AK	4700	1	474	26	37,5	3,6
m. AK			473	27	36,5	3,5
o. AK	4700	5	469	31	31,5	2,9
m. AK			473	27	36,5	3,5
o. AK	4700	10	470	30	32,5	3,1
m. AK			472	28	35,2	3,3
o. AK	4700	20	470	30	32,5	3,1
m. AK			471	29	34,0	3,2

Anhang P: Ergebnisse aus der Zentrifugation zu Versuch D

Probe	Drehzahl [U/min]	Laufzeit [min]	Überstand [mL]	Schlammvolumen [mL]	volumetrischer Feststoffgehalt [g/L]	reduzierter Wasseranteil [%]
o. AK	4700	2,5	473	27	55,6	5,3
m. AK			468	32	46,9	4,4
o. AK	4700	5	472	28	53,6	5,1
m. AK			470	30	50,0	4,7
o. AK	4700	10	470	30	50,0	4,7
m. AK			467	33	45,5	4,2
o. AK	4700	20	467,5	32,5	46,2	4,3
m. AK			467,5	32,5	46,2	4,3
o. AK	4700	30	466,5	33,5	44,8	4,2
m. AK			466	34	44,1	4,1

Anhang Q: Ergebnisse aus der Zentrifugation zu Versuch D (Wiederholung)

Probe	Drehzahl [U/min]	Laufzeit [min]	Überstand [mL]	Schlammvolumen [mL]	volumetrischer Feststoffgehalt [g/L]	reduzierter Wasseranteil [%]
o. AK	4700	2,5	474,5	25,5	60,6	5,7
m. AK			473,5	26,5	63,0	6,0
o. AK	4700	5	476	24	64,4	6,1
m. AK			473	27	61,9	5,9
o. AK	4700	10	475	25	61,8	5,9
m. AK			473,5	26,5	63,0	6,0
o. AK	4700	20	479,5	20,5	75,4	7,2
m. AK			472,5	27,5	60,7	5,7

Anhang R: Ergebnisse aus der Zentrifugation zu Versuch E bis G

Probe	Drehzahl [U/min]	Laufzeit [min]	Versuch E TS ₁ =2,1 g/L vol. Feststoffgehalt [g/L]	Versuch F TS ₁ =2,0 g/L (o.AK) TS ₁ =2,1 g/L (m.AK) vol. Feststoffgehalt [g/L]	Versuch G TS ₁ =1,7 g/L (o.AK) TS ₁ =2,0 g/L (m.AK) vol. Feststoffgehalt [g/L]
o. AK	2700	2,5	2,1	2,0	1,7
m. AK			2,1	2,1	2,0
o. AK	3700	2,5	39,6	35,1	1,7
m. AK			36,2	37,5	38,5
o. AK	4700	2,5	37,5	34,5	32,1
m. AK			35,6	40,4	39,2
o. AK	2700	5	2,1	2,0	1,7
m. AK			2,1	2,1	2,0
o. AK	3700	5	33,9	35,7	29,3
m. AK			38,2	37,5	40,0
o. AK	4700	5	35,6	35,7	26,6
m. AK			38,9	39,6	40,8
o. AK	2700	10	2,1	2,0	1,7
m. AK			28,8	2,1	2,0
o. AK	3700	10	35,0	32,8	26,6
m. AK			37,5	36,8	33,3
o. AK	4700	10	37,5	33,3	29,3
m. AK			37,5	38,2	35,7
o. AK	2700	20	38,2	2,0	1,7
m. AK			37,5	2,1	2,0
o. AK	3700	20	35,0	32,3	27,0
m. AK			36,8	37,5	35,1
o. AK	4700	20	35,6	31,3	26,6
m. AK			35,6	35,6	38,5

Anhang S: Ergebnisse aus der Zentrifugation zu Versuch H

PAK-Dosierung [mg/l]	Ausgangsfeststoffgehalt [g/l]	Überstand [mL]	Schlammvolumen [mL]	volumetrischer Feststoffgehalt [g/L]	reduzierter Wasseranteil [%]
20	3,0	478	22	68,2	6,5
50	3,1	473,5	26,5	58,1	5,5
100	3,1	477	23	65,9	6,3

