



Hochschule für Angewandte
Wissenschaften Hamburg
Hamburg University of Applied Sciences



Hochschule für Angewandte Wissenschaften Hamburg
Fakultät Life Science

Bachelorarbeit im Studiengang Umwelttechnik
zur Erlangung des akademischen Grades
Bachelor of Science (B.Sc.)

Optimierung der verfahrenstechnischen Parameter einer Laborkläranlage zur Untersuchung des biologischen Abbaus von Antibiotika

vorgelegt von

Gordon Timm

Matrikelnummer XXXXXXXXXX

Hamburg den,

19.08.2017

- 1. Gutachter:** Prof. Dr.-Ing. Jörn Einfeldt (HAW Hamburg)
- 2. Gutachterin:** Prof. Dr. Carolin Floeter (HAW Hamburg)

Die Abschlussarbeit wurde betreut und erstellt an der
Hochschule für Angewandte Wissenschaften Hamburg

Danksagung

Die vorliegende Arbeit wurde im PharmCycle-Projekt unter der Betreuung von Prof. Dr.-Ing. Jörn Einfeldt und M.Sc. Jan Demmer durchgeführt. Ich möchte mich herzlich bei dem gesamten Team des PharmCycle-Projektes und ganz besonders bei Prof. Dr.-Ing. Jörn Einfeldt, M.Sc. Jan Demmer und B.A. Sandra Lichtenberg für die tolle Zusammenarbeit bei der Durchführung verschiedenster Versuche und für die Unterstützung bei schwierigen Fragestellungen bedanken. Ein außerordentlicher Dank gebührt außerdem den Mitarbeitern des Verfahrenstechniklabors Dipl.-Ing. Stefan Wittkowski, Dipl.-Ing. Marc Hannappel und Thomas Wendland, die zu jeder Zeit mit konstruktiven Ideen und Labormaterial diese Arbeit erst möglich gemacht haben. Des Weiteren möchte ich mich ganz herzlich bei M.Sc. Jens Heseding und der Leuphana Universität Lüneburg für die Unterstützung der Probenvorbereitung und Auswertung der Proben bedanken. Abschließend bedanke ich mich bei meiner Familie und Freunden für die Unterstützung und den moralischen Beistand bei der Erstellung dieser Arbeit.

Zusammenfassung

Diese Bachelorarbeit „Optimierung der verfahrenstechnischen Parameter einer Laborkläranlage zur Untersuchung des biologischen Abbaus von Antibiotika“ wurde im Rahmen des PharmCycle Projektes an der Hochschule für angewandte Wissenschaften Hamburg erstellt. Das Projekt untersucht die Auswirkungen von Antibiotika auf die Umwelt und hat das Ziel, mit unterschiedlichen verfahrenstechnischen Anlagen, Antibiotikafrachten aus dem Abwasser zu reduzieren. Die biologische Abwasserreinigung von Antibiotika soll durch zwei Laborkläranlagen (LKA) untersucht werden.

Die Bachelorarbeit beschäftigt sich im ersten Abschnitt mit Umbaumaßnahmen der verwendeten Laborkläranlagen „LKA-KLD4NSR“ zur Einstellung einer konstanten CSB-Zulaufkonzentration. Die CSB-Zulaufkonzentration ist abhängig vom eingesetzten synthetischen Abwasser, welches in Bezug auf die partikulären und gelösten Anteile der CSB-Fraktion nach dem DWA-A 131 untersucht wird.

Im zweiten Abschnitt werden verschiedene Maßnahmen zur Blähschlammvermeidung in Laborkläranlagen untersucht und ausgewertet, womit ein stabiler Betrieb der LKA erreicht werden kann.

Im dritten Abschnitt wird in Bezug auf das Bemessungsschema nach DWA-A 131 eine Auswertung der Betriebsparameter der LKA vorgenommen, um ein konstantes Schlammalter in Abhängigkeit der CSB-Zulaufkonzentration einstellen zu können.

Im vierten Abschnitt wird ein Vorversuch für die Membranfiltrations- und Aktivkohleadsorptionsanlage durchgeführt. Hierbei wird mit Hilfe von bereitgestellten Sammelproben mit verschiedenen Randbedingungen der Umfang von Abbauvorgängen des gereinigten Abwassers untersucht. Hierfür werden übliche Zu- und Ablaufkonzentrationen von Sulfamethoxazol für kommunale Kläranlagen zusammengestellt

Abschließend wird die Eliminationsrate der LKA in Bezug auf das Antibiotikum Sulfamethoxazol (SMX) erfasst. Weitere Optimierungsmöglichkeiten der Versuchsdurchführungen und der Betriebsführung werden in der Diskussion/Fazit ausgeführt.

Abstract

This study "Examination of biological degradation of Antibiotics by optimizing procedural parameters of a laboratory treatment plant" was developed under the PharmCycle project at the Hamburg University of Applied Sciences. This project evaluates the effects of antibiotics on the environment and has the intent to reduce the mass flow of antibiotic substances from wastewater by using different construction of process technology. The aim of this thesis is to analyze with two laboratory treatment plants the biological wastewater treatment of antibiotics.

In the first phase, the bachelor thesis is involved with modification of the used laboratory wastewater treatment plants "LKA-KLD4NSR" to realize a constant COD inflow concentration. The COD concentration depends on the used synthetic wastewater, which is concerning to the particulate and dissolved fractions of the COD fraction and will be analyzed according to the DWA-A 131.

In the second stage, different procedures of prevention bulking sludge in wastewater treatment plants was analyzed and evaluated. Some of this prevention realized a stable operation of the laboratory wastewater treatment plants.

In the third phase, an evaluation of the operating parameters of wastewater treatment plant was performed according to the design scheme of DWA-A 131 to be able to set a constant sludge age as a function of the COD inflow concentration.

In the fourth phase, a preliminary test for membrane filtration and activated carbon adsorption plants is realized. Several samples with various boundary conditions are used to test the extent of degradation processes of the cleaned wastewater. In this connection usual in- and outflow concentrations of sulfamethoxazole for urban wastewater treatment plants were summarized by means of research.

Finally, the elimination rate of the laboratory wastewater treatment plant by reference of the antibiotic sulfamethoxazole was measured. Further optimization possibilities of the experiment and operation management are examined in the result.

Inhaltsverzeichnis

| | |
|--|--------------|
| Danksagung | I |
| Zusammenfassung | II |
| Abstract | III |
| Inhaltsverzeichnis | IV |
| Abbildungsverzeichnis | VII |
| Tabellenverzeichnis | IX |
| Abkürzungsverzeichnis | X |
| 1 Einleitung | - 1 - |
| 1.1 Arzneimittel | - 3 - |
| 1.1.1 Eintragungspfade in die Umwelt | - 3 - |
| 1.1.2 Resistenzbildung..... | - 4 - |
| 1.1.3 Sulfamethoxazol | - 5 - |
| 1.1.4 Zu- und Ablaufkonzentrationen kommunaler Kläranlagen | - 6 - |
| 2 Zielsetzung | - 7 - |
| 3 Theoretische Grundlagen | - 9 - |
| 3.1 Erläuterung der Laborkläranlagen..... | - 9 - |
| 3.1.1 Anlagen Ausgangszustand | - 9 - |
| 3.1.2 Ausgangsparametrierung der Anlage zu Beginn der Bachelorarbeit | - 11 - |
| 3.1.3 Optimierungsbedürftige Probleme während der Betriebsführung | - 12 - |
| 3.2 Relevante Parameter der Abwasserreinigung..... | - 14 - |
| 3.2.1 Biochemischer Sauerstoffbedarf | - 14 - |
| 3.2.2 Chemischer Sauerstoffbedarf..... | - 14 - |
| 3.2.3 Nährstoffbedarf | - 14 - |
| 3.2.4 Nitrifikation..... | - 15 - |
| 3.2.5 Denitrifikation..... | - 16 - |
| 3.2.6 Sauerstoffkonzentration..... | - 16 - |
| 3.2.7 pH-Wert | - 16 - |
| 3.2.8 Alkalinität..... | - 17 - |
| 3.2.9 Charakterisierung der Klärschlämme | - 17 - |
| 3.2.9.1 Schlammarten | - 17 - |
| 3.2.9.2 Schlammindex..... | - 18 - |
| 3.2.9.3 Trockenrückstand | - 18 - |
| 3.2.9.4 Trockensubstanz | - 18 - |
| 3.3 Berechnungsgrundlagen..... | - 18 - |

| | | |
|----------|---|---------------|
| 3.3.1 | Zusammensetzung des verwendeten Abwassers | - 18 - |
| 3.3.2 | Bestimmung der hydraulischen Verweilzeit in Abhängigkeit des Abwasserzulaufstromes | - 20 - |
| 3.3.3 | Bestimmung der CSB-Wochenzulaufkraft | - 20 - |
| 3.3.4 | Bemessungsgrundlagen nach DWA-A 131 | - 21 - |
| 3.3.4.1 | Fraktionierung des chemischen Sauerstoffbedarfs | - 21 - |
| 3.3.4.2 | Schlammproduktion aus dem CSB-Abbau | - 25 - |
| 3.3.4.3 | Phosphatelimination und Fällmittelbedarf | - 27 - |
| 3.3.4.4 | Schlammproduktion aus der Phosphatelimination | - 28 - |
| 3.3.4.5 | Bestimmung des gesamten Überschussschlammes | - 28 - |
| 3.3.4.6 | Zusammenhang Schlammproduktion und Schlammalter | - 28 - |
| 3.3.4.7 | Berechnung der zu denitrifizierenden Nitratkonzentration | - 30 - |
| 3.3.4.8 | Sauerstoffbedarf für den Kohlenstoffabbau | - 30 - |
| 3.3.4.9 | Vergleich Sauerstoff-Verbrauch und Sauerstoff-Dargebot | - 34 - |
| 3.3.4.10 | Rückführverhältnisse | - 34 - |
| 4 | Material und Methoden | - 36 - |
| 4.1.1 | Sauerstoffkonzentration | - 36 - |
| 4.1.2 | pH-Wert | - 36 - |
| 4.1.3 | TS-Messung | - 36 - |
| 4.1.4 | Photometrische Messungen | - 36 - |
| 4.1.4.1 | Ammonium | - 37 - |
| 4.1.4.2 | Nitrat | - 37 - |
| 4.1.4.3 | Nitrit | - 37 - |
| 4.1.4.4 | Alkalinität | - 37 - |
| 4.1.4.5 | Phosphat | - 38 - |
| 4.1.4.6 | Chemischer Sauerstoffbedarf | - 38 - |
| 4.1.5 | CSB-Fraktionierung | - 38 - |
| 4.1.6 | SPE-Festphasenextraktion für die Sulfamethoxazol Messung | - 39 - |
| 5 | Durchführung | - 40 - |
| 5.1 | TS-Messung | - 40 - |
| 5.2 | Photometrische Messungen | - 41 - |
| 5.3 | Technischer Umbau der Laborkläranlage | - 42 - |
| 5.4 | Fördermengenmessung | - 43 - |
| 5.5 | Abbauverhalten des gekühlten Vorlagebehälters | - 43 - |
| 5.6 | CSB-Fraktionierung des synthetischen Abwassers | - 43 - |
| 5.7 | Anlagen Endzustand | - 45 - |

| | | |
|----------|---|---------------|
| 5.8 | SPE-Festphasenextraktion | - 46 - |
| 5.9 | Vorversuch zum Umfang von Abbauvorgängen in bereitgestellten Sammelproben unter verschiedenen Randbedingungen | - 48 - |
| 5.10 | Sulfamethoxazol Dosierung..... | - 48 - |
| 6 | Ergebnisse..... | - 49 - |
| 6.1 | Auswertung der Fördermengenstabilität | - 49 - |
| 6.2 | Einfluss der Ablagerungen im Nährstoffzulaufschlauch..... | - 51 - |
| 6.3 | Abbauverhalten des gekühlten Vorlagebehälters..... | - 53 - |
| 6.4 | Maßnahmen zur Blähschlammvermeidung nach DIN EN ISO 11733:2004 (D) | - 56 - |
| 6.5 | CSB-Fraktionierung des synthetischen Abwassers..... | - 59 - |
| 6.6 | Auswertung der Trockensubstanzmessung und Schlamm Bilanzierung | - 60 - |
| 6.7 | Bestimmung der Zulaufkonzentration für verschiedenen Schlammalter | - 66 - |
| 6.8 | Anlagen Endzustand | - 72 - |
| 6.9 | Vorversuch zum Umfang von Abbauvorgängen in bereitgestellten Sammelproben unter verschiedenen Randbedingungen | - 75 - |
| 6.10 | Elimination von Sulfamethoxazol | - 80 - |
| 7 | Diskussion & Fazit | - 84 - |
| | Literaturverzeichnis..... | - 86 - |
| | Eidesstattliche Erklärung | i. |
| | Anhang A: Herstellerangaben zur Zusammensetzung der verwendeten Substanzen des OECD-Mediums | ii. |
| | Anhang B: Bemessungsschema der Denitrifikation nach DWA-A 131..... | iii. |
| | Anhang C: Zusammenfassung zur Durchführung der photometrischen Messungen | iv. |
| | Anhang D: Kalibrierung der Peristaltik-Pumpen „heidolph-Hei-Flow Precision 01“ | v. |
| | Anhang E: CSB-Messung zum Abbauverhalten im Vorlagebehälter bei 4°C | vi. |
| | Anhang F: Auswirkung des Filtermaterials auf die Messung der CSB-Fractionen..... | vii. |
| | Anhang F.1: CSB-Fraktionierung im Zulauf (Vorlagebehälter) bei 1875 mgCSB/l | viii. |
| | Anhang F.2: CSB-Fraktionierung im Ablauf (im Mittel 16 mgCSB/l)..... | ix. |
| | Anhang G: Schlamm Bilanzierung LKA 1 und 2 | x. |
| | Anhang H: Iteration der CSB-Zulaufkonzentration | xi. |
| | Anhang I: Anpassung der CSB-Zulaufkonzentration und der Stickstoffkonzentration | xii. |
| | Anhang J: Analyseauswertung Sulfamethoxazol | xiii. |
| | Anhang K: Messwerte der Wasseranalyse | xiv. |
| | Anhang L: Wasseranalysen zu Versuch 1 bis 4 | xv. |

Abbildungsverzeichnis

| | |
|---|--------|
| ABBILDUNG 1: Schematische Arzneimitteleintragungspfade (Cantas, 2013)..... | - 3 - |
| ABBILDUNG 2: Summenformel von Sulfamethoxazol (Türk et al., 2013) | - 5 - |
| ABBILDUNG 3: Fließschema der Laborkläranlage (Scharff, 2017)..... | - 9 - |
| ABBILDUNG 4: Verwendete Laborkläranlage (Scharff, 2017) | - 10 - |
| ABBILDUNG 5: Blähschlamm in der Nachklärung (eigene Darstellung)..... | - 13 - |
| ABBILDUNG 6: Ablagerungen der Nährstoff-Zulaufschläuche | - 13 - |
| ABBILDUNG 7: Prinzipschema der CSB-Fraktion und der abfiltrierbaren Stoffe bei der biologischen Behandlung (DWA, 2016)..... | - 22 - |
| ABBILDUNG 8: Zulaufpumpen "heidolph" für Nährstoff und Wasser..... | - 42 - |
| ABBILDUNG 9: Gekühlter Vorlagebehälter | - 42 - |
| ABBILDUNG 10: Versuchsaufbau des Filtrationsgefäßes (eigene Darstellung)..... | - 44 - |
| ABBILDUNG 11: Versuchsaufbau der Festphasenextraktion | - 46 - |
| ABBILDUNG 12: Fördermengen- und Kalibrierungsüberprüfungen des Nährstoffzulaufes (pro Tag ist der gemessene Istwert und der eventuell kalibrierte Wert eingetragen) | - 50 - |
| ABBILDUNG 13: Fördermengen- und Kalibrierungsüberprüfungen des Wasserzulaufes (pro Tag ist der gemessene Istwert und der eventuell kalibrierte Wert eingetragen)..... | - 50 - |
| ABBILDUNG 14: $C_{CSB,ZB}$ vor und nach der Umstellung des Zulaufvolumenstromes..... | - 53 - |
| ABBILDUNG 15: Charakterisierung des Abbauverhaltens der CSB-Konzentration im Vorlagebehälter des OECD-Mediums bei 4°C über 96 Stunden | - 54 - |
| ABBILDUNG 16: Charakterisierung des Abbauverhaltens der CSB-Konzentration im Vorlagebehälter des OECD-Mediums bei 4°C über 72 Stunden..... | - 55 - |
| ABBILDUNG 17: Schwarze Färbung der Nährstoffzulaufschläuche durch die Spurenelemente (eigene Darstellung) | - 57 - |
| ABBILDUNG 18: Schimmel-/Pilzsporen im Überlaufschlamm(eigene Darstellung) | - 57 - |
| ABBILDUNG 19: Abdeckung der Laborkläranlage mit Alu-Folie, mit Sichtfenstern in der Nachklärung (eigene Darstellung) | - 58 - |
| ABBILDUNG 20: Rührung in der Nachklärung mit einem Gleichstrommotor für sehr geringe Umdrehungen (eigene Darstellung) | - 59 - |
| ABBILDUNG 21: Trockensubstanzgehalt im Belebungsbecken der Nitrifikation | - 61 - |
| ABBILDUNG 22: Trockensubstanzgehalt des Rückführschlammes | - 62 - |
| ABBILDUNG 23: Gesamter Überschussschlamm aus Messungen der Trockensubstanz und Berechnungen des täglich positiven Schlammzuwachses im Belebungsbecken der Nitrifikation des ermittelten Trockensubstanzgehaltes vom Vortag..... | - 63 - |
| ABBILDUNG 24: Siebentage Mittelwert des Schlammalters..... | - 65 - |

| | |
|---|--------|
| ABBILDUNG 25: Fließschema der Laborkläranlage auf Grundlage von (Demmer, 2016) | - 72 - |
| ABBILDUNG 26: Endzustand der Laborkläranlage nach Umbau (eigene Darstellung)..... | - 73 - |
| ABBILDUNG 27: Temperaturverläufe des Wasserbads/Kühlschranks während des Versuchszeitraums der Versuche 1 bis 4..... | - 75 - |
| ABBILDUNG 28: Werte der Stickstoff-Wasseranalyse von Versuche 1 (4°C) und 2 (25°C) mit SMX. - | 76 - |
| ABBILDUNG 29: Messwerte der Gesamtphosphat-, PH-Wert- und Säurekapazitäts-Wasseranalyse von Versuch 1 (4°C) und 2 (25°C) | - 77 - |
| ABBILDUNG 30: CSB-Konzentrationen der Proben von Versuch 1 (4°C) und 2 (25°C)..... | - 77 - |
| ABBILDUNG 31: Sauerstoffkonzentrationen der Proben vom Versuch 1 (4°C) und 2 (25°C) | - 78 - |
| ABBILDUNG 32: Stickstoffkonzentrationen der Versuche 3 (4°C) und 4 (25°C) ohne SMX | - 78 - |
| ABBILDUNG 33: Messwerte der Gesamtphosphat-, PH-Wert- und Säurekapazitäts-Wasseranalyse von Versuch 3 (4°C) und 4 (25°C) | - 79 - |
| ABBILDUNG 34: CSB-Konzentrationen der Proben von Versuch 3 (4°C) und 4 (25°C)..... | - 79 - |
| ABBILDUNG 35: Sauerstoffkonzentrationen der Proben vom Versuch 3 (4°C) und 4 (25°C) | - 80 - |
| ABBILDUNG 36: Ablaufkonzentration der Säurekapazität | - 83 - |
| ABBILDUNG 37: Bedienfeld Hei-Flow Precision (Heidolph, Feb. 2017)..... | - 7 - |

Tabellenverzeichnis

| | |
|--|--------|
| TABELLE 1: Sulfamethoxazolkonzentrationen im Zu- und Ablauf kommunaler Kläranlagen | - 6 - |
| TABELLE 2: Zu bearbeitende Fragestellung der Bachelorarbeit..... | - 8 - |
| TABELLE 3: Auslegungsparameter der Laborkläranlage aus (Scharff, 2017)..... | - 11 - |
| TABELLE 4: Optimierungsbedürftige Probleme während der bisherigen Betriebsführung | - 12 - |
| TABELLE 5: Maßnahmen zur Blähschlammvermeidung aus (DIN EN ISO, 2004) | - 13 - |
| TABELLE 6: Zusammensetzung des OECD-Mediums für eine CSB-Konzentration von 300 mg/l..... | - 19 - |
| TABELLE 7: Gesamt-Stickstoff und -Phosphor Konzentration in Abhängigkeit der CSB- Zulaufkonzentration..... | - 19 - |
| TABELLE 8: Zusammensetzung der Spurenelemente für eine CSB-Konzentration von 300 mg/l..... | - 20 - |
| TABELLE 9: Verwendete Chemikalien für die SPE-Durchführung..... | - 39 - |
| TABELLE 10: Verwendete Materialien für die SPE-Durchführung..... | - 39 - |
| TABELLE 11: Messbereiche und Verdünnungen der Analyten der photometrischen Bestimmung . | - 41 - |
| TABELLE 12: Wöchentliche Aufgaben der Betriebsführung | - 45 - |
| TABELLE 13: Arbeitsanweisung zur Durchführung der Festphasenextraktion (Heseding, 2017) | - 46 - |
| TABELLE 14: Einfluss der Schlauchablagerungen auf die CSB-Zulaufkonzentration | - 51 - |
| TABELLE 15: Zulaufkonzentrationen nach Änderung der Betriebsführung | - 52 - |
| TABELLE 16: Wochen Soll- und Ist-Frachten des Zulaufes | - 55 - |
| TABELLE 17: Zeitliche Abfolge der Maßnahmen zur Blähschlammvermeidung | - 56 - |
| TABELLE 18: Wochenmittel der gelösten und partikulären Anteile der CSB-Fraktion im Zulauf..... | - 59 - |
| TABELLE 19: Wochenmittel der gelösten und partikulären Anteile der CSB-Fractionen im Ablauf . | - 60 - |
| TABELLE 20: Verwendete Parameter der CSB-Fractionen, Phosphatbilanz und Stickstoffbilanz für die Berechnungen des Schlammalters in Abhängigkeit der CSB-Zulaufkonzentration | - 66 - |
| TABELLE 21: Ergebnisse der Iteration über $C_{CSB,ZB}$ in Abhängigkeit des Schlammalters mit Variation der Anteile für kommunales Abwasser nach DWA-A 131..... | - 68 - |
| TABELLE 22: Iteration über die CSB-Zulaufkonzentration für verschiedene Schlammalter mit einem TS_{BB} von 3,13 g/l..... | - 69 - |
| TABELLE 23: Iteration über die CSB-Zulaufkonzentration mit einem TS_{BB} von 3,13 g/l und einer Variation der Stickstoffzulaufkonzentration..... | - 70 - |
| TABELLE 24: Ergebnisse Sulfamethoxazolmessung der Versuch 1 und 2 | - 75 - |
| TABELLE 25: Ergebnisse der Sulfamethoxazol Dosierung in LKA zwei, basierend auf rechnerisch korrigierten Zulaufwerten..... | - 81 - |
| TABELLE 26: Ergebnisse der photometrischen Messungen als Mittelwert vom 28.04 bis 01.06.2017 im Vergleich zu angestrebten Ablaufkonzentrationen zusammengetragen aus verschiedenen Quellen | - 82 - |

Abkürzungsverzeichnis

| Abkürzung | Bedeutung |
|------------------|---|
| Abb. | Abbildung |
| AbwV | Abwasserverordnung |
| AMG | Arzneimittelgesetz |
| APHA | <i>American Public Health Association</i> |
| BB | Belebungsbecken |
| Berechn. | Berechnung |
| Bio. | Biologisch |
| BM | Biomasse |
| BSB | Biochemischer Sauerstoffbedarf |
| BSB ₅ | Biochemischer Sauerstoffbedarf für fünf Tage |
| CSB | Chemischer Sauerstoffbedarf |
| DEV | Deutsche Einheitsverfahren zur Wasser-, Abwasser- und Schlammuntersuchung |
| DIN | Deutsches Institut für Normung |
| DWA | Deutsche Vereinigung der Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall e.V. |
| EN | Europäische Normen |
| EPA | <i>Environmental Protection Agency</i> |
| Ertragskoeff. | Ertragskoeffizient |
| Fakt. | Faktor |
| Geb. | gebundenen |
| GK | Größenklasse |
| GKV | Gesetzliche Krankenversicherung |
| Gl. | Gleichung |
| GMP | <i>Good Manufacturing Practice</i> |
| HPLC | Hochleistungsflüssigkeitschromatographie |
| I.d.R. | In der Regel |
| ID | Innendurchmesser |
| ISO | <i>International Organization for Standardization</i> |
| KA | Kommunales Abwasser |
| LC | Flüssigchromatographie |
| LKA | Laborkläranlage |
| MS | Massenspektrometrie |
| N.N. | Nicht bekannt |
| NG | Nachweisgrenze |
| NK | Nachklärung |
| Org. | Organisch |
| REF | Referenz |
| Rmp | Umdrehung pro Minute |
| SMX | Sulfamethoxazol |
| SPE | Fest-Phasen-Extraktion |
| Theo. | Theoretisch |
| Verw. | Verwendet |

1 Einleitung

In Deutschland zählen Antibiotika zu den fünf umsatzstärksten Wirkstoffgruppen der ambulanten Gesetzlichen Krankenversicherung (GKV)-Arzneimittelverordnungen (GERMAP2015, 2016). In der Human- und Veterinärmedizin werden vereinzelt dieselben Antibiotika verwendet, deshalb sollten diese nur bei den Verbrauchsmengen unterschieden werden. Bei ca. 80 % der Atemwegsinfektionen werden Antibiotika von Ärzten verschrieben (DART2020, 2015). Atemwegsinfektionen werden meist durch virale Infekte ausgelöst, Antibiotika wirken jedoch ausschließlich bei bakteriellen Erkrankungen (Hübner, 2016). Die falsche Arzneimitteldosierung und -therapie (z.B. zu geringe Dosen oder durch frühzeitiges Therapieende) können zu vermehrter Resistenzbildung führen. Nicht nur der unsachgemäße Einsatz von Antibiotika in der Human- und Veterinärmedizin, sondern auch mangelnde Hygiene sowie Handels- und Reiseverkehr tragen zur einer Beschleunigung der Resistenzbildung (siehe Kapitel 1.1.2) bei (DART2020, 2015). Bis 2014 haben sich die Antibiotikaverbrauchszahlen der Humanmedizin auf rund 700-800 t pro Jahr stabilisiert. Bei der Veterinärmedizin ist die Abgabemenge von 1.706 t in 2011 auf 1.238 t im Jahr 2014 gesunken (GERMAP2015, 2016). Diese Abnahme ist zum einen auf die öffentliche Diskussion über die Reduktion des Arzneimitteleinsatzes und zum anderen auf die im Jahr 2014 verabschiedete Änderung des Arzneimittelgesetzes (16.AMG-Novelle¹) zurückzuführen. Seitdem müssen Mastbetriebe die Therapiehäufigkeiten an die Landesbehörden übermitteln (GERMAP2015, 2016). Dennoch ist seit 1991 der Anteil der „Reserveantibiotika“² am Gesamtverbrauch der Antibiotika auf rund 50% angestiegen. Vermehrt kommen Fluorchinolone und Cephalosporine der 3. und 4. Generation zum Einsatz, die zu den „Reserveantibiotika“ zählen. Diese Antibiotika sollten jedoch nur eingesetzt werden, wenn Standard-Antibiotika aufgrund von Resistenzbildung keine Wirkung mehr zeigen (Hübner, 2016). Eine Resistenzbildung ist sowohl bei Menschen als auch bei Tieren zu beobachten, eine Übertragung der Resistenzkeime zwischen Mensch und Tier ist möglich (GERMAP2015, 2016). Je nach betrachtetem Keim unterscheiden sich die problematischen Resistenzentwicklungen und Übertragungswege erheblich (Hübner, 2016). Die TV-Dokumentation vom NDR, WDR und der Süddeutschen Zeitung „Tödliche Supererreger aus Pharmafabriken“ wies am 04.05.2017 auf die Probleme der Verlagerungen von Produktionsstätten ins Ausland hin. Laut dieser Dokumentation werden rund 80 bis 90 % aller weltweit genutzten Antibiotika in China und Indien produziert. Zudem beziehen fast alle deutschen Pharmaunternehmen Antibiotika aus Hyderabad in Indien. Zwar greift die Richtlinie GMP (*Good Manufacturing Practice*). Diese bezieht sich jedoch nur auf die Qualität der importierten Wirkstoffe und nimmt keinen Einfluss auf die Produktionsweise und in wieweit dabei Umweltaspekte berücksichtigt werden (NDR, 2017). Vorort in Hyderabad konnten

¹ Änderung des Arzneimittelgesetzes (16. AMG-Novelle). Durch die Verbesserung der Tiergesundheit soll erreicht werden, dass weniger Antibiotika eingesetzt werden müssen und somit die Gefahr der Ausbreitung resistenter Bakterien sinkt.

² Von der WHO als „Critical Important Antibiotika“ bezeichnet (Hübner, 2016).

hohe Konzentrationen an Antibiotika und multiresistenten Erregern in Gewässern nachgewiesen werden. Die Proben wurden von Gewässern in unmittelbarer Nähe von Produktionsstätten, jedoch auch von weit entfernten Gewässern genommen (Lübbert et al., 2017). Globalisierung und Wirtschaft tragen dazu bei, dass der Preisdruck steigt und die Produktion in andere Länder verlagert wird. In diesen Ländern gelten meist geringere Standards und Richtlinien zu Lasten der Umwelt. Aktuelle Studien in Deutschland konnten belegen, dass vermehrt Arzneimittelwirkstoffe sowie deren Metaboliten³ und Transformationsprodukte⁴ in Oberflächenwasser, Grundwasser und Trinkwasser nachweisbar sind. Durch die meist hohe Polarität der Arzneimittelwirkstoffe ist ein erheblicher Aufwand bei der Entfernung in der Trinkwasseraufbereitung notwendig. Nicht nur von der Resistenzbildung geht eine Gefahr für Mensch, Tier und Umwelt aus, Human- und Veterinärarzneimittelwirkstoffe besitzen als aktive biologische Substanz grundsätzlich ein ökotoxikologisches Potenzial (LAWA-AO, 2016). Die Umweltauswirkungen der Pharmazeutika bezüglich der akuten Toxizität sind erst in den letzten 19 Jahren untersucht worden, wobei z.B. das Aussterben dreier Geierarten in Indien durch entzündungshemmende Schmerzmittel nachgewiesen werden konnte (Fent, 2013).

Genau an dieser Stelle greift das PharmCycle-Projekt ein und unterstützt unter anderem die Entwicklung neuer Testverfahren zur ökotoxikologischen Risikobewertung von Antibiotika. Ein weiterer Teil des PharmCycle-Projekts ist die verfahrenstechnische Optimierung von Kläranlagen, um eine Verringerung des Eintrags von Antibiotika in Vorfluter oder Gewässern zu erzielen. Die Herstellung von nachhaltigen Antibiotika ist ein weiteres wichtiges Teilprojekt des PharmCycle. Die Herstellung der nachhaltigen Antibiotika beruht auf der Basis antimikrobieller, in der Natur vorkommender Peptide. Der Vorteil der nachhaltigen Antibiotika liegt darin, dass sie nicht dauerhaft stabil, sondern leicht abbaubar sind (Heitmann, 2017).

³ Werden von Menschen oder Tieren bei Einnahme von Arzneimittelwirkstoffen ausgeschieden.

⁴ Bildung bei der Abwasserreinigung, in der Umwelt, oder durch Wasseraufbereitung.

1.1 Arzneimittel

1.1.1 Eintragungspfade in die Umwelt

Die Eintragungspfade von Arzneimitteln in die Umwelt sind vielfältig. Bei der Anwendung der Human- und Veterinärarzneimittel wird der Wirkstoff nur zum Teil durch den Stoffwechsel in Metaboliten umgewandelt. Die Metaboliten und ein größerer Anteil des Wirkstoffes werden von Mensch und Tier wieder ausgeschieden. Außerdem entsorgen rund 50 % der Bevölkerung in Deutschland alte Arzneimittel unsachgemäß über die Toilette oder den Abfluss, wodurch die Arzneimittel und deren Metaboliten größtenteils in Kläranlagen gelangen, ein geringer Teil jedoch durch Risse im Kanalsystem direkt im Boden. (DART2020, 2015). Der biologische Abbau in Kläranlagen variiert je nach Arzneiwirkstoff stark und ist meist nicht vollständig (LAWA-AO, 2016). Zusätzlich können auch Transformationsprodukte der Arzneimittel in der Umwelt, der Abwasseraufbereitung in der Abwasserreinigung entstehen. Es gelangen zum Großteil Antibiotika über Kläranlagen, Klärschlamme und auch durch Gülle (bei Düngung von Feldern) in Gewässer und Böden. Auch durch Oberflächengewässer und Böden kann es zur Eintragung in das Grundwasser kommen (DART2020, 2015). In Abbildung 1 ist die Verketzung der einzelnen Eintragungspfade von Arzneimitteln schematisch dargestellt.

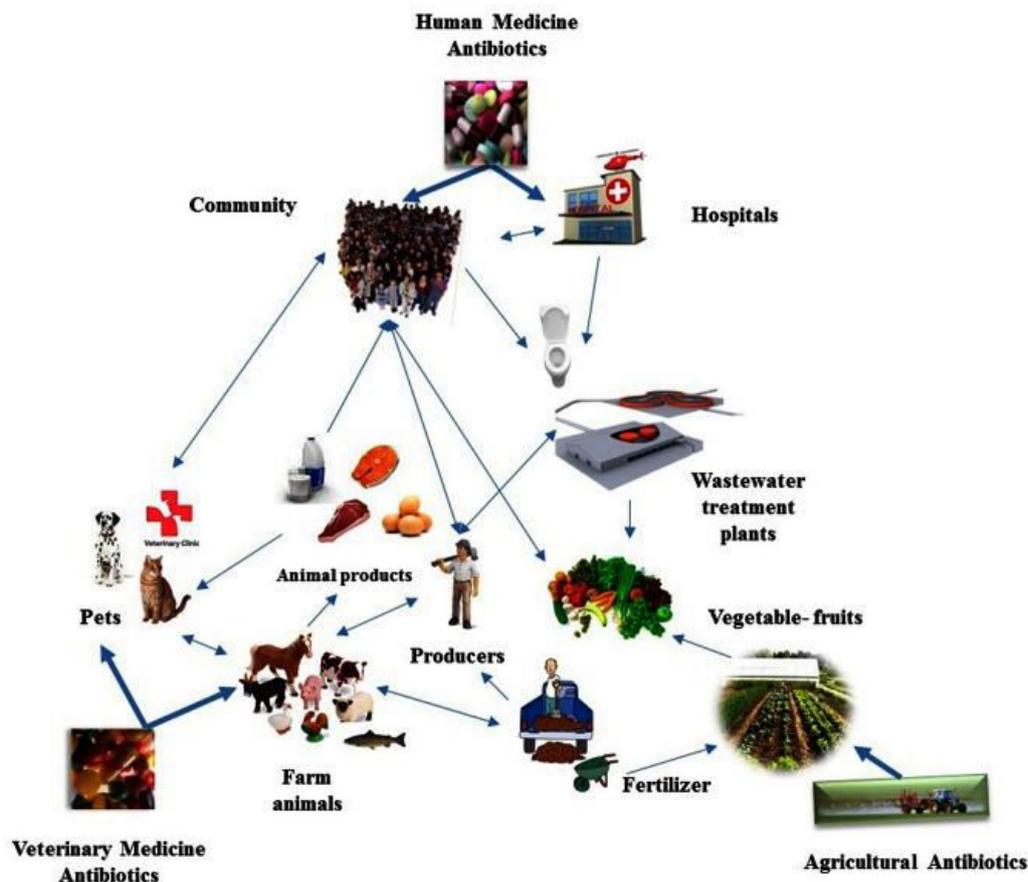


Abbildung 1: Schematische Arzneimitteleintragungspfade (Cantas, 2013)

1.1.2 Resistenzbildung

Die Resistenzbildung ist ein natürlicher Vorgang, der durch unsachgemäßen Gebrauch von Antibiotika beschleunigt wird. Bakterien, die eine natürliche oder eine erlangte Resistenz gegenüber bestimmten Antibiotika besitzen, werden durch diese nicht mehr gehemmt oder abgetötet. Somit können sich die Bakterien ungehindert vermehren und die Resistenz-Gene auch an andere weitergeben bzw. übertragen. Durch diese Ausbreitung kann es dazu kommen, dass Bakterien verschiedene Resistenz-Gene aufnehmen und somit gegenüber mehreren Antibiotika resistent werden. Diese Bakterien werden multiresistente Erreger genannt. Gegen diese Keime sind dann nur noch wenige oder keine Antibiotika wirksam, wodurch die Heilung von bakteriellen Infektionen bei Mensch und Tier sehr lange dauert oder auch tödlich verlaufen kann.

Das hat wiederum Auswirkungen auf die Kosten der Behandlung, sodass das Gesundheitswesen und die Volkswirtschaft mit steigenden Kosten bei bakteriellen Infektionen durch multi-resistente Erreger rechnen muss (DART2020, 2015). Dies ist der Grund weshalb Antibiotika so wenig und so zielgerichtet wie möglich eingesetzt werden sollte (Hübner, 2016).

1.1.3 Sulfamethoxazol

Sulfamethoxazol (Summenformel vgl. Abbildung 2) ist ein antibakterieller Wirkstoff, gehört zu der Gruppe der Sulfonamide und findet seine Anwendung in Kombination mit Trimethoprim als Cotrimoxazol. Die meisten Mikroorganismen müssen Folsäure synthetisieren. Sulfamethoxazol und Trimethoprim verhindern an dieser Stelle die mehrstufige bakterielle Folsäuresynthese auf zwei Wegen. Trimethoprim ist dabei ein konkurrierender Hemmstoff der FH_2 -Reduktase und Sulfamethoxazol ist ein konkurrierender Hemmstoff des Enzymes DHS-Synthetase. Durch das Chemotherapeutikum Cotrimoxazol wird das Wachstum von Mikroorganismen gehemmt, wobei menschliche Zellen üblicherweise nicht betroffen sind. Der Mensch nimmt Folsäure über die Nahrung auf, welches dadurch ins Blut gelangt und von den menschlichen Zellen aufgenommen werden kann. Es müsste eine 100.000-mal höhere Konzentration an Trimethoprim vorhanden sein, damit die humane FH_2 -Reduktase gehemmt werden würde. Cotrimoxazol findet seine Anwendung für die Infektionskrankheiten Harnwegsinfektion, Atemwegsinfektion, Brucellose, Nocardiosen (in Hochdosis) und Pneumocystis-jiroveci-Pneumonie (in Hochdosis) (Graefe, Lutz, & Bönisch, 2016). Sulfamethoxazol besitzt eine sehr gute Wasserlöslichkeit von 610 mg/l, einen geringen Octanol-Wasser-Verteilungskoeffizienten von $\log K_{ow} = 0,89$ (geringe Sorptionsneigung) und gilt als persistent (Türk et al., 2013). Daher besitzt Sulfamethoxazol ein hohes Verlagerungspotenzial und wird regelmäßig in Kläranlagenabläufen (siehe Kapitel 1.1.4) nachgewiesen (Türk et al., 2013). Deshalb wurde für das PharmCycle-Projekt SMX als eines der verwendeten Antibiotika gewählt.