Anhang T: Ergebnisse aus der Zentrifugation zu Versuch I

PAK-Dosierung [mg/l]	Ausgangsfeststoffgehalt [g/l]	Überstand [mL]	Schlammvolumen [mL]	volumetrischer Feststoffgehalt [g/L]	reduzierter Wasseranteil [%]
20	2,8	476	24	57,5	5,5
50	2,9	471,5	28,5	50,4	4,7
100	2,9	473	27	53,5	5,1
200	3,0	476,5	23,5	59,8	5,7

Anhang U: CST-Werte der einzelnen Versuchsreihen

Versuch	Probe	Ausgangsfeststoffgehalt TS [g/L]	Ausgangsfeststoffgehalt TS [%]	Kapillare Fließzeit CST [s]	spezifischer CST/TS [s/%]	relativer CST/TS [s/(g/L)]
1	o. AK	2,6	0,26	10,5	40,4	4,0
	m. AK	3,1	0,31	10,3	33,2	3,3
2	o. AK	2,1	0,21	10,4	50,5	5,0
	m. AK	2,1	0,21	9,2	43,0	4,3
3	o. AK	2,0	0,20	10,4	53,3	5,3
	m. AK	2,0	0,20	9,4	47,7	4,8
4	o. AK	3,0	0,30	9,2	30,7	3,1
	m. AK	3,0	0,30	8,9	29,7	3,0
5	o. AK	3,1	0,31	9,1	29,4	2,9
	m. AK	3,3	0,33	9,6	29,1	2,9
6	o. AK	2,0	0,20	8,7	43,5	4,4
	m. AK	2,6	0,26	8,9	34,2	3,4
7	o. AK	2,1	0,21	10,0	47,6	4,8
	m. AK	2,1	0,21	9,3	44,3	4,4
8	o. AK	2,0	0,20	11,0	55,0	5,5
	m. AK	2,1	0,21	9,5	45,2	4,5
9	o. AK	1,7	0,17	8,2	48,2	4,8
	m. AK	2,0	0,20	8,5	42,5	4,3
10	o. AK	1,7	0,17	8,7	51,2	5,1
	m. AK	2,0	0,20	8,9	44,5	4,5
11	o. AK	3,1	0,31	9,1	29,4	2,9
	m. AK	3,3	0,33	9,6	29,1	2,9
12	o. AK	11,3	1,13	11,7	10,4	1,0
	m. AK	11,5	1,15	13,0	11,3	1,1
13	o. AK	2,9	0,29	9,0	31,0	3,1
	m. AK	3,1	0,31	9,0	29,0	2,9
14	o. AK	7,9	0,79	13,3	16,8	1,7
	m. AK	10,5	1,05	15,0	14,3	1,4

Anhang V: Daten zu den anaeroben Batchversuchen an der RUB (Versuchsreihe 1: 36°C, 25 d)

Benzo-triazol [ng/g TS]	Carba-mazepin [ng/g TS]	Diclofenac [ng/g TS]	Metoprolol [ng/g TS]	Sulfa-methoxazol [ng/g TS]
29.000	1.000	1.800	2.700	500

NR	Volumen [mL]	Randbed.	pH Start	pH End	DOC Start [mg/L]	DOC End [mg/L]	TS Start [g/L]	TS End [g/L]	Benzotriazol								
									Startkonz. [µg/L]	Startfracht [µg]	Endkonz. [µg/L]	MW [µg/L]	Endfracht [µg]	Frachtrückgel. [µg]	Startkonz. Schlamm [ng/grs]	Startfracht Schlamm [µg]	Rücklösung [%]
Batch 11	800	nur AK	7,4	6,5	36,4	74	6,9	4,8	6,2	5,0	40	36,0	28,8	23,8	29.000	160,1	14,9
Batch 12	800	nur AK	7,3	6,5		83		5,1			38						
Batch 13	800	nur AK	7,3	6,5		65		4,9			30						
Batch 14	800	+FM	6,9	6,5	36,4	155	9,1	6,5	10	8,0	82	83,0	66,4	58,4	29.000	211,1	27,7
Batch 15	800	+FM	6,8	6,5		150		6,6			84						
Batch 16	800	+FM	6,8	6,6		160		7			83						
Batch 18	800	+Glucose	8,2	6,4	236,4	190	6,9	4,7	6,2	5,0	38	32,7	26,1	21,2	29.000	160,1	13,2
Batch 19	800	+Glucose	8,2	6,6		120		4,6			31						
Batch 20	800	+Glucose	8,2	6,4		170		4,6			29						