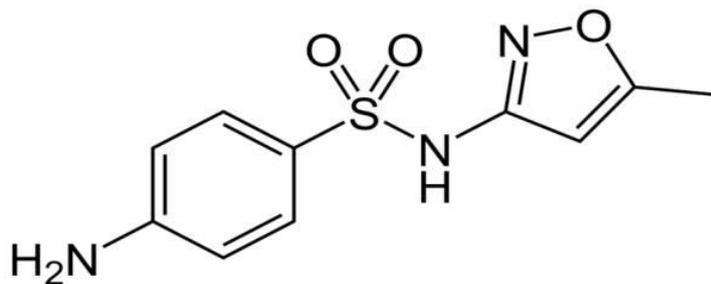


Abbildung 2: Summenformel von Sulfamethoxazol (Türk et al., 2013)

1.1.4 Zu- und Ablaufkonzentrationen kommunaler Kläranlagen

Bei den Zu- und Ablaufkonzentrationen kommunaler Kläranlagen sind oft große Schwankungen zu betrachten. Dies kann zum Teil über die Abbildung 1 aus Kapitel 1.1.1 hergeleitet werden. Dabei beeinflusst die Einwohnerzahl und die Anzahl der umliegenden Krankenhäuser oder Industrien die Eintragsmenge in kommunale Kläranlagen maßgeblich. Durch unterschiedliche Bauweisen (Misch- oder Trennsystem), Probennahmen (vers. Methoden) und saisonale Ereignisse (Starkregen) kann es zu höheren oder niedrigeren Zu- bzw. Ablaufkonzentrationen kommen. In Tabelle 1 wurden die Zu- und Ablaufkonzentrationen kommunaler Kläranlagen aus vier verschiedenen Quellen zusammengetragen. Aus den Mittelwerten des Zulaufes kann eine mittlere Zulaufkonzentration von ca. 1026 ng/l, eine mittlere Ablaufkonzentration von ca. 478 ng/l und eine Elimination zwischen 75 - 3% abgeschätzt werden.

Die Elimination wird über die Zulaufkonzentration (C_{ZB}) und die Ablaufkonzentration (C_{AN}) der KA durch nachfolgende Gleichung 1-1 bestimmt.

$$\text{Elimination} = \frac{C_{ZB} - C_{AN}}{C_{ZB}} \cdot 100\% \quad \text{in \%} \quad \text{Gl. 1-1}$$

Tabelle 1: Sulfamethoxazolkonzentrationen im Zu- und Ablauf kommunaler Kläranlagen

| | Max. in ng/l | Mittel. in ng/l | Min. in ng/l | Elimination in % | Quelle |
|---------------|-----------------|--------------------|-----------------|---------------------|---|
| Zulauf | 4400 | 510 | <100 | 75 – 25 * | (LUBW, 2014) |
| | 1020 | 670 | 320 | 49 – 3 ** | (Abegglen & Siegrist, 2012) |
| | 1700 | 1000 | 200 | ca. 75 *** | (Färber, Skutlarek, & Exner, 1999-2001) |
| | 2500 | 1925 | 1350 | 65 – 24 **** | (Miehle, 2010) |
| Ablauf | 1200 | 240 | <50 | | (LUBW, 2014) |
| | 600 | 420 | 240 | | (Abegglen & Siegrist, 2012) |
| | 400 | 240 | 100 | | (Färber, Skutlarek, & Exner, 1999-2001) |
| | 1410 | 1010 | 610 | | (Miehle, 2010) |

* Probennahme an vier KA in Berlin (Münchehofe, Ruheleben, Schönerlinde und Waßmannsdorf)

** Probennahme an sechs KA in Baden-Württemberg (Ditzingen, Heilbronn, Renningen, Pfullingen, Neckargerach und Aichwald-Aichelberg)

*** Probennahme an einer KA in Bonn mit Sammelabwasser des Universitätsklinikums Bonn

**** Probennahme an 14 KA in der Schweiz (Projekt „Strategie Micropoll“)

2 Zielsetzung

Diese Arbeit beschäftigt sich im Rahmen des PharmCycle-Projektes mit dem Ziel, einen dauerhaft stabilen Betrieb der zwei eingesetzten LKA zu erreichen, um zukünftig die Eliminationsraten der LKA während des Einsatzes verschiedener konventioneller Antibiotika reproduzierbar erfassen zu können.

In einer vorrangigen Bachelorarbeit wurde auf stark schwankende Zulaufkonzentrationen der LKA während der Inbetriebnahmezeit und auf eine erhebliche Blähschlamm-Bildung mit Beeinträchtigung der Schlammabtrennung in der Nachklärung (NK) hingewiesen (Scharff, 2017). Um einen stabilen Betrieb zu erreichen, gilt es, die Ursachen zu untersuchen und diese zwei grundlegenden Probleme der LKA zu beheben.

Deshalb wird in dieser Arbeit zunächst überprüft, inwieweit die Zulaufkonzentration mit der vorhandenen Technik auf einen stabilen Wert von 300 mgCSB/l eingestellt werden kann und welche zusätzlichen Maßnahmen ggf. hierfür notwendig sind. Bei der CSB-Fraktionierung des verwendeten synthetischen Abwassers wurde die Annahme getroffen, dass die partikulären Anteile vernachlässigbar klein sind (Scharff, 2017). Diese Annahme muss durch eine analytische Erfassung der tatsächlichen einzelnen CSB-Fractionen in Bezug auf den gelösten und partikulären Anteil, nach dem Arbeitsblatt DWA-A 131 „Bemessung von einstufigen Belebungsanlagen“ des Vereines „Deutsche Vereinigung der Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall e.V.“ (DWA, 2016), überprüft werden. Sollten bei der Analyse partikuläre Anteile im synthetischen Abwasser festgestellt werden, könnten das Auswirkungen auf die tägliche Schlammproduktion und den Schlammüberschuss haben (DWA, 2016). Nachfolgend ist zu überprüfen, ob eine Anpassung der Zulaufkonzentration vorgenommen werden muss.

Eine Blähschlamm-Bildung soll durch Umsetzung verschiedener Maßnahmen nach DIN EN ISO 11733:2004 (D) verhindert werden.

Im Rahmen des PharmCycle-Projektes soll unter anderem die Elimination verschiedener Antibiotika bei der Abwasserbehandlung mittels einer vierten Reinigungsstufe (Membranfiltrationsanlage und Aktivkohleadsorptionsanlage) erforscht werden. Die vierte Reinigungsstufe in kommunalen Kläranlagen üblicherweise als zusätzliche Stufe nach einer biologischen Reinigungsstufe eingesetzt. Daher sollen die LKA das gereinigte Abwasser für diese Forschungsprojekte bereitstellen. Jedoch werden größere Abwassermengen als die LKA täglich produzieren kann benötigt, sodass diese über eine bestimmte Zeit gesammelt werden müssen. Weshalb im Vorfeld Versuche zu Abbauvorgängen des gereinigten Abwassers in bereitgestellten Sammelproben unter verschiedenen Randbedingungen durchgeführt werden müssen.

Abschließend soll eine tägliche Dosierung des Antibiotikums SMX in eine der beiden LKA erfolgen. Im Vorfeld müssen übliche Zulauf- und Ablaufkonzentrationen für das Antibiotikum SMX für kommunale Kläranlagen recherchiert werden. Mittels fortlaufender Messungen der LKA-Abläufe soll die Reinigungsleistung charakterisiert und mit bekannten Ablaufwerten bei kommunalen Kläranlagen verglichen werden. Zeitgleich gilt es in Erfahrung zu bringen, ob sich eine Änderung der Abwasserwerte bei der LKA während der Dosierung von SMX gegenüber der Kontroll-LKA einstellt. Die Zusammenfassung der Forschungsinhalte ist der Tabelle 2 zu entnehmen.

Tabelle 2: Zu bearbeitende Fragestellung der Bachelorarbeit

1. Stabiler Betrieb der Laborkläranlagen

- 1.1 Welche technischen Umbauten an den vorhandenen LKA müssen umgesetzt werden, um eine konstante Zulauf-Konzentration von 300 mg/l einstellen zu können?
- 1.2 Wie groß ist der partikuläre Anteil des verwendeten synthetischen Abwassers (sog. OECD Medium (DIN EN ISO 11733, 2004 (D))) gemäß CSB-Fraktionierung nach DWA-A 131 im Zu- und Ablauf der LKA (DWA, 2016)?
- 1.3 Wie wirkt sich der eventuell vorhandene partikuläre Anteil auf die Schlammproduktion und die Zulaufkonzentration aus und welche Anpassungen am LKA-Betrieb müssen eventuell vorgenommen werden?
- 1.4 Welchen Einfluss haben die umgesetzten Maßnahmen zur Blähschlammvermeidung nach DIN EN ISO 11733:2004 (D)?

2. Vorversuche zum Umfang von Abbauvorgängen in bereitgestellten Sammelproben unter verschiedenen Randbedingungen

- 2.1 Welche Änderungen, über 96 Stunden, des gereinigten Abwassers mit SMX bei 4°C und 25°C können beobachtet werden? (positiv Kontrolle)
- 2.2 Welche Änderungen, über 96 Stunden, des gereinigten Abwassers ohne SMX bei 4°C und 25°C können beobachtet werden? (negativ Kontrolle)

3. Dosierung des Antibiotikums Sulfamethoxazol

- 3.1 Welche Zu- und Ablaufkonzentrationen sind für das Antibiotikum SMX bei kommunalen Kläranlagen üblich und welche Eliminationsraten werden erzielt?
- 3.2 Wirkt sich die SMX Dosierung auf die Reinigungsleistung der LKA, im Vergleich zur Kontroll-LKA, aus?

3 Theoretische Grundlagen

Im folgenden Abschnitt sollen die wichtigsten Zusammenhänge und Parameter der Abwasserreinigung erläutert werden. Die Abwasserparameter beeinflussen sich zum Teil untereinander und können einen störungsfreien Betrieb gefährden, weshalb die Überwachung dieser Parameter eine wichtige Voraussetzung für die Eigen- und Prozesskontrolle der Laborkläranlage ist.

3.1 Erläuterung der Laborkläranlagen

3.1.1 Anlagen Ausgangszustand

Bei dem PharmCycle-Projekt werden zwei baugleiche Laborkläranlagen von der Firma Behr Labor-Technik verwendet (LKA-KLD4NSR). Es wird die verfahrenstechnisch zweite Reinigungsstufe kommunaler Kläranlagen (biologische Stufe) mit vorgeschalteter Denitrifikation realisiert. Eine Abscheidung von groben Partikeln mittels Rechen oder Sandfang als erste Reinigungsstufe wird nicht benötigt, weil beim verwendeten synthetischen Abwasser keine problematischen Feststoffanteile vorhanden sind.

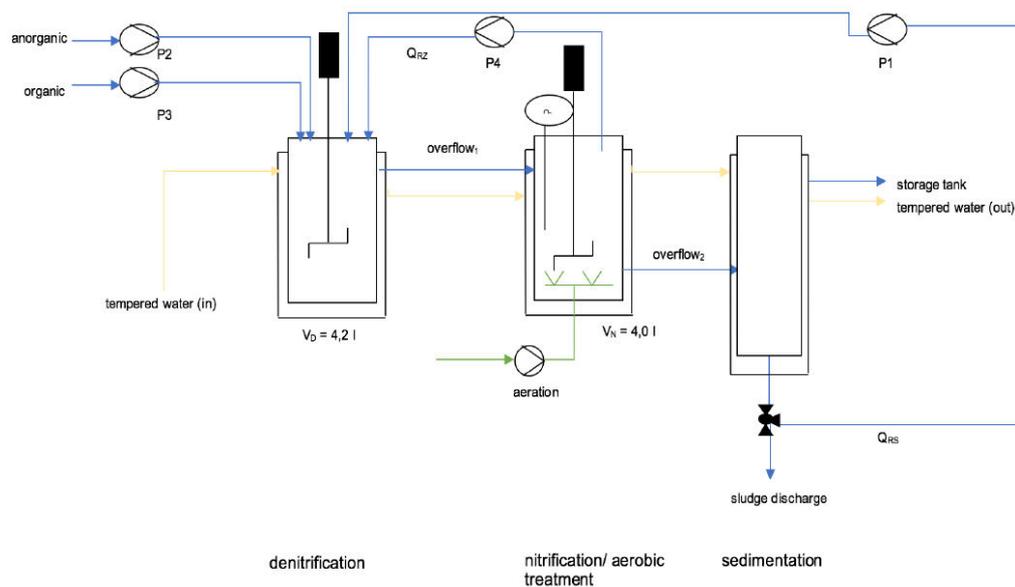


Abbildung 3: Fließschema der Laborkläranlage (Scharff, 2017)

Die Nährstoffzufuhr erfolgt mittels eines synthetischen Abwassers. Dabei wird der organische Anteil getrennt vom anorganischen Anteil im Vorlagebehältern angesetzt und über die Pumpen P_2 (*anorganic*) und P_3 (*organic*) dem Denitrifikationsbecken zugeführt (siehe Abbildung 3 und Abbildung 4). Der organische und anorganische Massenanteil wird über eine Waage gewogen und dann entsprechend mit Leitungswasser soweit verdünnt, dass die gewünschte CSB-Zulaufkonzentration eingestellt ist.

Die Vorlagebehälter sind nicht verschlossen und temperiert, daher nimmt das synthetische Abwasser die Raumtemperatur an. Die Becken der Laborkläranlage sind aus Glas und zur Temperierung doppelwandig ausgeführt, so dass über ein Thermostat die Temperatur der biologischen Stufe reguliert werden kann. Eine Durchmischung der Belebungsbecken (Nitrifikation und Denitrifikation siehe Kapitel 3.2) wird durch Rührer realisiert. Das Nitrifikationsbecken wird zusätzlich durch die Eintragung von feinen Luftblasen am Beckenboden durchmischt. Der Sauerstoffeintrag wird über eine Sauerstoffsonde und eine Regeleinheit automatisch gesteuert.

Da im Belebungsbecken der Denitrifikation Nitrat für die Denitrifikation (siehe Kapitel 3.2.5) benötigt wird und dieses im Belebungsbecken der Nitrifikation (vgl. Abb. 3 „nitrification/aerobic treatment“) von Ammonium über Nitrit zu Nitrat umgewandelt wird (siehe Kapitel 3.2.4), wird eine interne Rezirkulation über die Pumpe P4 realisiert. Die Nachklärung ist für die Abtrennung der Feststoffe vom gereinigten Klärwasser durch Sedimentation zuständig und ist im unteren Bereich trichterförmig ausgelegt. Der sedimentierte Schlamm wird über die Pumpe P1 wieder zurück zum Denitrifikationsbecken geleitet, das Drei-Wege-Ventil unterhalb der Nachklärung kann zur Probennahme (für die Schlammphase) genutzt werden. Das gereinigte Abwasser kann durch den Überlauf der Nachklärung in einen Auffangkanister gelangen (siehe Abb. 4).



Abbildung 4: Verwendete Laborkläranlage (Scharff, 2017)

3.1.2 Ausgangsparametrierung der Anlage zu Beginn der Bachelorarbeit

Die Parameter der Laborkläranlage können aus Tabelle 3 entnommen werden. Einige der Parameter ergeben sich aus der Bauweise der Laborkläranlage und können nicht variiert werden, andere können je nach Betriebspunkt gewählt werden. Die Parameter wurden so gewählt, dass praktisch erreichbare Randbedingungen geschaffen wurden.

Tabelle 3: Auslegungsparameter der Laborkläranlage aus (Scharff, 2017)

| Parameter | Werte | Beschreibung |
|--------------------|----------|--|
| Bauweise | | |
| V_D | 4,2 l | Füllvolumen der Denitrifikation |
| V_N | 4,0 l | Füllvolumen der Nitrifikation |
| $V_{BB}=(V_D+V_N)$ | 8,2 l | Gesamtfüllvolumen des Belebungsbeckens (BB) |
| V_{NK} | 2,3 l | Füllvolumen der Nachklärung |
| gewählte | | |
| T_P | 20°C | Betriebstemperatur der Laborkläranlage |
| Q_{d,ZB^*} | 18 l/d | Gesamtzulaufstrom des Abwassers |
| t_{TS} | 17 d | Aerobes Schlammalter für gewählten Betriebspunkt |
| $C_{CSB,ZB}$ | 300 mg/l | CSB-Zulaufkonzentration |
| TS_{BB} | 3,0 g/l | TS-Gehalt der im Durchschnitt erreicht werden soll |
| gemessene | | |
| $TS_{BB,A1}$ | 2,42 g/l | Durchschnittlicher TS-Gehalt im BB der LKA 1 |
| $TS_{BB,A2}$ | 2,15 g/l | Durchschnittlicher TS-Gehalt im BB der LKA 2 |
| $\ddot{U}_{d,A1}$ | 1,14 g/d | Durchschnittlicher Überschussschlamm der LKA 1 |
| $\ddot{U}_{d,A2}$ | 1,06 g/d | Durchschnittlicher Überschussschlamm der LKA 2 |
| $t_{TS,A1}$ | 17,41 d | Durchschnittlicher Schlammalter der LKA 1 |
| $t_{TS,A2}$ | 16,63 d | Durchschnittlicher Schlammalter der LKA 2 |

Fortführung von Tabelle 3: Auslegungsparameter der Laborkläranlage aus (Scharff, 2017)

berechnet nach DWA-A 131

| | | |
|--------------------------|-----------|---|
| $F_{\text{FeCl}_3,40\%}$ | 1230 µl/d | Dosiermenge an Fällmittel (von 40% FeCl ₃ -Lösung) |
| $\text{ÜS}_{d,C}$ | 0,99 g/d | Überschussschlamm aus der Kohlenstoffelimination |
| $\text{ÜS}_{d,P}$ | 0,61 g/d | Überschussschlamm aus der Phosphatelimination |
| ÜS_d | 1,60 g/d | Gesamter Überschussschlamm |

* $Q_{d,ZB}$ wurde aus der vorgegebenen ca. Verweilzeit berechnet.

3.1.3 Optimierungsbedürftige Probleme während der Betriebsführung

Die Probleme der Betriebsführung sind in Tabelle 4 aufgelistet und stichpunktartig beschrieben.

Tabelle 4: Optimierungsbedürftige Probleme während der bisherigen Betriebsführung

| Probleme | Beschreibung | Quelle |
|---|--|---|
| Signifikanter Kohlenstoffabbau im Vorlagebehälter | Ansatz nur einmal wöchentlich, offener Behälter, Raumtemperatur (ca. 20°C) und Sauerstoffeintragung durch Rührer begünstigen Abbau. | (Scharff, 2017) |
| Ablagerungen in den Zulaufschläuchen | Abbauprozesse in den Zulaufschläuchen, laut DIN EN ISO 11733:2004 sollten die Nährstoffschläuche täglich mit Ethanol gespült werden. | siehe Abb. 5, und eigene Beobachtung |
| Förderstabilität | Kalibrierung wurde alle 2 Wochen durchgeführt. Stabile Einstellung der Fördermenge ist über das Potentiometer schwierig. | (Scharff, 2017) Eigene Beobachtung |
| Blähschlamm in der Nachklärung | Unkontrollierter Schlammaustrag, durch teilweise massive Blähschlamm Bildung in der Nachklärung und schlechtes Absetzverhalten durch Gasblasenbildung. | (Scharff, 2017) und eigene Beobachtung (siehe Abb. 6) |
| Algen- und Biofilmbildung | Bildung an den Innenwänden der Becken und in den Zulaufschläuchen. Könnten Gas erzeugen und zu Blähschlamm führen | Eigene Beobachtung |



Abbildung 5: Blähschlamm in der Nachklärung (eigene Darstellung)



Abbildung 6: Ablagerungen der Nährstoff-Zulaufschläuche nach Spülung der Schläuche (eigene Darstellung)

Um diese Probleme der Betriebsführung zu lösen, wurden die technischen Umbauten aus Kapitel 5.3 an den Laborkläranlagen vorgenommen und auf Wirksamkeit geprüft. Maßnahmen gegen die Blähschlammbildung sind zum Teil bekannt und veröffentlicht, vgl. beispielsweise (DIN EN ISO, 2004) und in Tabelle 5 aufgelistet, die Ergebnisse der Umsetzung und Überprüfung können dem Kapitel 6.4 entnommen werden.