NR	Volumen [mL]	Randbed.	pH Start	pH End	DOC Start [mg/L]	DOC End [mg/L]	TS Start [g/L]	TS End [g/L]	Carbamazepin								
									Startkonz. [µg/L]	Startfracht [µg]	Endkonz. [µg/L]	MW [µg/L]	Endfracht [µg]	Frachtrückgel. [µg]	Startkonz. Schlamm [ng/grs]	Startfracht Schlamm [µg]	Rücklösung [%]
Batch 11	800	nur AK	7,4	6,5	36,4	74	6,9	4,8	0,34	0,3	1,1	1,1	0,9	0,6	1.000	5,5	11,0
Batch 12	800	nur AK	7,3	6,5		83		5,1			1,1						
Batch 13	800	nur AK	7,3	6,5		65		4,9			1,1						
Batch 14	800	+FM	6,9	6,5	36,4	155	9,1	6,5	0,28	0,2	2,0	2,0	1,6	1,4	1.000	7,3	18,9
Batch 15	800	+FM	6,8	6,5		150		6,6			2,0						
Batch 16	800	+FM	6,8	6,6		160		7			2,0						
Batch 18	800	+Glucose	8,2	6,4	236,4	190	6,9	4,7	0,34	0,3	1,5	1,3	1,1	0,8	1.000	5,5	14,4
Batch 19	800	+Glucose	8,2	6,6		120		4,6			1,2						
Batch 20	800	+Glucose	8,2	6,4		170		4,6			1,3						

NR	Volumen [mL]	Randbed.	pH Start	pH End	DOC Start [mg/L]	DOC End [mg/L]	TS Start [g/L]	TS End [g/L]	Diclofenac								
									Startkonz. [µg/L]	Startfracht [µg]	Endkonz. [µg/L]	MW [µg/L]	Endfracht [µg]	Frachtrückgel. [µg]	Startkonz. Schlamm [ng/grs]	Startfracht Schlamm [µg]	Rücklösung [%]
Batch 11	800	nur AK	7,4	6,5	36,4	74	6,9	4,8	1,3	1,0	2,6	3,1	2,5	1,5	1.800	9,9	14,8
Batch 12	800	nur AK	7,3	6,5		83		5,1			3,0						
Batch 13	800	nur AK	7,3	6,5		65		4,9			3,8						
Batch 14	800	+FM	6,9	6,5	36,4	155	9,1	6,5	1,2	1,0	4,2	4,2	3,3	2,4	1.800	13,1	18,1
Batch 15	800	+FM	6,8	6,5		150		6,6			4,1						
Batch 16	800	+FM	6,8	6,6		160		7			4,2						
Batch 18	800	+Glucose	8,2	6,4	236,4	190	6,9	4,7	1,3	1,0	4,3	3,9	3,1	2,1	1.800	9,9	21,2
Batch 19	800	+Glucose	8,2	6,6		120		4,6			3,4						
Batch 20	800	+Glucose	8,2	6,4		170		4,6			4,1						

NR	Volumen [mL]	Randbed.	pH Start	pH End	DOC Start [mg/L]	DOC End [mg/L]	TS Start [g/L]	TS End [g/L]	Metoprolol								
									Startkonz. [µg/L]	Startfracht [µg]	Endkonz. [µg/L]	MW [µg/L]	Endfracht [µg]	Frachtrückgel. [µg]	Startkonz. Schlamm [ng/grs]	Startfracht Schlamm [µg]	Rücklösung [%]
Batch 11	800	nur AK	7,4	6,5	36,4	74	6,9	4,8	0,4	0,3	0,45	0,5	0,4	0,1	2.700	14,9	0,4
Batch 12	800	nur AK	7,3	6,5		83		5,1			0,54						
Batch 13	800	nur AK	7,3	6,5		65		4,9			0,43						
Batch 14	800	+FM	6,9	6,5	36,4	155	9,1	6,5	0,32	0,3	0,31	0,4	0,3	0,0	2.700	19,7	0,1
Batch 15	800	+FM	6,8	6,5		150		6,6			0,36						
Batch 16	800	+FM	6,8	6,6		160		7			0,40						
Batch 18	800	+Glucose	8,2	6,4	236,4	190	6,9	4,7	0,4	0,3	0,90	0,8	0,7	0,3	2.700	14,9	2,3
Batch 19	800	+Glucose	8,2	6,6		120		4,6			0,68						
Batch 20	800	+Glucose	8,2	6,4		170		4,6			0,91						