Tabelle 5: Maßnahmen zur Blähschlammvermeidung aus (DIN EN ISO, 2004)

| Maßnahmen | Beschreibung |
|----------------------------------|---|
| 1. OECD-Medium kühlen | Um Abbauprozesse außerhalb der KA zu vermeiden/verringern. |
| 2. Konstante Zulaufkonzentration | Schwankungen des CSBs können Blähschlamm bewirken. |
| 3. Diskontinuierliche Rührung | Im Nitrifikationsbecken, zur besseren Flockenbildung. |
| 4. Flockungshilfsmittel | Z.B. Eisen-III-Chlorid Dosierung, Phosphatelimination. |
| 5. Spurenelemente dosieren | Vermeidung von faserförmigen Schlammflocken. |
| 6. UV-Einstrahlung verringern | Abdeckung der BB gegen Algen- und Biofilmbildung. |
| 7. Tägliche Reinigung | Ablagerungen in den Becken lösen und Zulaufschläuche spülen |
| 8. Lufteintragung / Rührung NK | Besseres Absetzverhalten in der Nachklärung |
| 9. Täglicher Schlammabzug | Einstellung des Trockensubstanzgehaltes im Belebungsbecken |

3.2 Relevante Parameter der Abwasserreinigung

3.2.1 Biochemischer Sauerstoffbedarf

Der biochemische Sauerstoffbedarf (BSB) beschreibt die Menge an Sauerstoff, die im aeroben Milieu durch mikrobielle Stoffwechselprozesse unter festgelegten Bedingungen für den Schmutzstoffabbau benötigt wird. Deshalb wird der BSB in mg/l O₂ angegeben (Mudrack und Kunst, 2010). Üblicherweise wird in Mitteleuropa der biochemische Sauerstoffbedarf für fünf Tage (BSB₅) bei 20°C bestimmt und kann als ein Maß für die Verschmutzung von Gewässern oder Abwasser genutzt werden. Jedoch ist bei der BSB₅ Bestimmung zu beachten, dass nur die biologischen abbaubaren Stoffe erfasst werden. Aus diesem Grund sind die Ergebnisse schwer reproduzierbar und nicht immer vergleichbar (Weiterbildendes Studium Wasser und Umwelt, 2009). Auch der Zeitaufwand für die Bestimmung des BSB₅ ist mit fünf Tagen nicht ganz unerheblich. Daher wurden chemische Methoden entwickelt, die auch die organischen nicht abbaubaren (inerten) Stoffe mittels chemischen Oxidationsmitteln mit erfassen (Mudrack und Kunst, 2010).

3.2.2 Chemischer Sauerstoffbedarf

Der chemische Sauerstoffbedarf (CSB) beschreibt die Oxidierbarkeit aller im Schmutzwasser enthaltenen Stoffe, mit Ausnahme der Stickstoffverbindungen. Der CSB wird in mg/l O₂ angegeben und ist daher mit dem BSB₅ vergleichbar (Weiterbildendes Studium Wasser und Umwelt, 2009). Da der CSB im Vergleich zum BSB₅ nicht nur die organisch abbaubaren Stoffe und die organische nicht abbaubaren Stoffe sondern auch die anorganischen Stoffe oxidiert, ist der CSB größer oder gleich des gemessene BSB₅ (Mudrack und Kunst, 2010). Der Vorteil der CSB Bestimmung liegt bei der Schnelligkeit (0,5 bzw. 2 Std.), der Reproduzierbarkeit und der Bilanzierbarkeit der Messergebnisse. Nur durch eine Bestimmung der CSB-Fractionen kann eine umfassende Untersuchung oder Modellierung des biologischen Prozesses der Abwasserreinigung erfolgen (siehe Kapitel 3.3.1) (Weiterbildendes Studium Wasser und Umwelt, 2009).

3.2.3 Nährstoffbedarf

Der biologische Reinigungsprozess in Kläranlagen kann nur gewährleistet werden, wenn ein ausgewogenes Nährstoffverhältnis im Abwasser vorliegt. Dieses Verhältnis wird auch als CSB:N:P-Verhältnis beschrieben und liegt für kohlenhydrathaltige Abwässer bei etwa 300:5:1, für fettsäure- und proteinhaltige Abwässer bei etwa 800:5:1. Für die Bildung von neuen Organismen sind Stickstoff (N) und Phosphor (P) erforderlich. Der Bedarf an Stickstoff und Phosphor wird durch das Schlammalter und den Ertragskoeffizienten der verschiedenen Bakterien vorgegeben (Mudrack und Kunst, 2010).

Zur Beurteilung eines Gewässerzustandes (Gewässergüte) werden unter anderem die sauerstoffzehrenden Stoffe erfasst. Den Hauptanteil der Sauerstoffzehrung in Gewässern sowie bei der Abwasserreinigung wird durch die organischen Kohlenstoffverbindungen verursacht. Neben diesen Kohlenstoffverbindungen sind die Nährstoffe Stickstoff und Phosphor wichtige Parameter zur Beurteilung der Gewässergüte bzw. Abwasserreinigung. Stickstoff kommt in organischen und anorganischen Verbindungen, sowie in elementarer Form vor. Phosphor kommt hingegen als anorganisch gelöstes ortho-Phosphat ($\text{PO}_4\text{-P}$), als anorganisch kondensiertes Phosphat (poly-PO_4) und als organisch gebundenes Phosphat vor. Beide gehören zu den zehn lebenswichtigen Makroelementen⁵ die für den Zellaufbau benötigt werden (Weiterbildendes Studium Wasser und Umwelt, 2009).

3.2.4 Nitrifikation

Bei der Nitrifikation wird Kohlenstoffdioxid (CO_2) durch autotrophe Mikroorganismen als Kohlenstoffquelle für den Aufbau von Zellsubstanzen genutzt. Bei der Oxidation von Ammonium (NH_4^+) wird CO_2 reduziert und zum geringen Teil in die Zellmasse eingebunden. Im ersten Schritt der Nitrifikation wird NH_4^+ , durch autotrophe Mikroorganismen (Nitrosomonas), zu Nitrit (NO_2^-) umgewandelt. Diese Umwandlung wird als Nitritation bezeichnet und durch folgende Gleichung 3-1 vereinfacht dargestellt.



Als Folge der Reaktion werden Energie und Wasserstoffionen freigesetzt und Sauerstoff (O_2) verbraucht. Der zweite Schritt der Nitrifikation beinhaltet die Oxidation durch weitere autotrophe Mikroorganismen (Nitrobacter) von Nitrit (NO_2^-) zu Nitrat (NO_3^-). Diese Reaktion wird als Nitratation bezeichnet und durch folgende Gleichung 3-2 vereinfacht dargestellt.

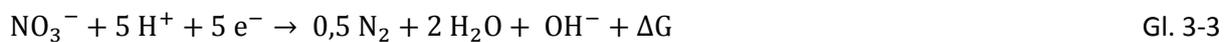


Bei dieser Reaktion wird nur eine geringe Energiemenge für die Mikroorganismen freigesetzt und die Wachstumsrate ist bei dieser Umwandlung sehr gering (Mudrack und Kunst, 2010). Das langsame Wachstum ist eines der Hauptprobleme bei nitrifizierenden Kläranlagen und ist daher ein bedeutsamer Parameter bei der Bemessung von Kläranlagen (Weiterbildendes Studium Wasser und Umwelt, 2009).

⁵ Lebensnotwendige Nährstoffe, die den größten Massenanteil für den Aufbau der Körpersubstanz von Lebewesen ausmachen (Fent, 2013).

3.2.5 Denitrifikation

Die Reduktion von Nitrat (NO_3^-) zu Stickstoffgas (N_2) wird als Denitrifikation bezeichnet und findet nur unter anoxischen Bedingungen statt. Die meisten Mikroorganismen sind fakultativ anaerobe Organismen und können sowohl ohne, als auch mit Sauerstoff leben. Das bedeutet, sie können auch gelösten Sauerstoff anstelle des Nitrats (NO_3^-) für den Abbau organischer Substanzen nutzen. Die Denitrifikation baut die organischen Kohlenstoffquellen, wie bei der Sauerstoffatmung, bis zu Kohlenstoffdioxid (CO_2) und Wasser (H_2O) ab. Bei der Sauerstoffatmung wird mehr Energie gewonnen als bei der Nitratatmung, daher würden die Organismen unter aeroben Bedingungen die Sauerstoffatmung bevorzugen. Das Nitrat (NO_3^-) wird bei der Denitrifikation über die Zwischenprodukte Nitrit (NO_2^-) zu Stickstoffoxid (NO) und Distickstoffoxid (N_2O) abschließend zu Stickstoffgas (N_2) reduziert. Diese Reaktion ist in folgender Gleichung 3-3 vereinfacht dargestellt (Mudrack und Kunst, 2010).



Die Zwischenprodukte sind zum Teil giftig (NO), wirken hemmend auf Mikroorganismen (NO_2^-) oder verstärken durch Entweichen aus der Wasserphase in die Umgebungsluft den Treibhauseffekt (N_2O) (Weiterbildendes Studium Wasser und Umwelt, 2009).

3.2.6 Sauerstoffkonzentration

Für die aeroben Stoffwechselprozesse bei der biologischen Abwasserreinigung ist eine ausreichende Sauerstoffzufuhr elementar. Durch zu geringe Sauerstoffkonzentrationen kann die Nitrifikation verringert werden, daher ist es notwendig, den erforderlichen Sauerstoffbedarf zu ermitteln. Der Sauerstoffbedarf wird über den Verbrauch für die Kohlenstoffelimination, der eventuell benötigten Sauerstoffmenge für die Nitrifikation und die Rückgewinnung an Sauerstoff durch die Denitrifikation ermittelt (Weiterbildendes Studium Wasser und Umwelt, 2009).

3.2.7 pH-Wert

„Der pH-Wert ist definitionsgemäß, der negative dekadische Logarithmus des Zahlenwertes der in mol/l angegebenen Wasserstoffionen-Aktivität“ (Weiterbildendes Studium Wasser und Umwelt, 2009). Der pH-Wert ist ein wichtiger Parameter, da alle Stoffwechselprozesse der Lebewesen durch Enzyme gesteuert werden und diese enzymatischen katalytischen Reaktionen pH-Wert abhängig sind. Der pH-Bereich, in dem sich die Organismen ungestört entwickeln können, variiert je nach Organismus. Für die meisten Arten liegt der optimale pH-Wert im neutralen Bereich ($\text{pH} = 7$).

Beim Belebtschlamm handelt es sich um ein Artenspektrum vieler verschiedener Mikroorganismen, wodurch leichte Schwankungen des pH-Wertes kompensiert werden können. Aus Erfahrungen kann gesagt werden, dass ein pH-Wert im Bereich von 6,0 - 8,5 für eine stabile Betriebsführung unproblematisch ist (Mudrack und Kunst, 2010).

3.2.8 Alkalinität

Die Alkalinität wird in mmol HCO_3^- ausgedrückt und ist ein Maß für die Pufferkapazität des Wassers hinsichtlich Säuren. Daher wird diese auch als Säurekapazität bezeichnet und dient direkt der pH-Wertstabilität (Weiterbildendes Studium Wasser und Umwelt, 2009). Bei der Nitrifikation, wie in Kapitel 3.2.4 beschrieben, werden unter anderem freie H^+ -Ionen gebildet, diese verbrauchen die HCO_3^- Verbindungen, wodurch der pH-Wert bei hohen NH_4^+ -Konzentrationen im Zulauf bei der Nitrifikation absinken kann. Um eine pH-Wert Verringerung zu vermeiden, sollte die Säurekapazität im Ablauf nicht kleiner 2 sein (Mudrack und Kunst, 2010).

3.2.9 Charakterisierung der Klärschlämme

3.2.9.1 Schlammarten

Beim Reinigungsprozess des Abwassers in Kläranlagen fällt ein Großteil der Feststoffe als Klärschlamm an. Die Klärschlämme werden in Primärschlamm, Vorklärschlamm, Sekundärschlamm und Tertiärschlamm unterschieden. Der Primärschlamm ist der Schlammanteil der bei der mechanischen Reinigung anfällt. Die mechanisch physikalische Reinigungsstufe trennt überwiegend die groben Feststoffe wie Essensreste, Papier usw. ab. Der Vorklärschlamm beinhaltet unter anderem auch Primärschlamm oder Überschussschlamm (ÜS_d) und ist der Schlammanteil der Vorklärung (VK). Der Zuwachs an belebtem Schlamm in der biologischen Reinigungsstufe wird als Sekundärschlamm bezeichnet. Dieser wird durch die Mikroorganismen bei der Umsetzung organischer Stoffe in eigene Zellsubstanz erzeugt. Der Sekundärschlamm muss regelmäßig dem System entnommen werden und wird daher auch als Überschussschlamm bezeichnet.

Der Tertiärschlamm ist vor allem der Schlammanteil, der durch die chemische Phosphatelimination erzeugt wird. Dieser wird z.B. bei der Simultanfällung zusammen mit dem Sekundärschlamm als Überschussschlamm entnommen (Weiterbildendes Studium Wasser und Umwelt, 2009).

3.2.9.2 Schlammindex

Der Schlammindex (ISV) beschreibt die Absetzeigenschaften des Belebtschlammes, wobei das Volumen bestimmt wird, das ein Gramm Schlamm Trockensubstanz im Wasser nach 30 Minuten Absetzzeit einnimmt. Der Schlammindex wird in ml/g oder l/kg angegeben. Das bedeutet, je schlechter die Absetz- und Eindickeigenschaften des Belebtschlammes sind, desto mehr Volumen nimmt der Schlamm ein. Für Kläranlagen mit Nitrifikation und Denitrifikation liegen die typischen Zahlenwerte für den Schlammindex zwischen 100 - 150 l/kg (Mudrack und Kunst, 2010).

3.2.9.3 Trockenrückstand

Der Trockenrückstand (TR) ist ein Maß für den Feststoffgehalt einer Probe. Er wird durch mehrstündiges Trocknen bei 105°C bis zum Erreichen der Gewichtskonstanz bestimmt und als Gewichtsprozent bezogen auf die Schlammmasse angegeben (Weiterbildendes Studium Wasser und Umwelt, 2009).

3.2.9.4 Trockensubstanz

Die Trockensubstanz (TS) beschreibt die Massenkonzentration an abfiltrierbaren Stoffen einer Probe und wird in g/l angegeben. Zur Bestimmung der TS wird die Probe zunächst filtriert und der Filterrückstand bis zur Gewichtskonstanz getrocknet. Bei der Bestimmung der TS werden dadurch die gelösten Stoffe, die bei Trocknung in Feststoffe übergehen könnten, nicht erfasst (z.B. Salze). Deshalb erfasst der TS den Feststoffgehalt einer Probe genauer als der TR (Weiterbildendes Studium Wasser und Umwelt, 2009).

3.3 Berechnungsgrundlagen

Nachfolgend sollen die wichtigsten Grundlagen für die Betriebsführung von Laborkläranlagen aus der bestehenden Norm DIN EN ISO 11733:2004 (D) erfasst werden. Weiter werden die relevanten Gleichungen der verfahrenstechnischen Parameter und die verschiedenen Summenparameter zur Beurteilung der Betriebsführung und zur Auslegung der verwendeten Laborkläranlagen (vgl. Kapitel 3.1) aus dem DWA-A 131 zusammengestellt.

3.3.1 Zusammensetzung des verwendeten Abwassers

Für die Versorgung der Laborkläranlage mit Nährstoffen wird das „Synthetische Abwasser 1“, auch OECD-Medium genannt, nach DIN EN ISO 11733:2004 (D) verwendet. Dabei hat das OECD-Medium eine CSB-Konzentration von rund 300 mg/l. Die Konzentration wird nach Tabelle 6 in einem Liter Leitungswasser angesetzt und kann variabel an die gewünschte Betriebsführung angepasst werden.

Tabelle 6: Zusammensetzung des OECD-Mediums für eine CSB-Konzentration von 300 mg/l

| Substanz | mg/l |
|---|------|
| Organische Bestandteile | |
| Pepton | 160 |
| Fleischextrakt | 110 |
| Harnstoff | 30 |
| Anorganische Bestandteile | |
| Wasserfreies Dikaliumhydrogenphosphat (K_2HPO_4) | 28 |
| Natriumchlorid (NaCl) | 7 |
| Calciumchlorid-Dihydrat ($CaCl_2 \cdot 2 H_2O$) | 4 |
| Magnesiumsulfat-Heptahydrat ($MgSO_4 \cdot 7 H_2O$) | 2 |

Mithilfe der Massenanteile (vgl. Anhang A) der einzelnen Substanzen kann der Gesamt-Stickstoff (N_{ges}) und der Gesamt-Phosphor (P_{ges}) des OECD-Mediums je nach CSB-Zulaufkonzentration ($C_{CSB,ZB}$) berechnet werden (vgl. Tabelle 7). Diese können für die nachfolgende Berechnung und Eigenkontrolle der Betriebsführung genutzt werden.

Tabelle 7: Gesamt-Stickstoff und -Phosphor Konzentration in Abhängigkeit der CSB-Zulaufkonzentration

| $C_{CSB,ZB}$ in mg/l | N_{ges} in mg/l | P_{ges} in mg/l |
|-------------------------|----------------------|----------------------|
| 300 | 45 | 5,0 |
| 375 | 56 | 6,2 |
| 480 | 72 | 8,0 |
| 600 | 90 | 10 |

Zusätzlich zum verwendeten OECD-Medium kann nach DIN EN ISO 11733:2004 (D) eine Zugabe von Spurenelementen erfolgen. Die Konzentration wird nach Tabelle 8 in einem Liter Leitungswasser angesetzt (vgl. Kapitel 6.4).

Tabelle 8: Zusammensetzung der Spurenelemente für eine CSB-Konzentration von 300 mg/l

| Salz | Massenkonzentration in mg/l |
|---|-----------------------------|
| Natriumhydrogencarbonat (NaHCO ₃) | 25,00 |
| Eisen(II)-sulfat-Heptahydrat (FeSO ₄ · 7 H ₂ O) | 10,00 |
| Calciumchlorid (CaCl ₂) | 5,00 |
| Chrom(III)-nitrat-Nonahydrat (Cr(NO ₃) ₃ · 9 H ₂ O) | 0,68 |
| Kupfer(II)-chlorid-Dihydrat (CuCl ₂ · 2 H ₂ O) | 0,48 |
| Nickel(II) Sulfate Hexahydrate (NiSO ₄ ·6H ₂ O) | 0,30 |
| Zinkchlorid (ZnCl ₂) | 0,18 |
| Natriummolybdat (Na ₂ MoO ₄) | 0,17 |
| Mangan(II) Sulfat Monohydrate (MnSO ₄ · H ₂ O) | 0,10 |
| Cobalt(II) Chloride Hexahydrate (CoCl ₂ · 6 H ₂ O) | 0,05 |

3.3.2 Bestimmung der hydraulischen Verweilzeit in Abhängigkeit des Abwasserzulaufstromes

Die hydraulische Verweilzeit (HRT) ergibt sich aus dem Verhältnis vom Gesamtvolumen des Belebungsbeckens (V_{BB}) zum Zulaufstrom (Q_{ZB}) pro Stunde aus Gleichung 3-4 (Weiterbildendes Studium Wasser und Umwelt, 2009).

$$HRT = \frac{V_{BB}}{Q_{ZB}} \quad \text{in h} \quad \text{Gl. 3-4}$$

3.3.3 Bestimmung der CSB-Wochezulaufkraft

Die CSB-Wochezulaufkraft ($B_{W,CSB,ZB}$) ergibt sich aus der täglichen CSB-Zulaufkraft ($B_{d,CSB,ZB}$). Diese wird aus der CSB-Zulaufkonzentration ($C_{CSB,ZB}$) und dem täglichen Zufluss bzw. Abfluss $Q_{d,Konz}$ nach folgender Gleichung 3-5 bestimmt.

$$B_{W,CSB,ZB} = B_{d,CSB,ZB} \cdot Q_{d,Konz} \cdot 7 \text{ d} \quad \text{in g/Woche} \quad \text{Gl. 3-5}$$

Dabei ist

- $Q_{d,Konz}$ der tägliche Abfluss zur Berechnung von Frachten in l/d,
- $B_{d,CSB,ZB}$ die tägliche CSB-Zulaufkraft in g/l und
- $B_{W,CSB,ZB}$ die CSB-Wochenkraft in g/Woche.