NR	Volumen [mL]	Randbed.	pH Start	pH End	DOC Start [mg/L]	DOC End [mg/L]	TS Start [g/L]	TS End [g/L]	Sulfamethoxazol								
									Startkonz. [µg/L]	Startfracht [µg]	Endkonz. [µg/L]	MW [µg/L]	Endfracht [µg]	Frachtrückgel. [µg]	Startkonz. Schlamm [ng/grs]	Startfracht Schlamm [µg]	Rücklösung [%]
Batch 11	800	nur AK	7,4	6,5	36,4	74	6,9	4,8	0,3	0,2	< 0,01	0,0	0,0	-0,2	500	2,8	-8,7
Batch 12	800	nur AK	7,3	6,5		83		5,1			< 0,01						
Batch 13	800	nur AK	7,3	6,5		65		4,9			< 0,01						
Batch 14	800	+FM	6,9	6,5	36,4	155	9,1	6,5	0,31	0,2	< 0,01	0,0	0,0	-0,2	500	3,6	-6,8
Batch 15	800	+FM	6,8	6,5		150		6,6			< 0,01						
Batch 16	800	+FM	6,8	6,6		160		7			< 0,01						
Batch 18	800	+Glucose	8,2	6,4	236,4	190	6,9	4,7	0,3	0,2	< 0,01	0,0	0,0	-0,2	500	2,8	-8,7
Batch 19	800	+Glucose	8,2	6,6		120		4,6			< 0,01						
Batch 20	800	+Glucose	8,2	6,4		170		4,6			< 0,01						

Anhang W: Daten zu den anaeroben Batchversuchen an der RUB (Versuchsreihe 2: 55-56°C, 25 d)

Benzo- triazol	Carba- mazepin	Diclofenac	Metoprolol	Sulfa- methoxazol
[ng/g TS]	[ng/g TS]	[ng/g TS]	[ng/g TS]	[ng/g TS]
38.000	1.060	1.600	3.100	460

Benzotriazol																	
NR	Volumen [mL]	Randbed.	pH Start	pH End	DOC Start [mg/L]	DOC End [mg/L]	TS Start [g/L]	TS End [g/L]	Startkonz. [µg/L]	Startfracht [µg]	Endkonz. [µg/L]	MW [µg/L]	Endfracht [µg]	Fracht rückgel. [µg]	Startkonz. Schlamm [ng/grs]	Startfracht Schlamm [µg]	Rücklösung [%]
Batch 11	800	nur AK	7	7,1		366		9,8			44						
Batch 12	800	nur AK	7	7,1	64,4	396	13,5	9,2	42,0	33,6	40	46,3	37,1	3,5	38.000	410,4	0,8
Batch 13	800	nur AK	7	7,1		315		9,4			55						
Batch 14	800	+FM	6,9	7,1		283		9,8			53						
Batch 15	800	+FM	6,9	7,1	64,4	231	14,4	9,7	42,0	33,6	40	45,3	36,3	2,7	38.000	437,8	0,6
Batch 16	800	+FM	6,9	7,1		187		9,5			43						
Batch 18	800	+Glucose	7,2	7,1		220		9,8			49						
Batch 19	800	+Glucose	7,2	7,1	264,4	194	13,0	9,9	42,0	33,6	58	55,7	44,5	10,9	38.000	395,2	2,8
Batch 20	800	+Glucose	7,2	7,1		167		9,6			60						

Carbamazepin																	
NR	Volumen [mL]	Randbed.	pH Start	pH End	DOC Start [mg/L]	DOC End [mg/L]	TS Start [g/L]	TS End [g/L]	Startkonz. [µg/L]	Startfracht [µg]	Endkonz. [µg/L]	MW [µg/L]	Endfracht [µg]	Fracht rückgel. [µg]	Startkonz. Schlamm [ng/grs]	Startfracht Schlamm [µg]	Rücklösung [%]
Batch 11	800	nur AK	7	7,1		366		9,8			4,2						
Batch 12	800	nur AK	7	7,1	64,4	396	13,5	9,2	1,4	1,1	3,9	4,5	3,6	2,5	1.060	11,4	21,7
Batch 13	800	nur AK	7	7,1		315		9,4			5,4						
Batch 14	800	+FM	6,9	7,1		283		9,8			6,1						
Batch 15	800	+FM	6,9	7,1	64,4	231	14,4	9,7	1,4	1,1	4,1	5,0	4,0	2,9	1.060	12,2	23,6
Batch 16	800	+FM	6,9	7,1		187		9,5			4,8						
Batch 18	800	+Glucose	7,2	7,1		220		9,8			5,1						
Batch 19	800	+Glucose	7,2	7,1	264,4	194	13,0	9,9	1,4	1,1	5,4	5,4	4,3	3,2	1.060	11,0	29,0
Batch 20	800	+Glucose	7,2	7,1		167		9,6			5,7						

Diclofenac																	
NR	Volumen [mL]	Randbed.	pH Start	pH End	DOC Start [mg/L]	DOC End [mg/L]	TS Start [g/L]	TS End [g/L]	Startkonz. [µg/L]	Startfracht [µg]	Endkonz. [µg/L]	MW [µg/L]	Endfracht [µg]	Fracht rückgel. [µg]	Startkonz. Schlamm [ng/grs]	Startfracht Schlamm [µg]	Rücklösung [%]
Batch 11	800	nur AK	7	7,1		366		9,8			11						
Batch 12	800	nur AK	7	7,1	64,4	396	13,5	9,2	1,1	0,9	11	11,0	8,8	7,9	1.600	17,3	45,8
Batch 13	800	nur AK	7	7,1		315		9,4			11						
Batch 14	800	+FM	6,9	7,1		283		9,8			18						
Batch 15	800	+FM	6,9	7,1	64,4	231	14,4	9,7	1,1	0,9	14	15,7	12,5	11,7	1.600	18,4	63,2
Batch 16	800	+FM	6,9	7,1		187		9,5			15						
Batch 18	800	+Glucose	7,2	7,1		220		9,8			17						
Batch 19	800	+Glucose	7,2	7,1	264,4	194	13,0	9,9	1,1	0,9	20	17,0	13,6	12,7	1.600	16,6	76,4
Batch 20	800	+Glucose	7,2	7,1		167		9,6			14						

Metoprolol																	
NR	Volumen [mL]	Randbed.	pH Start	pH End	DOC Start [mg/L]	DOC End [mg/L]	TS Start [g/L]	TS End [g/L]	Startkonz. [µg/L]	Startfracht [µg]	Endkonz. [µg/L]	MW [µg/L]	Endfracht [µg]	Fracht rückgel. [µg]	Startkonz. Schlamm [ng/grs]	Startfracht Schlamm [µg]	Rücklösung [%]
Batch 11	800	nur AK	7	7,1		366		9,8			3,5						
Batch 12	800	nur AK	7	7,1	64,4	396	13,5	9,2	0,6	0,5	2,7	3,1	2,5	2,0	3.100	33,5	5,9
Batch 13	800	nur AK	7	7,1		315		9,4			3,1						
Batch 14	800	+FM	6,9	7,1		283		9,8			4,1						
Batch 15	800	+FM	6,9	7,1	64,4	231	14,4	9,7	0,6	0,5	2,8	3,3	2,7	2,2	3.100	35,7	6,1
Batch 16	800	+FM	6,9	7,1		187		9,5			3,1						
Batch 18	800	+Glucose	7,2	7,1		220		9,8			3,6						
Batch 19	800	+Glucose	7,2	7,1	264,4	194	13,0	9,9	0,6	0,5	3,7	4,2	3,4	2,9	3.100	32,2	8,9
Batch 20	800	+Glucose	7,2	7,1		167		9,6			5,3						

Sulfamethoxazol																	
NR	Volumen [mL]	Randbed.	pH Start	pH End	DOC Start [mg/L]	DOC End [mg/L]	TS Start [g/L]	TS End [g/L]	Startkonz. [µg/L]	Startfracht [µg]	Endkonz. [µg/L]	MW [µg/L]	Endfracht [µg]	Fracht rückgel. [µg]	Startkonz. Schlamm [ng/grs]	Startfracht Schlamm [µg]	Rücklösung [%]
Batch 11	800	nur AK	7	7,1		366		9,8			< 0,01						
Batch 12	800	nur AK	7	7,1	64,4	396	13,5	9,2	0,3	0,2	< 0,01	0,0	0,0	-0,2	460	5,0	-4,7
Batch 13	800	nur AK	7	7,1		315		9,4			< 0,01						
Batch 14	800	+FM	6,9	7,1		283		9,8			< 0,01						
Batch 15	800	+FM	6,9	7,1	64,4	231	14,4	9,7	0,3	0,2	< 0,01	0,0	0,0	-0,2	460	5,3	-4,4
Batch 16	800	+FM	6,9	7,1		187		9,5			< 0,01						
Batch 18	800	+Glucose	7,2	7,1		220		9,8			< 0,01						
Batch 19	800	+Glucose	7,2	7,1	264,4	194	13,0	9,9	0,3	0,2	< 0,01	0,0	0,0	-0,2	460	4,8	-4,8
Batch 20	800	+Glucose	7,2	7,1		167		9,6			< 0,01						