3.3.4 Bemessungsgrundlagen nach DWA-A 131

In den Bemessungsgrundlagen nach DWA-A 131 wurden die Gleichungen für die Bemessung von Kläranlagen mit vorgeschalteter Denitrifikation zusammen getragen (DWA, 2016). Die Gleichungen werden später für die Ermittlung von Zulauffrachten für die Laborkläranlagen benötigt, um gezielt bestimmte Schlammalter in den Anlagen einstellen zu können. Die Bemessung einer kommunalen Kläranlage wird üblicherweise über das Bemessungsschema aus Anhang B durchgeführt. Grundsätzlich für den Bemessungsablauf ist der Ansatz, dass im Denitrifikationsbecken der Sauerstoffverbrauch im Verhältnis zum Sauerstoffangebot einen Wert von eins annehmen muss (vgl. Kapitel 3.3.4.9). Zu Beginn des Bemessungsschemas wird das aerobe Schlammalter aus Prozessfaktoren in Abhängigkeit der Temperatur berechnet. Anschließend wird das Bemessungsschlammalter aus dem aeroben Schlammalter und dem Verhältnis des Denitrifikationsvolumens zum Volumen des Belebungsbeckens berechnet. Dieses Verhältnis muss vorab geschätzt werden (0,2 bis 0,6). Nachfolgend muss die Schlammproduktion aus der Biomasse ($X_{CSB,BM}$, Gleichung 3-19) und dem inerten Anteil der Biomasse des CSB ($X_{CSB,inert,BM}$) berechnet werden. Des Weiteren müssen die Sauerstoffverbräuche des Kohlenstoffabbaus aus dem abbaubaren CSB des Zulaufes und der Denitrifikationszone aus der zu denitrifizierenden Menge an Nitrat berechnet werden. Falls das Verhältnis aus Sauerstoffverbrauch zu Sauerstoffangebot größer eins ist, kann V_D/V_{BB} oder die zusätzlich dosierte Kohlenstoffquelle verringert werden, ist der Wert kleiner eins, müssen diese vergrößert werden. Dieser Vorgang wird als Iteration bezeichnet und kann für diese LKA nicht nach dem Bemessungsschema angewandt werden, da das Verhältnis der Beckenvolumina nicht variierbar ist (vgl. Kapitel 3.1.2).

3.3.4.1 Fraktionierung des chemischen Sauerstoffbedarfs

Der chemische Sauerstoffbedarf ist eine maßgebliche Größe zur Bemessung der biologischen Stufe und stellt die wesentliche Einflussgröße für die Schlammproduktion, den Sauerstoffbedarf und die erreichbare Denitrifikation dar. Die CSB-Fractionen des Zulaufes bestehen im Wesentlichen aus zwei Fractionen, dem gelösten und dem partikulären Anteil, siehe Gleichung 3-6. Bei der Betrachtung der Fractionen beziehen sich alle Konzentrationen auf den Abwasserzufluss.

Nachfolgend werden die Herleitungen nach DWA-A 131 der verschiedenen Fraktionen aus Abbildung 7 für kommunale Kläranlagen/Abwässer aufgeführt.

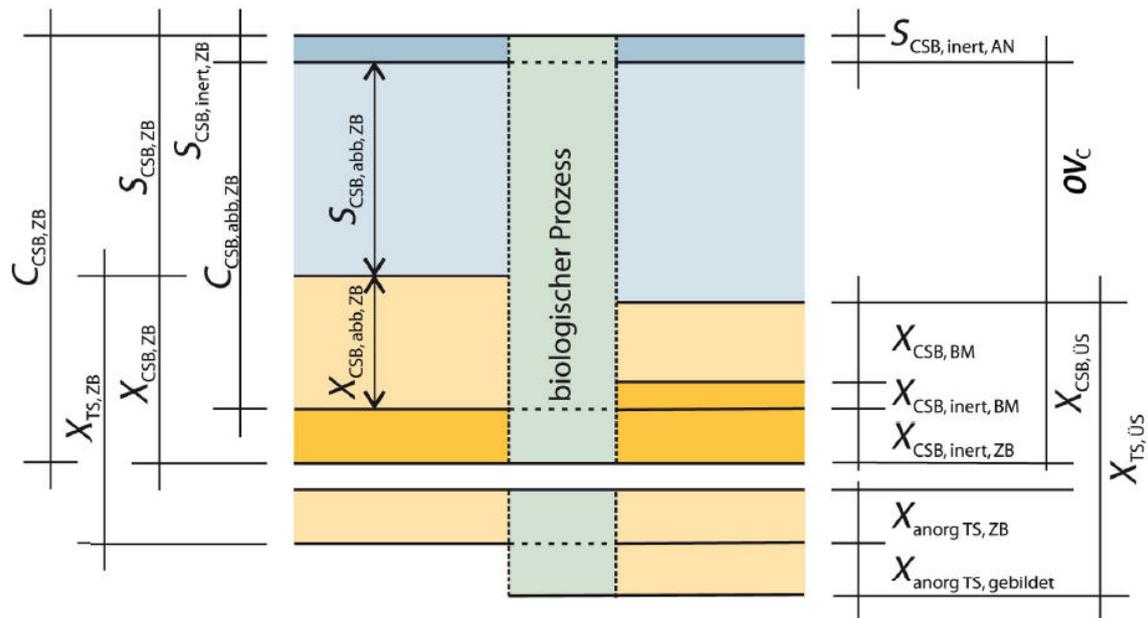


Abbildung 7: Prinzipschema der CSB-Fraktion und der abfiltrierbaren Stoffe bei der biologischen Behandlung (DWA, 2016)

$$C_{\text{CSB,ZB}} = S_{\text{CSB,ZB}} + X_{\text{CSB,ZB}} \quad \text{in mg/l} \quad \text{Gl. 3-6}$$

Dabei ist

- $C_{\text{CSB,ZB}}$ die CSB-Zulaufkonzentration in mg/l,
- $S_{\text{CSB,ZB}}$ die Konzentration der gelösten Anteile des Zulaufes in mg/l,
- $X_{\text{CSB,ZB}}$ die Konzentration der partikulären Anteile in mg/l.

Der gelöste und partikuläre Anteil besteht aus einem abbaubaren und inerten Anteil, in Gleichung 3-7 dargestellt.

$$C_{\text{CSB,ZB}} = S_{\text{CSB,abb,ZB}} + S_{\text{CSB,inert,ZB}} + X_{\text{CSB,abb,ZB}} + X_{\text{CSB,inert,ZB}} \quad \text{in mg/l} \quad \text{Gl. 3-7}$$

Dabei ist

- $S_{\text{CSB,abb,ZB}}$ der gelöste abbaubare Anteil des Zulaufes in mg/l,
- $S_{\text{CSB,inert,ZB}}$ der gelöste inerte Anteil des Zulaufes in mg/l,
- $X_{\text{CSB,abb,ZB}}$ der partikuläre abbaubare Anteil des Zulaufes in mg/l und
- $X_{\text{CSB,inert,ZB}}$ der partikuläre inerte Anteil des Zulaufes in mg/l.

Der gelöste inerte Anteil kann näherungsweise gleichgesetzt werden mit dem gelösten Anteil im Ablauf der Nachklärung siehe Gleichung 3-8.

$$S_{\text{CSB,inert,ZB}} = S_{\text{CSB,inert,AN}} = S_{\text{CSB,AN}} = f_s \cdot C_{\text{CSB,ZB}} \quad \text{in mg/l} \quad \text{Gl. 3-8}$$

Dabei ist

$S_{\text{CSB,inert,AN}}$ der gelöste inerte Anteil im Abfluss der Nachklärung in mg/l,
 $S_{\text{CSB,AN}}$ der gelöste Anteil im Abfluss der Nachklärung in mg/l,
 f_s der Anteil des inerten gelösten CSB am gesamt CSB, dieser liegt zwischen 0,05 und 0,1 (für kommunales Abwasser (kA) 0,05).

Der partikuläre Anteil kann gleichermaßen als Anteil des gesamten partikulären CSB nach Gleichung 3-9 abgeschätzt werden.

$$X_{\text{CSB,inert,ZB}} = f_A \cdot X_{\text{CSB,ZB}} = f_A \cdot (C_{\text{CSB,ZB}} - S_{\text{CSB,ZB}}) \quad \text{in mg/l} \quad \text{Gl. 3-9}$$

Dabei ist

f_A der Anteil des inerten partikulären CSB am gesamt CSB, dieser liegt je nach Art des Abwassers bzw. der Aufenthaltszeit zwischen 0,2 und 0,35 (für kA 0,3).

Damit lässt sich der abbaubare Anteil des Zulaufes ($C_{\text{CSB,abb,ZB}}$) aus Gleichung 3-10 berechnen.

$$C_{\text{CSB,abb,ZB}} = C_{\text{CSB,ZB}} - S_{\text{CSB,inert,AN}} - X_{\text{CSB,inert,ZB}} \quad \text{in mg/l} \quad \text{Gl. 3-10}$$

Der abbaubare Anteil enthält einen leicht abbaubaren Anteil, dieser ist für die Denitrifikation und der biologischen Phosphatelimination wichtig und kann nach Gleichung 3-11 bestimmt werden.

$$C_{\text{CSB,la,ZB}} = f_{\text{CSB}} \cdot C_{\text{CSB,abb,ZB}} \quad \text{in mg/l} \quad \text{Gl. 3-11}$$

Dabei ist

f_{CSB} der Faktor für durchschnittlich zusammen gesetztes kA mit 0,15 bis 0,25.

Die abfiltrierbaren Stoffe des Zulaufs ($X_{\text{TS,ZB}}$) setzen sich aus organischen ($X_{\text{orgTS,ZB}}$) und anorganischen Anteilen ($X_{\text{anorgTS,ZB}}$) zusammen. Die anorganischen Anteile zählen nicht mit zum $C_{\text{CSB,ZB}}$ und wird über die Gleichung 3-14 berechnet. Die abfiltrierbaren Stoffe und der organische Anteil lassen sich über die Gleichung 3-12 oder Gleichung 3-13 bestimmen.

$$X_{\text{TS,ZB}} = X_{\text{orgTS,ZB}} + X_{\text{anorgTS,ZB}} \quad \text{in mg/l} \quad \text{Gl. 3-12}$$

oder

$$X_{TS,ZB} = \frac{C_{CSB,ZB}}{1,6 \cdot (1-f_B)} \quad \text{in mg/l} \quad \text{Gl. 3-13}$$

$$X_{\text{anorgTS,ZB}} = f_B \cdot X_{TS,ZB} \quad \text{in mg/l} \quad \text{Gl. 3-14}$$

Dabei ist

f_B der Faktor des Glührückstandes der partikulären Substanz. Der Faktor f_B kann für Rohabwasser mit 0,3 und für vorgeklärtes Abwasser mit 0,2 angenommen werden.

Der partikuläre Anteil des Zulaufes ($X_{CSB,ZB}$) wird in der Regel nicht analytisch bestimmt und ergibt sich aus der Differenz des gesamt CSB und dem gelösten Anteil des Zulaufes Gleichung 3-15.

$$X_{CSB,ZB} = C_{CSB,ZB} - S_{CSB,ZB} \quad \text{in mg/l} \quad \text{Gl. 3-15}$$

Das Ergebnis der biologischen Reinigung ist der CSB im Ablauf, der sich aus dem gelösten inerten CSB, dem nicht abgebauten gelösten abbaubaren CSB, dem CSB der abfiltrierbaren Stoffe und dem als CSB gemessenen Überschussschlamm ($X_{CSB,ÜS}$) zusammensetzt. Aus der Differenz erhält man den verbrauchten Sauerstoff (OV_C) für die Atmungsvorgänge. Vernachlässigt man den nicht abgebauten gelösten abbaubaren CSB und die Schwebestoffe im Ablauf, ergibt sich der Erhaltungssatz nach Gleichung 3-16.

$$C_{CSB,ZB} = S_{CSB,\text{inert,AN}} + X_{CSB,ÜS} + OV_C \quad \text{in mg/l} \quad \text{Gl. 3-16}$$

Der $X_{CSB,ÜS}$ wird in Kapitel 3.3.4.2 näher beschrieben. Der Sauerstoffbedarf aus der Kohlenstoffelimination (OV_C) wird in Kapitel 3.3.4.8 bestimmt.

3.3.4.2 Schlammproduktion aus dem CSB-Abbau

Die CSB-Fraktion des produzierten Schlammes ($X_{CSB,ÜS}$) wird aus dem inerten partikulären Anteil des Zulaufes, dem gebildeten Biomassen Anteil ($X_{CSB,BM}$) und den vom endogenen Zerfall der Biomasse (BM) verbliebenen inerten Feststoffe ($X_{CSB,\text{inert,BM}}$), aus Gleichung 3-17, gebildet.

$$X_{CSB,ÜS} = X_{CSB,\text{inert,ZB}} + X_{CSB,BM} + X_{CSB,\text{inert,BM}} \quad \text{in mg/l} \quad \text{Gl. 3-17}$$

Für die Bildung der BM und den endogenen Zerfall des Schlammes gilt der Zusammenhang aus Gleichung 3-18.

$$X_{\text{CSB,BM}} = C_{\text{CSB,abb,ZB}} \cdot Y - X_{\text{CSB,BM}} \cdot t_{\text{TS}} \cdot b \cdot F_T \quad \text{in mg/l} \quad \text{Gl. 3-18}$$

Nach Umstellen der Gleichung 3-18 nach $X_{\text{CSB,BM}}$ erhält man die Gleichung 3-19.

$$X_{\text{CSB,BM}} = \frac{C_{\text{CSB,abb,ZB}} \cdot Y}{1 + t_{\text{TS}} \cdot b \cdot F_T} \quad \text{in mg/l} \quad \text{Gl. 3-19}$$

Dabei ist

Y der Ertragskoeffizient für den abbaubaren CSB mit 0,67 g gebildete BM/g abgebaute BM,

b der Zerfallskoeffizient mit 0,17 d⁻¹ und

F_T der Temperaturfaktor für die endogene Veratmung mit 1,072^(T-15).

Der verbleibende inerte partikuläre Anteil vom endogenen Zerfall kann mit 20% der zerfallenden BM mit der Gleichung 3-20 berechnet werden.

$$X_{\text{CSB,inert,BM}} = 0,2 \cdot X_{\text{CSB,BM}} \cdot t_{\text{TS}} \cdot b \cdot F_T \quad \text{in mg/l} \quad \text{Gl. 3-20}$$

Der Überschussschlamm aus dem CSB-Abbau kann abgeschätzt werden in Gleichung 3-21 oder Gleichung 3-22. Dieser ergibt sich aus 92% der organischen Anteile der gebildeten Feststoffe, den partikulären CSB des Zulaufes (1,6 gCSB/g oTS), den inerten partikulären Anteilen des CSB Zulaufes (1,33 gCSB/g oTS), der gebildeten Biomasse (1,42 gCSB/g oTS) und den anorganischen abfiltrierbaren Stoffe des Zulaufes.

$$\dot{U}_{d,C} = Q_{d,\text{Konz}} \cdot \left(\frac{X_{\text{CSB,inert,ZB}}}{1,33} + \frac{X_{\text{CSB,BM}} + X_{\text{CSB,inert,BM}}}{0,92 \cdot 1,42} + X_{\text{anorgTS,ZB}} \right) / 1000 \quad \text{in kg/d} \quad \text{Gl. 3-21}$$

oder

$$\dot{U}_{d,C} = Q_{d,\text{Konz}} \cdot \left(\frac{X_{\text{CSB,inert,ZB}}}{1,33} + \frac{X_{\text{CSB,BM}} + X_{\text{CSB,inert,BM}}}{0,92 \cdot 1,42} + f_B \cdot X_{\text{TS,ZB}} \right) / 1000 \quad \text{in kg/d} \quad \text{Gl. 3-22}$$

3.3.4.3 Phosphatelimination und Fällmittelbedarf

Die Phosphatelimination kann zu einem komplett durch Simultanfällung, durch biologische Elimination (üblicherweise kombiniert mit Simultanfällung) oder durch Vor- bzw. Nachfällung erfolgen. Für die Ermittlung des Fällmittelbedarfs für die chemische Phosphatelimination muss eine Phosphatbilanz nach Gleichung 3-23 aufgestellt werden.

$$X_{P,F\ddot{a}ll} = C_{P,ZB} - C_{P,AN} - X_{P,BM} - X_{P,Bio} \quad \text{in mg/l} \quad \text{Gl. 3-23}$$

Dabei ist

| | |
|---------------------|---|
| $X_{P,F\ddot{a}ll}$ | der zu fällende Phosphor in mg/l, |
| $C_{P,ZB}$ | die Phosphorkonzentration des Zulaufs in mg/l , |
| $C_{P,AN}$ | die Phosphorkonzentration des Ablaufs in mg/l, |
| $X_{P,BM}$ | der in der BM eingebauter Phosphor in mg/l und |
| $X_{P,Bio}$ | der durch die biol. Phosphatelimination biol. gebundener Phosphor in mg/l |

Bei kommunalen Kläranlagen sollte die Phosphatkonzentration im Ablauf mit 60% bis 70% des Überwachungswertes ($C_{P,\ddot{U}W}$) gewählt werden. Der in der Biomasse eingebundene Phosphor kann mit 0,5% der CSB-Zulaufkonzentration abgeschätzt werden. Für Anlagen mit vorgeschalteter Denitrifikation kann der durch die biologische Phosphatelimination biologisch gebundene Phosphor mit 0,2% der CSB-Zulaufkonzentration angenommen werden.

Der mittlere Fällmittelbedarf ergibt sich aus dem Quotient der zu fällenden Phosphatmenge und der benötigten Dosiermenge an Fällmittel und wird als β -Faktor angegeben. Der β -Faktor für kommunales Abwasser kann üblicherweise mit 1,5 mol Me^{3+} /mol $X_{P,F\ddot{a}ll}$ angenommen werden. Es kann ein Bedarfswert für Eisen von 2,7 kg/kg $X_{P,F\ddot{a}ll}$ oder für Aluminium 1,3 Al/kg $X_{P,F\ddot{a}ll}$ berechnet werden.

Um den Bedarfswert zu berechnen muss zunächst mit der zu fällenden Menge an Phosphat aus Gleichung 3-23 und der molaren Masse von Phosphor die Stoffmengenkonzentration der Phosphatmenge berechnet werden. Anschließend kann mit dem β -Faktor die zu fällende Menge an Phosphat in mol/l umgerechnet werden.