Anhang X: Daten zu den anaeroben Batchversuchen an der RUB (Versuchsreihe 2: 36°C, 39 d)

Benzo-triazol [ng/g TS]	Carba-mazepin [ng/g TS]	Diclofenac [ng/g TS]	Metoprolol [ng/g TS]	Sulfa-methoxazol [ng/g TS]
16.000	4.200	2.300	6.700	580

Benzotriazol																			
NR	Volumen [mL]	Randbed.	pH Start	pH End	DOC Start [mg/L]	DOC End [mg/L]	GV Start [%]	GV End [%]	TS Start [g/L]	TS End [g/L]	Startkonz. [µg/L]	Startfracht [µg]	Endkonz. [µg/L]	MW [µg/L]	Endfracht [µg]	Fracht rückgel. [µg]	Startkonz. Schlamm [ng/grs]	Startfracht Schlamm [µg]	Rücklösung [%]
Batch 11	800	nur AK	7,1	7		195		75		4,4			180						
Batch 12	800	nur AK	7,1	7	52,0	197	84	74	6,4	4,5	28,0	22,4	220	210,0	168,0	145,6	160.000	819,2	17,8
Batch 13	800	nur AK	7,1	7		184		75		4,5			230						
Batch 14	800	+FM	6,9	6,7		197		72		4,5			250						
Batch 15	800	+FM	6,9	6,7	52,0	224	84	73	6,0	4,8	28,0	22,4	220	226,7	181,3	158,9	160.000	768,0	20,7
Batch 16	800	+FM	6,9	6,7		191		74		4,6			210						
Batch 18	800	+Glucose	7	7,1		176		74		4,4			170						
Batch 19	800	+Glucose	7	7,1	252,0	177	84	75	6,6	4,6	28,0	5,0	190	183,3	146,7	141,7	160.000	844,8	16,8
Batch 20	800	+Glucose	7	7		172		75		4,6			190						

Carbamazepin																			
NR	Volumen [mL]	Randbed.	pH Start	pH End	DOC Start [mg/L]	DOC End [mg/L]	GV Start [%]	GV End [%]	TS Start [g/L]	TS End [g/L]	Startkonz. [µg/L]	Startfracht [µg]	Endkonz. [µg/L]	MW [µg/L]	Endfracht [µg]	Fracht rückgel. [µg]	Startkonz. Schlamm [ng/grs]	Startfracht Schlamm [µg]	Rücklösung [%]
Batch 11	800	nur AK	7,1	7		195		75		4,4			1,8						
Batch 12	800	nur AK	7,1	7	52,0	197	84	74	6,4	4,5	0,6	0,5	1,8	1,8	1,4	1,0	4.200	21,5	4,5
Batch 13	800	nur AK	7,1	7		184		75		4,5			1,8						
Batch 14	800	+FM	6,9	6,7		197		72		4,5			1,7						
Batch 15	800	+FM	6,9	6,7	52,0	224	84	73	6,0	4,8	0,6	0,5	1,8	1,7	1,4	0,9	4.200	20,2	4,4
Batch 16	800	+FM	6,9	6,7		191		74		4,6			1,6						
Batch 18	800	+Glucose	7	7,1		176		74		4,4			2,5						
Batch 19	800	+Glucose	7	7,1	252,0	177	84	75	6,6	4,6	0,6	0,5	2,6	2,5	2,0	1,5	4.200	22,2	6,9
Batch 20	800	+Glucose	7	7		172		75		4,6			2,4						