Um die zu dosierende Menge an Eisen in g/d zu erhalten, muss mit der molaren Masse von Eisen-III-Chlorid multipliziert werden. Anschließend wird die Tagesfracht durch die Berücksichtigung des täglichen Ablaufvolumenstroms ($Q_{d,Konz}$) berechnet. Wenn z.B. eine 40-prozentige Eisen-III-Chlorid Lösung verwendet wird, muss dieser Faktor und deren Dichte für die Umrechnung in Gleichung 3-24 berücksichtigt werden.

$$B_{d,FeCl_3,40\%} = \left(\frac{X_{P,F\ddot{a}ll}}{\text{molare Masse P}} \cdot \beta \cdot \text{molare Masse FeCl}_3 \cdot Q_{d,Konz} \cdot \frac{100\%}{40\%} \right) \cdot \frac{1}{\rho_{FeCl_3}} \quad \text{in } \mu\text{g/d} \quad \text{Gl. 3-24}$$

Dabei ist

| | |
|-----------------------|---|
| Molare Masse P | mit 30,99 g/mol, |
| β | mit 1,5, |
| molare Masse $FeCl_3$ | mit 162 g/mol, |
| ρ_{FeCl_2} | die Dichte der Eisen-III-Chlorid Lösung mit 1420 g/l. |

3.3.4.4 Schlammproduktion aus der Phosphatelimination

Die Schlammproduktion aus der Phosphatelimination ($\dot{U}_{S_d,P}$) setzt sich aus der biologischen und der Simultanfällung (chemischen) Phosphatelimination zusammen. Der biologische Anteil kann mit 3 g TS/g biologisch eliminiertem Phosphor angenommen werden. Die Menge des chemischen Anteils fällt je nach Dosiermittel und Dosierbedarf an. Dieser kann mit 2,5 kg TS/kg zu dosiertem Eisen oder mit 4 kg TS/kg zu dosierten Aluminium gerechnet werden. Daraus ergibt sich folgende Gleichung 3-25.

$$\dot{U}_{S_d,P} = Q_{d,Konz} \cdot (3 \cdot X_{P,Bio} + 6,8 \cdot X_{P,Fäll,Fe} + 5,3 \cdot X_{P,Fäll,Al}) / 1000 \quad \text{in kg/d} \quad \text{Gl. 3-25}$$

3.3.4.5 Bestimmung des gesamten Überschussschlammes

Der gesamte produzierte Überschussschlamm setzt sich aus dem organisch abgebauten und organisch gebundenen Feststoffen (Kapitel 3.3.4.2), sowie der Anteile aus der Phosphatelimination (Kapitel 3.3.4.4), wie in Gleichung 3-26, zusammen.

$$\dot{U}_{S_d} = \dot{U}_{S_d,C} + \dot{U}_{S_d,P} \quad \text{in kg/d} \quad \text{Gl. 3-26}$$

3.3.4.6 Zusammenhang Schlammproduktion und Schlammalter

Das Schlammalter lässt sich aus der Gesamtmasse an Schlamm ($M_{TS,BB}$) in der Belebung pro neu dazu gekommene Schlammmasse pro Tag aus Gleichung 3-27 bestimmen.

$$\begin{aligned} t_{TS} &= \frac{M_{TS,BB}}{\dot{U}_{S_d}} \\ &= \frac{V_{BB} \cdot TS_{BB}}{\dot{U}_{S_d}} \\ &= \frac{V_{BB} \cdot TS_{BB}}{\dot{U}_{S_d} \cdot TS_{\dot{U}_S} + Q_{d,Konz} \cdot X_{TS,AN}} \quad \text{in d} \quad \text{Gl. 3-27} \end{aligned}$$

Dabei ist

$TS_{\dot{U}_S}$ der Trockensubstanzgehalt des Überschussschlammes in kg/l.

Der Anteil an abfiltrierbaren Stoffen im Ablauf ist normalerweise so gering, dass er vernachlässigt werden kann. Dann wird das Schlammalter vereinfacht nach Gleichung 3-28 bestimmt. Im Falle von übermäßigem Schlammaustrag aus der Nachklärung muss dieser jedoch für eine genaue Berechnung des Schlammalters bestimmt werden.

$$t_{TS} = \frac{V_{BB} \cdot TS_{BB}}{\dot{U}_{S_{d,C}} + \dot{U}_{S_{d,P}}} \quad \text{in d} \quad \text{Gl. 3-28}$$

3.3.4.7 Berechnung der zu denitrifizierenden Nitratkonzentration

Die Menge an Nitrat, die im Tagesmittel zu denitrifizieren ist, ergibt sich aus der Stickstoffbilanz in Gleichung 3-29.

$$S_{NO_3,D} = C_{N,ZB} - S_{orgN,AN} - S_{NH_4,AN} - S_{NO_3,AN} - X_{orgN,BM} - X_{orgN,inert,BM} \quad \text{in mg/l} \quad \text{Gl. 3-29}$$

Dabei ist

| | |
|---------------------|--|
| $C_{N,ZB}$ | der gesamte Stickstoff im Zulauf in mg/l, |
| $S_{orgN,AN}$ | die Konzentration an anorganischem Stickstoff im Ablauf mit 2 mg/l, |
| $S_{NH_4,AN}$ | der Ammoniumgehalt im Ablauf wird näherungsweise mit 0 mg/l angesetzt, |
| $S_{NO_3,AN}$ | die Nitratkonzentration im Ablauf mit 60% bis 80% von $S_{anorgN,\dot{U}W}$ in mg/l, |
| $X_{orgN,BM}$ | der in der BM eingebundene Stickstoff mit 7% von $X_{CSB,BM}$ in mg/l und |
| $X_{orgN,inert,BM}$ | der Stickstoffanteil der an die partikulären Fraktion gebunden ist mit 3% von $(X_{CSB,inert,BM} + X_{CSB,inert,ZB})$ in mg/l. |

$S_{anorgN,\dot{U}W}$ ist als der Überwachungswert für die gesamte Stickstoffablaufkonzentration zu wählen und wird je nach Größenklasse⁶ (GK) einer Abwasserbehandlungsanlage für die Einleitung in Gewässer nach der Abwasserverordnung (AbwV), festgelegt. Für LKA wird nach DIN EN ISO 11733:2004 (D) ein geringere Stickstoffablaufwert von ≤ 11 mg/l angestrebt, um zusätzlich ungewollte Denitrifikation in der Nachklärung zu vermeiden.

3.3.4.8 Sauerstoffbedarf für den Kohlenstoffabbau

Über den abbaubaren Anteil des CSB-Zulaufs zum Belebungsbecken kann der Sauerstoffbedarf berechnet werden. Je nach eingesetzter Verfahrenstechnik wird der Sauerstoffbedarf ($OV_{C,D}$) verschieden hergeleitet und besteht aus dem leicht abbaubaren Anteil des CSB ($C_{CSB,la,ZB}$), eventuell aus externen Kohlenstoffquellen ($C_{CSB,dos}$) und den restlichen abbaubaren CSB ($C_{CSB,abb,ZB} - C_{CSB,la,ZB}$).

⁶ GK1-kleiner als 60 kg/dBSB₅ (roh), GK2-60 bis 300 kg/dBSB₅ (roh), GK3-größer 300 bis 600 kg/dBSB₅ (roh), GK4-größer 600 bis 6000 kg/dBSB₅ (roh), GK5-größer als 6000 kg/dBSB₅ (roh) (AbwV, 1997)

Um die Gleichung 3-32 zu lösen, muss zuerst der gesamte Sauerstoffbedarf für den Kohlenstoffabbau (OV_C) aus Gleichung 3-30 berechnet werden.

$$OV_C = C_{CSB,abb,ZB} + C_{CSB,dos} - X_{CSB,BM} - X_{CSB,inert,BM} \quad \text{in mg/l} \quad \text{Gl. 3-30}$$

Anschließend muss der Anteil des Sauerstoffbedarfs aus dem leicht abbaubaren CSB und dem dosierten CSB als ($OV_{C,la,vorg}$) für vorgeschaltete Denitrifikation aus Gleichung 3-31 bestimmt werden.

$$OV_{C,la,vorg} = f_{CSB} \cdot C_{CSB,abb,ZB} \cdot (1 - Y) + C_{CSB,dos} \cdot (1 - Y_{CSB,dos}) \quad \text{in mg/l} \quad \text{Gl. 3-31}$$

Dabei ist

f_{CSB} das Verhältnis aus $C_{CSB,la,ZB} / C_{CSB,abb,ZB}$ mit 0,2.

Daraus ergibt sich für die vorgeschaltete Denitrifikation ein Sauerstoffbedarf für den Kohlenstoffabbau aus Gleichung 3-32.

$$OV_{C,D} = 0,75 \cdot [OV_{C,la,vorg} + (OV_C - OV_{C,la,vorg}) \cdot (V_D/V_{BB})^{0,68}] \quad \text{in mg/l} \quad \text{Gl. 3-32}$$

Aus den Sauerstoffkonzentrationen kann der Sauerstoffbedarf pro Tag, wie folgend für den CSB-Abbau ($OV_{d,C}$) aus Gleichung 3-33, für die Nitrifikation ($OV_{d,N}$) aus Gleichung 3-34 und für die Sauerstoffrückgewinnung pro Tag aus der Denitrifikation ($OV_{d,D}$) aus Gleichung 3-35, bestimmt werden.

$$OV_{d,C} = (Q_{d,Konz} \cdot OV_C) / 1000 \quad \text{in kgO}_2/\text{d} \quad \text{Gl. 3-33}$$

Für die Nitrifikation können 4,3 gO₂ je Kg oxidierten Stickstoff angenommen werden.

$$OV_{d,N} = (Q_{d,Konz} \cdot 4,3 \cdot (S_{NO_3,D} - S_{NO_3,ZB} + S_{NO_3,AN})) / 1000 \quad \text{in kgO}_2/\text{d} \quad \text{Gl. 3-34}$$

Für die Denitrifikation können 2,86 gO₂ je kg denitrifizierten Stickstoff angenommen werden.

$$OV_{d,D} = (Q_{d,Konz} \cdot 2,86 \cdot S_{NO_3,D}) / 1000 \quad \text{in kgO}_2/\text{d} \quad \text{Gl. 3-35}$$

3.3.4.9 Vergleich Sauerstoff-Verbrauch und Sauerstoff-Dargebot

Über den Vergleich von Sauerstoffzehrung zu Sauerstoffangebot kann über die Gleichung 3-36 nachgewiesen werden, ob eine ausreichende Reduzierung der Nitratkonzentration erreicht werden kann. Die Iteration des Verhältnisses von V_D/V_{BB} wird solange durchgeführt bis $x = 1$ ist.

$$X = \frac{OV_{C,D}}{2,86 \cdot S_{NO_3,D}} \quad \text{in g/d} \quad \text{Gl. 3-36}$$

3.3.4.10 Rückführverhältnisse

Das Rückführverhältnis für die Nachklärung zur Denitrifikation ergibt sich aus Gleichung 3-37.

$$RV = \frac{TS_{BB}}{TS_{RS} - TS_{BB}} \quad \text{Gl. 3-37}$$

Das Rückführverhältnis für vorgeschaltete Denitrifikation ergibt sich aus Gleichung 3-38, wenn die Nitratzulaufkonzentration vernachlässigbar klein ist ($S_{NO_3,ZB} = 0$). Sollte die Nitratstickstoffkonzentration im Zulauf größer ausfallen, kann die Rückführung geringer ausfallen.

$$RF = \frac{S_{NO_3,D}}{S_{NO_3,AN}} \quad \text{Gl. 3-38}$$

Die Rückführung des Nitratsickstoffes erfolgt über die interne Rezirkulation (Q_{RZ}) und über den Rücklaufschlamm (Q_{RS}). Mit Gleichung 3-38 kann aus Gleichung 3-39 Q_{RZ} bestimmt werden.

$$RF = \frac{Q_{RS}}{Q_{T,2h,max}} + \frac{Q_{RZ}}{Q_{T,2h,max}} \quad \text{Gl. 3-39}$$

Dabei ist

$Q_{T,2h,max}$ der maximale Trockenwetterabfluss als 2-Stunden-Mittel in m^3/h .

Der maximale Wirkungsgrad der vorgeschalteten Denitrifikation ergibt sich dann aus der Gleichung 3-40.

$$\eta_D \leq 1 - \frac{1}{1 + RF} \quad \text{Gl. 3-40}$$

4 Material und Methoden

Im diesem Kapitel werden die verwendeten Materialien und die Analyseverfahren für die Durchführung (vgl. Kapitel 5.1) aufgeführt.

4.1.1 Sauerstoffkonzentration

Die Sauerstoffkonzentration wird im Belebungsbecken der Nitrifikation mit den „at-line-Sonden“ WinLab Dateline Oxygen Meter permanent gemessen. Der Sauerstoffsensor stammt von der Firma Windhaus-Labortechnik GmbH & Co. KG und nutzt das Clarksche Messprinzip (Windhaus-Labortechnik, 2016). Zusätzlich erfolgt eine elektronische Regelung der Sauerstoffkonzentration durch die Regeleinheit der Firma Behr-Labor-Technik, wodurch eine Unter- bzw. Überversorgung von Sauerstoff verhindert werden kann. Die Sauerstoffsonde wurde täglich gereinigt und in regelmäßigen Abständen überprüft mit einem O₂-Handmessgerät „WTW Oxi 3310“ und ggf. gewartet oder kalibriert.

4.1.2 pH-Wert

Die pH-Messung erfolgte täglich im Nachklärbecken mit Hilfe einer Glaselektroden-Messsonde „WTW Sentix 41“ vom Hersteller Xylem Analytics Germany Sales GmbH & Co. KG, WTW. Die pH-Sonde wurde nach jedem gebrauch vorschriftsmäßig gereinigt und mit der Elektrolytlösung zum Schutz der Glaselektrode verschlossen. Die pH-Sonde wurde nach Bedarf kalibriert.

4.1.3 TS-Messung

Bei der TS-Messung wurde näherungsweise die Trockensubstanz gemessen (siehe Kapitel 3.2.9.4). Bei dieser Arbeit wurde aus Kostengründen und Umsetzungsmöglichkeiten, die Massenkonzentration durch Zentrifugieren und nicht durch Abfiltrieren bestimmt (vgl. Kapitel 5.1).

4.1.4 Photometrische Messungen

Für die Auswertung der photometrischen Messungen wurde das Kompaktphotometer „NANOCOLOR PF-12^{Plus}“ von der Firma MACHEREY-NAGEL GmbH & CO. KG verwendet (REF 919250). Die Photometrie nutzt die Tatsache, dass jede farbige Substanz nur eine bestimmte Wellenlänge absorbiert. Diese Wellenlänge ergibt sich aus dem Lambert-Beer'schen Gesetz. Deshalb wird für die Bestimmung der Konzentrationen von farbigen Lösungen Licht einer bestimmten Wellenlänge benötigt (monochromatisches Licht) (MACHEREY-NAGEL, 2017). Bei den Summenparametern CSB und Phosphat musste vor der Analyse ein Aufschluss durchgeführt werden, dabei wurde der „NANOCOLOR VARIO C2“ Thermoblock verwendet (REF 919350). Die Parameter Ammonium, Nitrit und Nitrat und Alkalinität wurden nach der kolorimetrischen Bestimmung durchgeführt und entsprechen dem Deutschen Einheitsverfahren zur Wasser-, Abwasser- und Schlammuntersuchung (DEV). Nachfolgend wird in diesem

Kapitel kurz auf die Reaktionsgrundlage eingegangen. Die Durchführung der einzelnen Testverfahren wird in Kapitel 5.2 näher ausgeführt (MACHEREY-NAGEL, 2017).

4.1.4.1 Ammonium

Die Ammoniumbestimmung wurde mit dem „VISCOCOLOR ECO Ammonium 3“ (REF 931008) der Firma MACHEREY-NAGEL GmbH & Co. KG durchgeführt. Die Reaktionsgrundlage erfolgt analog zu DIN 38406-E5, ISO 7150-1, APHA 4500-NH₃-F und EPA 350.1. Im alkalischen Bereich werden durch Chloreinwirkung aus Ammoniumionen Monochloramine. Die Monochloramine bilden mit Phenolen durch Katalysatoren blaue Indophenolfarbstoffe (MACHEREY-NAGEL, 2017).

4.1.4.2 Nitrat

Die Nitratbestimmung wurde mit dem „VISCOCOLOR ECO Nitrat“ (REF 931041) der Firma MACHEREY-NAGEL GmbH & Co. KG durchgeführt. Die Reaktionsgrundlage erfolgt analog zu DIN 38405-D9-2 und ISO 7890-1, APHA 4500-NH₃-F und EPA 350.1. Mit einem anorganischen Reduktionsmittel wird Nitrat zu Nitrit reduziert. Es erfolgt eine Diazotierung des Nitrits zu einem aromatischen Amin, dieses wird anschließend zu einem Azofarbstoff gebunden. Bei diesem verwendeten „VISCOCOLOR“-Tester erfolgt nach der Reduktion zu Nitrit, die Reaktion mit Sulfanilsäure und 1-Naphtylamin zu einem roten Azofarbstoff (MACHEREY-NAGEL, 2017).

4.1.4.3 Nitrit

Die Nitritbestimmung wurde mit dem „VISCOCOLOR ECO Nitrit“ (REF 931044) der Firma MACHEREY-NAGEL GmbH & Co. KG durchgeführt. Die Reaktionsgrundlage erfolgt analog zu DIN EN 26777-D1, ISO 6777, APHA 4500-NH₂ und EPA 354.1. Nitrit wird in saurer Lösung durch Sulfanilsäure oder Sulfanilamid diazotiert. Das entstandene Diazoniumsalz bindet sich mit den aromatischen Aminen, wodurch ein intensiver Azofarbstoff entsteht (MACHEREY-NAGEL, 2017).

4.1.4.4 Alkalinität

Die Alkalinitätsbestimmung wurde mit dem „VISCOCOLOR ECO Alkalinität TA“ (REF 931204) der Firma MACHEREY-NAGEL GmbH & Co. KG durchgeführt. Bei dieser Methode wird die Fähigkeit eines Wassers Säuren zu neutralisieren erfasst. Die Fähigkeit lässt sich über die Summe aller Basen (Hydroxidionen) und puffernden Substanzen (z.B. Carbonate, Phosphate, etc.) bestimmen. Bei der photometrischen Bestimmung wird dies mittels Bromphenolblau realisiert (MACHEREY-NAGEL, 2017).

4.1.4.5 Phosphat

Die Phosphatbestimmung wurde mit dem „NANOCOLOR ortho- und gesamt-Phosphat 1“ (REF 985076) der Firma MACHEREY-NAGEL GmbH & Co. KG durchgeführt. Diese Methode unterliegt der Reaktionsgrundlage analog zu DIN EN ISO 6878-D11, APHA 4500-P, EPA 365.2 und 365.3. Phosphormolybdänsäure wird durch Ammoniummolybat und ortho-Phosphat-Ionen gebildet. Mithilfe von Reduktionsmittel wird diese zu Molybdänblau reduziert. Der Gesamtphosphat wird durch Aufschluss, einer saure Oxidation bei 100-120°C, erfasst. Dabei werden auch die Poly- und Organophosphate ermittelt (MACHEREY-NAGEL, 2017).

4.1.4.6 Chemischer Sauerstoffbedarf

Die CSB-Bestimmung wurde mit dem „NANOCOLOR CSB 160“ (REF 985026) und dem „NANOCOLOR CSB 40“ (REF 985027) der Firma MACHEREY-NAGEL GmbH & Co. KG durchgeführt. Die beiden Tester unterscheiden sich nur im Messbereich, das Reaktionsprinzip ist bei beiden gleich. Die Reaktionsgrundlage erfolgt analog zu DIN 38409-H41, APHA 5220-D und EPA 410.4. sowie der Anforderungen der DIN ISO 15705:2002. Durch die silberkatalysierte Oxidation mit Kaliumdichromat/Schwefelsäure bei 148°C über zwei Stunden wird der chemische Sauerstoffbedarf ermittelt. Eventuell vorhandenes Chlorid wird durch Quecksilbersulfate zu undissoziierte Quecksilberchloride gebunden. Dadurch wird die Oxidation zu unerwünschtem Chlor unterbunden. Das Silbersulfat dient dabei als Katalysator zur Erhöhung der Oxidation.

4.1.5 CSB-Fraktionierung

Zur Bestimmung der verschiedenen Fraktionen des CSBs (vgl. Kapitel 3.3.4.1) müssen zunächst die gelösten und partikulären Anteile durch Filtration voneinander getrennt werden. Eine Möglichkeit besteht darin, die gelösten Anteile durch Filtration der Probe mit 0,45 µm von den partikulären Anteilen zu trennen.

Die CSB-Konzentration der Probe muss vor und nach der Filtration bestimmt werden. Der Konzentrationsanteil nach der Filtration ergibt den gelösten Anteil der CSB-Fraktion. Die Differenz der beiden Messungen ergibt den partikulären Anteil der CSB-Fraktionierung (DWA, 2016). Für die Messung wurde der Filter aus „Celluloseacetat“ Bestell.-Nr. 11106-47-N und Chargen.-Nr. 0117 11061602963 der Firma Sartorius Stedim Biotech GmbH verwendet. Für die Durchführung der Filtration wurde eine Vakuumpumpe und ein Filtrationsgefäß (Hersteller: NALGENE) verwendet. Die Durchführung der Messungen wird in Kapitel 5.6 näher beschrieben.

4.1.6 SPE-Festphasenextraktion für die Sulfamethoxazol Messung

Für die Bestimmung der SMX-Konzentration der Proben aus Kapitel 6.9 und 6.10 muss zuerst eine Aufkonzentrierung der Proben mittels SPE-Festphasenextraktion erfolgen, da die zu messenden Konzentrationen im ng/l Bereich liegen (vgl. Kapitel 1.1.4). Die SPE wurde nach einer im Rahmen des Projektes PharmCycle erarbeiteten Arbeitsanweisung von Herrn M.Sc. Jens Heseding durchgeführt (vgl. Tabelle 13 in Kapitel 5.7). Nach Durchführung der SPE wurden an der Leuphana Universität Lüneburg mittels LC/MS (*high performance liquid chromatography / mass spectrometry*) die Konzentrationen der Proben analytisch bestimmt. Die HPLC übernimmt die Auftrennung der Substanzen auf einer analytischen Säule, anschließend werden diese Substanzen mit dem MS detektiert. Für die Durchführung der SPE wurden die Chemikalien aus Tabelle 9 und das Material aus Tabelle 10 verwendet.

Tabelle 9: Verwendete Chemikalien für die SPE-Durchführung

| Chemikalien | Hersteller | REF.-Nummer |
|---------------------------|------------|-------------|
| Methanol | Roth | 4627.2 |
| Methanol | Roth | 7342.1 |
| Trichlormethan/Chloroform | Roth | 3313.1 |
| Acetonitril | Roth | CN20.1 |

Tabelle 10: Verwendete Materialien für die SPE-Durchführung

| Bezeichnung | Hersteller | Typ | REF.-Nummer |
|---------------|----------------|----------------------------------|-------------|
| Vakuumkammer | Macherey-Nagel | 12-Säulenkammer | 730150 |
| SPE-Kartusche | Macherey-Nagel | Chromabond HR-X 3mL/200mg | 730931 |
| Schlauch | Macherey-Nagel | PTFE-Schläuche | N.N. |
| Pumpe | N.N. | N.N. | N.N. |
| Rüttler | IKA | VORTEX 1 Model V1 S000 | 0004047700 |
| Schottflasche | VWR | GL45, 86 mm, 500 ml | 215-1516 |
| Braunglas | Macherey-Nagel | 1,5 ml, 11,6 x 32 mm | 702284 |
| Schraubkappe | Macherey-Nagel | N 9 PP | 702038 |
| Reaktionsglas | Macherey-Nagel | 14 mm ID | 91680 |
| Faltenfilter | ROTH | Rotilabo®-Faltenfilter, Typ 113P | CA11.1 |

5 Durchführung

5.1 TS-Messung

Bei der Bestimmung der Trockensubstanz wurden Mikroreaktionsgefäße 1,5 ml verwendet. Die Probennahme erfolgte mittels Pipette, wobei die Pipettenspitze schräg abgeschnitten wurde, um eine Verstopfung durch größere Schlammflocken zu verhindern. Die leeren Gefäße wurden über Nacht im Trockenschrank bei 105°C getrocknet und nach Abkühlung gewogen. Nach Probennahme, Probenvorbereitung und Trocknung der Proben bei 105°C im Trockenschrank wurden die Gefäße erneut gemessen. Aus dieser Differenz ließ sich näherungsweise der Trockensubstanzgehalt in g/l bestimmen.

Die Probennahme für den Trockensubstanzgehalt im Belebungsbecken (TS_{BB}) erfolgte im Nitrifikationsbecken bei ausgeschalteter Sauerstoffzufuhr und eingeschaltetem Rührer. Das Ausschalten der Sauerstoffzufuhr sollte vermeiden, dass anstelle des Wasserschlammgemisches Luft abgezogen wird. Es wurde davon ausgegangen, dass die Schlammkonzentration im Belebungsbecken der Denitrifikations- und der Nitrifikation dieselbe ist, daher konnte auf eine zusätzliche Bestimmung im Denitrifikationsbecken verzichtet werden. Es wurden 5 Proben je 1,5 ml in die Mikroreaktionsgefäße gefüllt. Anschließend wurde der Schlamm in der Probe weitestgehend, mittels Zentrifuge über 5 min, bei 20°C und einer Umdrehung von 13.000 rpm, vom Wasser getrennt. Der Wasserüberstand (1 ml) wurde mit einer Pipette abgezogen, um eine eventuelle Salzkristallbildung bei Trocknung zu verringern (Probenvorbereitung, vgl. Kapitel 3.2.9.4).

Für die Bestimmung des Trockensubstanzgehaltes des Rückführschlammes (TS_{RS}) wurden über das Drei-Wege-Ventil der Nachklärung Proben gezogen und analysiert. Es wurden zunächst 100 ml Probe entnommen und unter ständigem Rühren fünf Proben je 1,5 ml in die Mikroreaktionsgefäße abgefüllt. Wie zuvor wurde auch hier der Schlamm vom Wasser getrennt und eine eventuelle Salzkristallbildung bei der Trocknung durch Abziehen des Wasserüberstandes verringert (vgl. Kapitel 3.2.9.4).

Die Trocknung der Proben erfolgte für die Bestimmung der Trockensubstanz im Belebungsbecken und des Rückführschlammes im Trockenschrank über 24 Stunden bei 105°C. Bei jeder Messung wurden zur Kontrolle 5 Proben über 48 Stunden im Trockenschrank bei 105°C getrocknet. Nachfolgend wurden die Proben erneut gewogen um sicherzustellen, dass die Proben nach 24 Stunden Trocknung das Trockengleichgewicht erreicht haben.

5.2 Photometrische Messungen

Die Wasserparameter der photometrischen Messung wurden zum Teil für den Zu- und Ablauf der Laborkläranlagen zweimal wöchentlich bestimmt. Mit Ausnahme der CSB-Konzentration wurden alle restlichen Wasserparameter ausschließlich für den Ablauf bestimmt. Es wurde eine Probe des Ablaufs der Kläranlagen von ca. 250 ml genommen und eine Probe des Zulaufs der Laborkläranlagen von 100 ml aufgefangen. Zur Probenvorbereitung mussten verschiedene Verdünnungen der Probe mit demineralisiertem Wasser angesetzt werden, damit der erwartete Wert auch im Messbereich des verwendeten Analyseverfahrens liegt (vgl. Tabelle 11).

Tabelle 11: Messbereiche und Verdünnungen der Analyten der photometrischen Bestimmung

| Analyt | Messbereich | i.d.R. verw. Verdünnung |
|-----------------------|-------------------------------------|--------------------------------|
| Ammonium | 0,1 - 2,0 mg/l NH ₄ -N | 1 |
| Nitrit | 0,01 - 0,15 mg/l NO ₂ -N | 5 |
| Nitrat | 1,0 -14 mg/ NO ₃ -N | 2 |
| Alkalinität | 0,1 - 5,0 mmol/l H ⁺ | 2 |
| Phosphat | 0,05 - 1,50 mg/l P | 5 |
| CSB | 15 - 160 mg/l CSB | 1 |
| Zulaufsubstanz | | |
| CSB | 15 - 160 mg/l CSB | 8 |

Für die Bestimmung der Parameter Ammonium, Nitrit, Nitrat, Alkalinität, CSB, und Phosphat wurde die Durchführung nach den Beipackzetteln der verwendeten Tester durchgeführt und im Anhang C aufgeführt (vgl. Kapitel 4.1.4). Bei der Probenvorbereitung der Parameter CSB und Phosphat musste zusätzlich ein Aufschluss mithilfe des Thermoblocks erfolgen (vgl. Kapitel 4.1.4 und Anhang C).

5.3 Technischer Umbau der Laborkläranlage

Aufgrund der in Kapitel 3.1.3 erwähnten Probleme der Betriebsführung wurden neue Pumpen, ein doppelwandiger Vorlagebehälter (siehe Abbildung 8) zur Temperierung des synthetischen Abwassers auf 4°C und neue Wassertanks installiert. Dabei wurden zwei neue Peristaltikpumpen pro Anlage für den Zulauf des synthetischen Abwassers und des Wassers vom Typ „heidolph-Hei-FLOW Precision 01“ vom Hersteller Heidolph Instruments GmbH & Co. KG verwendet (siehe Abbildung 9). Entgegen dem Hinweis der DIN EN ISO 11733:2004 (D) wurden der organische und der anorganische Anteil des synthetischen Abwassers zusammen im Vorlagebehälter vermischt, wodurch die Abbauprozesse im Vorlagebehälter begünstigt werden könnten. Durch die Kühlung des Vorlagebehälters auf 4°C sollte ein Abbau im Vorlagebehälter jedoch geringer sein (vgl. Kapitel 6.3 und 6.8). Die CSB-Zulaufkonzentration ergibt sich aus dem Quotienten der Gesamtkonzentration im Vorlagebehälter und dem Verhältnis vom Nährstoff- und Wasserzulaufstrom durch folgenden Zusammenhang in Gleichung 5-2.

$$C_{\text{CSB,ZB}} = \frac{C_{\text{CSB,Vorlage}}}{\frac{Q_{\text{Feed}} + Q_{\text{Water}}}{Q_{\text{Feed}}}} \quad \text{in mg/l} \quad \text{Gl. 5-2}$$

Dabei ist

$C_{\text{CSB,Vorlage}}$

die CSB-Konzentration im Vorlagebehälter in mg/l,

Q_{Feed}

der Nährstoffzulauf in ml/min und

Q_{Water}

der Wasserzulauf in ml/min.



Abbildung 8: Gekühlter Vorlagebehälter



Abbildung 9: Zulaufpumpen "heidolph" für Nährstoff und Wasser

5.4 Fördermengenmessung

Die Fördermenge wurde dreimal wöchentlich gemessen und ggf. durch Einstellung der Pumpen korrigiert. Über den Zeitraum von einer Minute wurde dazu der Volumenstrom Nährstoffzulauf (Q_{Feed}) und der Wasserzulauf (Q_{Water}) aufgefangen. Da es sich um geringe Volumenströme handelte, wurde die Messung mithilfe einer Waage in Gramm vorgenommen und anschließend näherungsweise mit der Dichte von Wasser (1 g/m^3) in ml pro Minute umgerechnet.

Die Kalibrierung der Heidolphpumpen wurde nach der Betriebsanleitung des Herstellers durchgeführt (siehe Anhang D). Dabei musste der gemessene Wert im Kalibriermodus eingegeben werden. Durch langes Drücken der Kalibrierungstaste (CAL), hat die Pumpe die Differenz zum eingestellten Fördervolumenstrom errechnet und automatisch korrigiert (Heidolph, Feb. 2017). Dieses Vorgehen musste ggf. öfter wiederholt werden, bis die Fördermenge maximal $\pm 5\%$ vom Sollwert abwich. Hierbei musste die Abweichung des Nährstoff- und Wasserzulaufs dasselbe Vorzeichen haben, um große Abweichungen der Zulaufkonzentration zu vermeiden.

5.5 Abbauverhalten des gekühlten Vorlagebehälters

Um das Abbauverhalten im gekühlten Vorlagebehälter näher zu charakterisieren, wurden mehrere Messungen der CSB-Vorlagenkonzentration über 96 Stunden vorgenommen. Dabei wurde am Tag 0 des frisch angesetzten synthetischen Abwassers, am Tag 1, am Tag 2 und am Tag 3 nach 96 Stunden jeweils eine Probe von 4 ml aus dem Vorlagebehälter mithilfe einer Pipette gezogen und eine Doppelbestimmung nach Kapitel 4.1.4.6 durchgeführt. Da die CSB-Vorlagenkonzentration 1875 mg/l betrug und der Messbereich der verwendeten Tester im Bereich von $15\text{-}160 \text{ mg/l}$ liegt (vgl. Kapitel 5.2), wurden die Proben 25-fach mit demineralisiertem Wasser auf 100 ml verdünnt. Das Ergebnis dieser Messung kann dem Kapitel 6.2 entnommen werden.

5.6 CSB-Fraktionierung des synthetischen Abwassers

Um den gelösten und partikulären Anteil des Ansatzes im Vorlagebehälter zu bestimmen, wurden die Proben (jeweils 45 ml) in den gleichen Abständen wie in Kapitel 5.5 aus dem Vorlagebehälter entnommen. Anschließend wurden 4 ml der Probe 25-fach mit demineralisiertem Wasser auf 100 ml verdünnt und im Kühlschrank aufbewahrt (4°C).

Die 4 ml Probe enthält den gesamten CSB Anteil. Die restlichen 41 ml wurden mit dem Filtermaterial aus Kapitel 4.1.5 mit einer Vakuumpumpe und dem Filtrationsgefäß filtriert (siehe Abbildung 10). Die Filtration musste in einem anderen Labor durchgeführt werden, wobei für den Probentransport „Centrifuge tubes“ vom Hersteller Roth (REF N458.1) genutzt wurden. Anschließend wurden 4 ml des Filtrats 25-fach mit demineralisiertem Wasser auf 100 ml verdünnt.

Diese 4 ml Probe enthält den gelösten Anteil der CSB-Fraktion. Für beide vorbereiteten Proben wurde eine Doppelbestimmung der CSB-Konzentration nach Kapitel 5.2 durchgeführt. Bis zur Durchführung der photometrischen Messung sind zwischen der ersten Probenvorbereitung (gesamter CSB) und der zweiten Probenvorbereitung (gelöster Anteil) zwischen 20 und 30 Minuten vergangen. Nach Herstellerangaben sollen die Proben in einem Zeitraum von 1-2 Stunden dem Tester zugeführt werden, um Abbauprozesse zu vermeiden (MACHEREY-NAGEL, 2017).



1. Probenraum
2. Filterbett mit Dichtring
3. Unterdruckanschluss für Vakuumpumpe
4. Schottflasche zum Auffangen des Filtrats

Abbildung 10: Versuchsaufbau des Filtrationsgefäßes
(eigene Darstellung)

5.7 Anlagen Endzustand

Während des gesamten Projektes wurde ein Betriebsführungsplan erarbeitet und die Aufgaben auf monatliche, wöchentliche und tägliche Intervalle verteilt. In Tabelle 12 sind Teile der täglichen und wöchentlichen Aufgaben zusammengefasst.

Zu den täglichen Aufgaben zählt auch die

- Sichtprüfung der Anlage,
- PH-Wert Messung,
- Temperatur Messung,
- O_2 -Messung,
- Eisendosierung,
- Sulfamethoxazoldosierung,
- Ablagerungen an den Beckeninnenwänden lösen / abspülen,
- Schlammabzugsmenge kontrollieren
- TS-Messung (TS_{BB} , TS_{RS} und $TS_{Üsd}$)

Tabelle 12: Wöchentliche Aufgaben der Betriebsführung

| Montag | Dienstag | Mittwoch | Donnerstag | Freitag |
|---|-----------------------------|---|--|---|
| OECD-Medium ansetzen Vorlagebehälter reinigen und auffüllen | Photometrische Messungen | OECD-Medium ansetzen Vorlagebehälter reinigen und auffüllen | O_2 -Sonden überprüfen ggf. kalibrieren Photometer kalibrieren (alle 14 Tage) | OECD-Medium ansetzen Vorlagebehälter reini- gen und auffüllen |
| Wassertanks reinigen und befüllen (60L) | | Feed-Schläuche durchspü- len „Ablagerungen entfer- nen“ | | Feed-Schläuche erneu- ern (P2 und P3) |
| Feed-Schläuche durchspü- len „Ablagerungen entfer- nen“ | | Fördermengenmessung ggf. kalibrieren | | Fördermengenmessung ggf. kalibrieren |
| Fördermengenmessung ggf. kalibrieren | | | | Photometrische Mes- sung |
| | | | | |

Die monatlichen Aufgaben beziehen sich auf die Wechselintervalle der Pumpen- und Zulaufschläuche der Schlammrückführung P1 und P4 und des Zulaufschlauche P5 und P6 (vgl. Kapitel 6.8, Abbildung 25).

5.8 SPE-Festphasenextraktion

Die Durchführung der SPE wurde nach der Arbeitsanweisung in Tabelle 13 ausgeführt. Der Versuchsaufbau kann aus Abbildung 11 entnommen werden.



1. Glasrog f. zwölf SPE-Kartuschen
2. Vakuumanzeige u. Regeleinheit
3. SPE-Kartuschen (Säulen)
4. Probengefäße
5. PTFE-Schläuche
6. Filtrat Auffangbehälter

Abbildung 11: Versuchsaufbau der Festphasenextraktion

Die SPE wurde im Verfahrenstechniklabor aus Sicherheitsgründen unter einem Abzug durchgeführt, da mit Trichlormethan/Chloroform gearbeitet wurde.