Diclofenac																			
NR	Volumen [mL]	Randbed.	pH Start	pH End	DOC Start [mg/L]	DOC End [mg/L]	GV Start [%]	GV End [%]	TS Start [g/L]	TS End [g/L]	Startkonz. [µg/L]	Startfracht [µg]	Endkonz. [µg/L]	MW [µg/L]	Endfracht [µg]	Fracht rückgel. [µg]	Startkonz. Schlamm [ng/grs]	Startfracht Schlamm [µg]	Rücklösung [%]
Batch 11	800	nur AK	7,1	7		195		75		4,4			5,8						
Batch 12	800	nur AK	7,1	7	52,0	197	84	74	6,4	4,5	1,6	1,3	6,5	6,2	5,0	3,7	2.300	11,8	31,3
Batch 13	800	nur AK	7,1	7		184		75		4,5			6,3						
Batch 14	800	+FM	6,9	6,7		197		72		4,5			5,9						
Batch 15	800	+FM	6,9	6,7	52,0	224	84	73	6,0	4,8	1,6	1,3	6,3	6,2	5,0	3,7	2.300	11,0	33,3
Batch 16	800	+FM	6,9	6,7		191		74		4,6			6,4						
Batch 18	800	+Glucose	7	7,1		176		74		4,4			7,8						
Batch 19	800	+Glucose	7	7,1	252,0	177	84	75	6,6	4,6	1,6	1,3	7,2	7,4	5,9	4,6	2.300	12,1	38,0
Batch 20	800	+Glucose	7	7		172		75		4,6			7,1						

Metoprolol																			
NR	Volumen [mL]	Randbed.	pH Start	pH End	DOC Start [mg/L]	DOC End [mg/L]	GV Start [%]	GV End [%]	TS Start [g/L]	TS End [g/L]	Startkonz. [µg/L]	Startfracht [µg]	Endkonz. [µg/L]	MW [µg/L]	Endfracht [µg]	Fracht rückgel. [µg]	Startkonz. Schlamm [ng/grs]	Startfracht Schlamm [µg]	Rücklösung [%]
Batch 11	800	nur AK	7,1	7		195		75		4,4			0,7						
Batch 12	800	nur AK	7,1	7	52,0	197	84	74	6,4	4,5	0,4	0,3	0,8	0,8	0,6	0,3	6.700	34,3	1,0
Batch 13	800	nur AK	7,1	7		184		75		4,5			0,9						
Batch 14	800	+FM	6,9	6,7		197		72		4,5			0,8						
Batch 15	800	+FM	6,9	6,7	52,0	224	84	73	6,0	4,8	0,4	0,3	0,7	0,8	0,6	0,3	6.700	32,2	1,0
Batch 16	800	+FM	6,9	6,7		191		74		4,6			0,9						
Batch 18	800	+Glucose	7	7,1		176		74		4,4			1,9						
Batch 19	800	+Glucose	7	7,1	252,0	177	84	75	6,6	4,6	0,4	0,3	1,8	2,0	1,6	1,3	6.700	35,4	3,8
Batch 20	800	+Glucose	7	7		172		75		4,6			2,4						

Sulfamethoxazol																			
NR	Volumen [mL]	Randbed.	pH Start	pH End	DOC Start [mg/L]	DOC End [mg/L]	GV Start [%]	GV End [%]	TS Start [g/L]	TS End [g/L]	Startkonz. [µg/L]	Startfracht [µg]	Endkonz. [µg/L]	MW [µg/L]	Endfracht [µg]	Fracht rückgel. [µg]	Startkonz. Schlamm [ng/grs]	Startfracht Schlamm [µg]	Rücklösung [%]
Batch 11	800	nur AK	7,1	7		195		75		4,4			< 0,01						
Batch 12	800	nur AK	7,1	7	52,0	197	84	74	6,4	4,5	0,4	0,3	< 0,01	0,0	0,0	-0,3	580	3,0	-10,5
Batch 13	800	nur AK	7,1	7		184		75		4,5			< 0,01						
Batch 14	800	+FM	6,9	6,7		197		72		4,5			< 0,01						
Batch 15	800	+FM	6,9	6,7	52,0	224	84	73	6,0	4,8	0,4	0,3	< 0,01	0,0	0,0	-0,3	580	2,8	-11,2
Batch 16	800	+FM	6,9	6,7		191		74		4,6			< 0,01						
Batch 18	800	+Glucose	7	7,1		176		74		4,4			< 0,01						
Batch 19	800	+Glucose	7	7,1	252,0	177	84	75	6,6	4,6	0,4	0,3	< 0,01	0,0	0,0	-0,3	580	3,1	-10,2
Batch 20	800	+Glucose	7	7		172		75		4,6			< 0,01						