Tabelle 13: Arbeitsanweisung zur Durchführung der Festphasenextraktion (Heseding, 2017)

| Nr. | Beschreibung |
|----------|--|
| 1 | Probenvorbereitung Filtration von 500 ml Probe über einen Faltenfilter (z.B. Typ 113P Cellulose). Filtrat auffangen. Nachspülen mit 5 bis 10 ml Reinstwasser (z.B. „Millipore Wasser“). |
| 2 | Konditionierung der SPE Abfallgefäß in die SPE-Kammer stellen. Konditionierung der Kartuschen mit ca. 6 ml MeOH. (2 x MeOH bis zum „X“ vorlegen.) Jede Kartusche kann nur einmalig verwendet werden. |
| 3 | Waschschritt Vakuumsystem belüften. Abfallgefäß aus der SPE-Kammer entnehmen. Waschen der Kartusche mit ca. 6 ml Reinstwasser. (2 x Wasser bis zum „X“ vorlegen.) |

| | |
|-----------|--|
| 4 | Starten der SPE |
| | Reinstwasser in den Kartuschen vorlegen. Schlauchverbindungen (Proben und SPE) anschließen. Startvolumen der Proben markieren. Kartuschen beschriften. Vakuum einstellen. Einstellung der Tropfgeschwindigkeit. (→Anreicherungs geschwindigkeit soll bei ca. 7 ml / Min. liegen.) Ggf. Vakuum im Laufe der SPE nachregulieren. Startzeitpunkt notieren. |
| 5 | Beenden der SPE / Waschschrift |
| | Endzeitpunkt notieren. Schlauchverbindungen entfernen. Waschen der Kartusche mit ca. 5 ml Reinstwasser. Ca. 5 Min trocknen. Ggf. Kartusche markieren. |
| 6 | Elution |
| | Herstellung des Elutionsmittel MeOH / Chloroform (50:50) Vakuumsystem belüften. 10 ml SPE-Vial beschriften. SPE-Vial in SPE-Kammer stellen. Metallkapillare anschließen. Elution mit 5,0 ml MeOH / Chloroform (50:50). Bis zur Trocknung laufen lassen. |
| 7 | Reinigung des Systems |
| | Schlauchverbindungen in Wasser stellen. Anschluss der Schlauchverbindungen mit der Spülkartusche. Vakuum aufdrehen (Schritt für jede Schlauchverbindung wiederholen). |
| 8 | Reinigung der SPE-Kammer |
| | Alle Teflon Verbindungsstücke in MeOH legen. 2-3 Min im Ultraschallbad säubern. Nachreinigung mit MeOH. Gründlich mit Wasser nachspülen. Alle Metallteile in MeOH legen. 15 Min. Ultraschall. Schmutzreste werden mechanisch mit EtOH entfernt. Weiteres Mal mit MeOH spülen. Gründlich mit Wasser nachspülen. |
| 9 | Eindampfen |
| | Proben mit Stickstoff bis zur Trocknung einengen. |
| 10 | Aufnahme der eingengten Proben |
| | Aufnahme in 250 µL ACN und 250 µL gereinigtes Wasser. |
| 11 | Vortexen / „Wobblern“ |
| | Die angelösten Proben mit dem Vortexer vorsichtig lösen. (Bei leichter Rücklösung innerhalb von ca. 5 – 10 sec. möglich.) |
| 12 | Überführen in LCMS Vials |
| | Überführung der Proben in 1,5 ml braunglas-Vials. |
| 13 | Lagerung der Proben bis zur Analyse |

5.9 Vorversuch zum Umfang von Abbauvorgängen in bereitgestellten Sammelproben unter verschiedenen Randbedingungen

Für die Vorversuche zur Charakterisierung von Abbauvorgängen des gereinigten Abwassers wurden vier Versuche durchgeführt. Bei den Versuchen wurde das Abwasser über die Zeit von 96 Stunden bei 4°C (Kühlschrank) und 25°C (temperiertes Wasserbad) gelagert. Es wurden in den Abständen t_{0h} (Start des Versuches), t_{48h} (nach 48 Stunden) und t_{96h} (Ende des Versuches) die Wasserparameter Ammonium, Nitrit, Nitrat, Alkalinität, CSB, Phosphat, pH, Temperatur und Sauerstoffgehalt gemessen. Für die photometrische Messung wurden die Verdünnungen aus Kapitel 5.2 verwendet. Versuch 1 (4°C) und 2 (25°C) wurden mit einer SMX-Konzentration von 500 ng/l angesetzt (vgl. Kapitel 1.1.4). Die Versuche 3 (4°C) und 4 (25°C) wurden ohne SMX angesetzt. Für alle Versuche wurden jeweils 550 ml im Probengefäß (vgl. Abbildung 11) aus einer Mischprobe von LKA 1 und 2 angesetzt. Die SMX Konzentration für die Versuche 1 und 2 wurde mit einer Stammlösung (50 mg/l) angesetzt. Um die SMX-Konzentration von 500 ng/l zu erhalten wurden vier Liter des gereinigten Abwassers mit 40 µl der Stammlösung vermischt. Von den vier Litern wurden 250 ml für die Bestimmung der Wasserparameter und jeweils sechsmal 550 ml für die Versuche 1 und 2 genutzt. Bei den Versuchen 3 und 4 wurde genauso vorgegangen, nur dass kein SMX den vier Litern zugefügt wurden. Die Versuche wurden in einem Abstand von fünf Stunden gestartet, damit genügend Zeit für die Messungen der Wasserparameter gegeben war (vgl. Kapitel 6.9). Die Proben wurden bis zur Probenvorbereitung mittels SPE (siehe Kapitel 4.1.6) eingefroren.

5.10 Sulfamethoxazol Dosierung

Die SMX Dosierung erfolgte als Tagesfracht mithilfe einer Pipette direkt in das Denitrifikationsbecken nur in LKA 2 der beiden LKA. Die Tagesfracht ergibt sich aus der Tageszulaufmenge von 9 l/d und der Zulaufkonzentration von 500 ng/l. Täglich wurden morgens 90 µl aus der Stammlösung (50 mg/l) pipettiert. Für die Sulfamethoxazoldosierung wurde eine Zulaufkonzentration von 500 ng/l gewählt, weil eine Kalibriergerade für diese Konzentration ausgelegt wurde. Außerdem sollte zu Beginn der Sulfamethoxazoldosierung nicht zu hohe Werte gewählt werden, um eventuelle Verschlechterungen des Betriebes der LKA 2 zu vermeiden (vgl. Kapitle 1.1.4). Durch die Lagerung der Stammlösung im Kühlschrank musste vor Entnahme der Tagesdosis das Gefäß Raumtemperatur angenommen haben. Dadurch sollten Kondensationsvorgänge im Gefäß und somit eine eventuelle Verdünnung der Stammlösung vermieden werden. Die Eliminationsrate sollte durch Probennahme des Ablaufs am Montag, Mittwoch und Freitag erfasst werden. Bei der Probennahme wurde der Ablauf mit dem Faltenfilter Typ 113P Cellulose filtriert, um eventuelle Schwebstoffe zu entfernen. Die Proben wurden bis zur Probenvorbereitung mittels SPE (siehe Kapitel 4.1.6) eingefroren.

6 Ergebnisse

In diesem Kapitel werden die wesentlichen Betriebserfahrungen und Schlussfolgerungen des Einfahrbetriebs der Laborkläranlagen zusammengefasst. Ein Teil der Auswertungen in dieser Arbeit bezieht sich auf Untersuchungen und Anlageneinstellungen, die bereits im Vorwege im 1. Halbjahr 2017 getestet, aber erst im Rahmen dieser Bachelorarbeit aufbereitet sowie abschließend ausgewertet und beurteilt wurden.

6.1 Auswertung der Fördermengenstabilität

Die Fördermenge wurde alle drei bis vier Tage gemessen und ggf. neu kalibriert. Die Pumpen P2 für den Nährstoff mussten im untersten Förderbereich der Pumpe für eine Zulaufmenge von 2 ml/min genutzt werden. Je nach Schlauchinnendurchmesser (ID) variiert dieser. Damit die Ablagerungen die Pumpenschläuche nicht verstopfen, musste ein Schlauchinnendurchmesser von 1,7 mm gewählt werden. Der Förderbereich für einen Schlauch mit einem ID von 1,7 mm liegt zwischen 2,0 ml/min und 40 ml/min (Heidolph, Feb. 2017).

Es wurden zum einen die Abweichungen zum Sollwert durch den Betrieb im unteren Bereich der Fördermenge und zum anderen die Abnutzung des Schlauches hervorgerufen. In der Abbildung 12 ist die Fördermenge Q_{Feed} erfasst worden. Vom 76 bis 89 Versuchstag liegt die Abweichung zum Sollwert bei ca. 5%. Ab dem 94 Versuchstag konnte festgestellt werden, dass die Abweichung zum Sollwert stetig größer wurde und die Kalibrierung der Fördermenge schwieriger. Es hat sich gezeigt, dass ein Wechseln der Pumpenschläuche ca. alle drei Wochen notwendig ist und nur so eine Fördermenge ohne große Schwankungen eingestellt werden kann. Nach dem Schlauchwechsel am Versuchstag 104 ist zu beobachten, dass sich die Abweichungen wieder im Bereich von ca. 5% einpendeln bzw. einstellen. Bei LKA 2 kam es am Versuchstag 111 zu großen Abweichungen der Fördermenge, welche durch eine Verstellung der Klemmkraft⁷ des Pumpenkopfes hervorgerufen wurde. Eine Verstellung/Einstellung der Klemmkraft des Pumpkopfes muss selten vorgenommen werden.

⁷ Kraft die benötigt wird um eine Fixierung des Pumpenschlauches im Pumpenkopf zu gewährleisten.

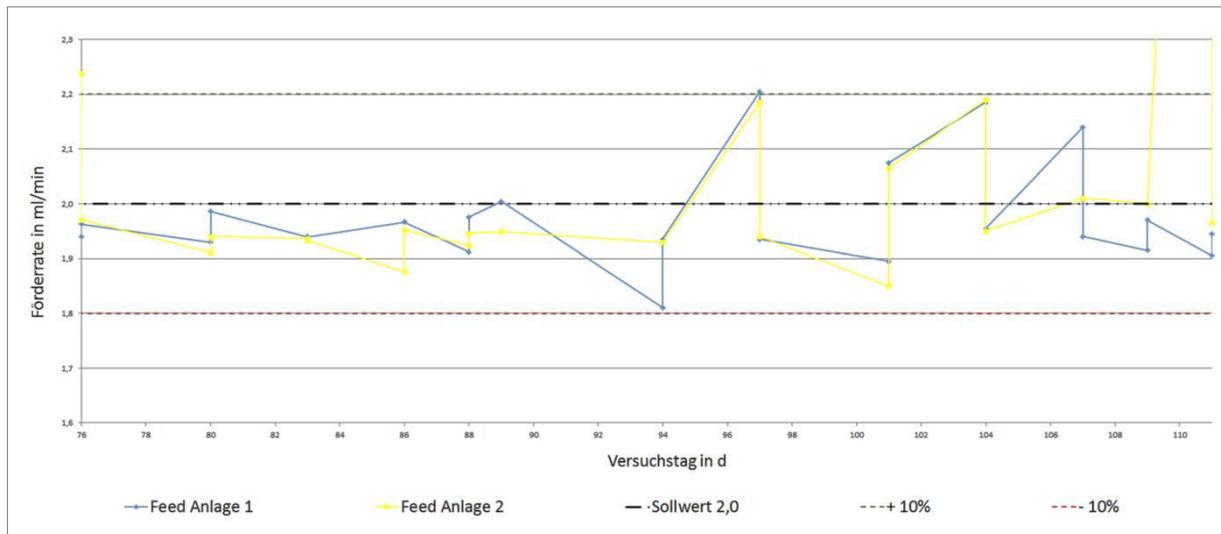


Abbildung 12: Fördermengen- und Kalibrierungsüberprüfungen des Nährstoffzulaufes (pro Tag ist der gemessene Istwert und der eventuell kalibrierte Wert eingetragen)

In Abbildung 13 ist die Fördermenge der Pumpe P3 vom Wasser (Q_{Water}) erfasst worden. Auch hier kann in etwa eine Abweichung bis ca. 5% beobachtet werden. Jedoch ist die Fördermenge mit 10,5

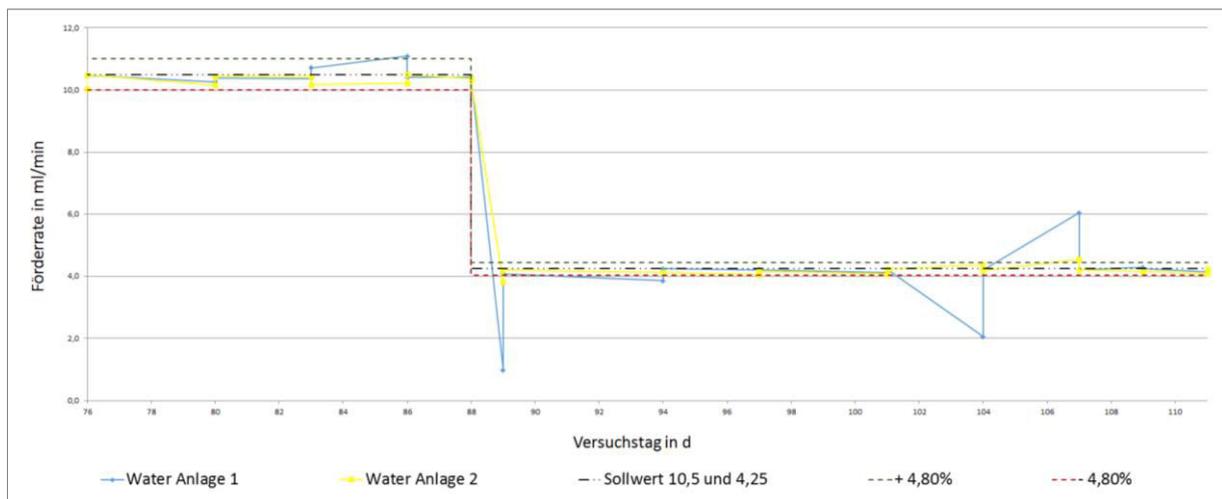


Abbildung 13: Fördermengen- und Kalibrierungsüberprüfungen des Wasserzulaufes (pro Tag ist der gemessene Istwert und der eventuell kalibrierte Wert eingetragen)

ml/min und 4,25 ml/min noch etwas weiter vom unteren Grenzwert des Förderbereiches entfernt, wodurch sich die Pumpe P3 leichter kalibrieren lässt als die Pumpe P2. Vom Versuchstag 76 bis 88 ist nahezu dasselbe Verhalten wie bei der Pumpe P2 zu beobachten. Am Versuchstag 89 wurde die Fördermenge der Pumpe P3 auf 4,25 ml/min reduziert (vgl. Kapitel 6.4). Am Versuchstag 104 wurde ebenfalls der Pumpenschlauch gewechselt, daher ergibt sich bei LKA 1 vor und nach dem Wechsel eine größere Abweichung bis sich die Fördermenge wieder einpendelt.

Abschließend konnte festgestellt werden, dass mit einem Schlauchwechselintervall von max. drei Wochen und einer Kalibrierung der Pumpen am Montag, Mittwoch und Freitag sich eine im Mittel konstante Fördermenge mit einer maximalen Abweichung von $\pm 5\%$ einstellen lässt. Bei der Kalibrierung muss beachtet werden, dass die Fördermengenabweichungen von P2 und P3 dasselbe Vorzeichen besitzen, damit die CSB-Zulaufkonzentration im Mittel auf den gewünschten Sollwert eingestellt werden kann.

6.2 Einfluss der Ablagerungen im Nährstoffzulaufschlauch

Wie in Kapitel 3.1.3 beschrieben wurde, konnten Ablagerungen im Nährstoffschlauch beobachtet werden. Es ist davon auszugehen, dass diese durch Abbauprozesse und durch das Ablagern von ungelösten Partikeln hervorgerufen wurden. In der DIN EN ISO 11733:2004 (D) wird darauf hingewiesen, die Schläuche täglich mit z.B. Ethanol zu spülen, um genau diese Abbauprozesse zu verhindern.

In Tabelle 14 wird der Einfluss der Ablagerungen auf die CSB-Zulaufkonzentration dargestellt. Ein direkter Zusammenhang zwischen einer zu niedrigen Zulaufkonzentration und einem nicht gespülten Schlauch konnte festgestellt werden.

An den Tagen, an denen die Schlauchspülung mindestens einen Tag zurücklag (blau markierte Zeilen), kann beobachtet werden, dass die Zulaufkonzentration in allen Fällen - bis auf den 24.04.2017 - geringer als 300 mgCSB/l ist. An den Tagen, an denen der Schlauch unmittelbar am Tag der CSB-Zulaufkonzentrationsmessung gereinigt wurde, wird in allen Fällen - bis auf den 21.04.2017 und den 31.03.2017 (Zulauf 1) - die Zulaufkonzentration von 300 mgCSB/l erreicht bzw. leicht überschritten.

Tabelle 14: Einfluss der Schlauchablagerungen auf die CSB-Zulaufkonzentration

| letzte Spülung der Schläuche | Tage | Datum Probennahme | C _{CSB,ZB} in mg/l | |
|------------------------------|------|-------------------|-----------------------------|----------|
| | | | Zulauf 1 | Zulauf 2 |
| 27.02.2017 | 1 | 28.02.2017 | 268 | 270 |
| 03.03.2017 | 0 | 03.03.2017 | 300 | 300 |
| 03.03.2017 | 4 | 07.03.2017 | 256 | 230 |
| 10.03.2017 | 0 | 10.03.2017 | 308 | 304 |
| 13.03.2017 | 1 | 14.03.2017 | 284 | 264 |
| 17.03.2017 | 0 | 17.03.2017 | 300 | 296 |
| 20.03.2017 | 1 | 21.03.2017 | 208 | 202 |
| 20.03.2017 | 4 | 24.03.2017 | 158 | 154 |
| 27.03.2017 | 1 | 28.03.2017 | 246 | 274 |
| 31.03.2017 | 0 | 31.03.2017 | 278 | 310 |
| 03.04.2017 | 1 | 04.04.2017 | 256 | 250 |
| 10.04.2017 | 1 | 11.04.2017 | 246 | 124 |
| 13.04.2017 | 0 | 13.04.2017 | 306 | 310 |
| 18.04.2017 | 1 | 19.04.2017 | 266 | 268 |
| 21.04.2017 | 0 | 21.04.2017 | 260 | 274 |
| 24.04.2017 | 1 | 25.04.2017 | 302 | 316 |

Um im Wochenmittel eine konstante Zulaufkonzentration zu erhalten, müssen die Schläuche täglich gespült und einmal wöchentlich erneuert werden. Diese Spülung wird mit der Feed-Lösung selbst durchgeführt, um zusätzliche Kosten für die Beschaffung und Entsorgung von Ethanol zu vermeiden. Bei der Spülung wird die Fördermenge maximal erhöht und bis zu 100 ml wurden aufgefangen. Der gespülte Anteil wird verworfen und nicht der Anlage zugeführt. Der Spülvorgang dauert ca. 1 Minute und wurde bei der Berechnung der Tagesfracht vernachlässigt. Bevor die Schläuche täglich gespült und wöchentlich gewechselt wurden, ergab sich eine mittlere Zulaufkonzentration der beiden Zuläufe von ca. 280 mgCSB/l \pm 3,5 mgCSB/l.

Die in der Tabelle 14 und 15 rot markierten Zellen bzw. Messwerte wurden in der Berechnung nicht erfasst, da an diesen Tagen die Fördermenge der Pumpen nicht korrekt eingestellt war oder die Fördermenge durch Luftblasen im Zulaufschlauch verringert wurde. Nach Änderung der Betriebsführung (vgl. Kapitel 6.4 und 6.8) konnte die Zulaufkonzentration im Mittel auf ca. 592,25 mgCSB/l \pm 6,54 mgCSB/l eingestellt werden.

Vor der Umstellung wurde eine mittlere Abweichung von ca. 6,67% \pm 1,25% gemessen nach der Umstellung eine mittlere Abweichung von ca. 1,29% \pm 1,10% (vgl. Tabelle 14 und Tabelle 15).

Tabelle 15: Zulaufkonzentrationen nach Änderung der Betriebsführung

| Datum Probennahme | C _{CSB,ZB} in mg/l | |
|-------------------|-----------------------------|------------|
| | Zulauf 1 | Zulauf 2 |
| 28.04.2017* | 552 | 552 |
| 02.05.2017* | 604 | 600 |
| 05.05.2017* | 636 | 612 |
| 09.05.2017* | 528 | 600 |
| 16.05.2017 | 436 | 484 |
| 19.05.2017 | 612 | 616 |
| 23.05.2017 | 564 | 560 |
| 26.05.2017 | 604 | 612 |
| 30.05.2017 | 644 | 580 |

*Erst am 12.05.2017 erfolgte eine Änderung der Zulaufkonzentration auf 600 mgCSB/l (siehe 6.8 und 6.4). Die Messwerte vom 28.04 bis 09.05.2017 wurden mit dem Faktor zwei multipliziert um eine Mittelung der Werte zu ermöglichen.

Durch die leichte Schwankung um den Sollwert kann nur eine konstante Zulaufkonzentration im Wochenmittel erreicht werden (vgl. Abbildung 14). Es ist zu erkennen, dass die gemessene Konzentration eher niedriger ausfällt als die Sollkonzentration. Dies kann durch die Ergebnisse im nachfolgenden Kapitel 6.3 beschriebener Ergebnisse verringert werden.

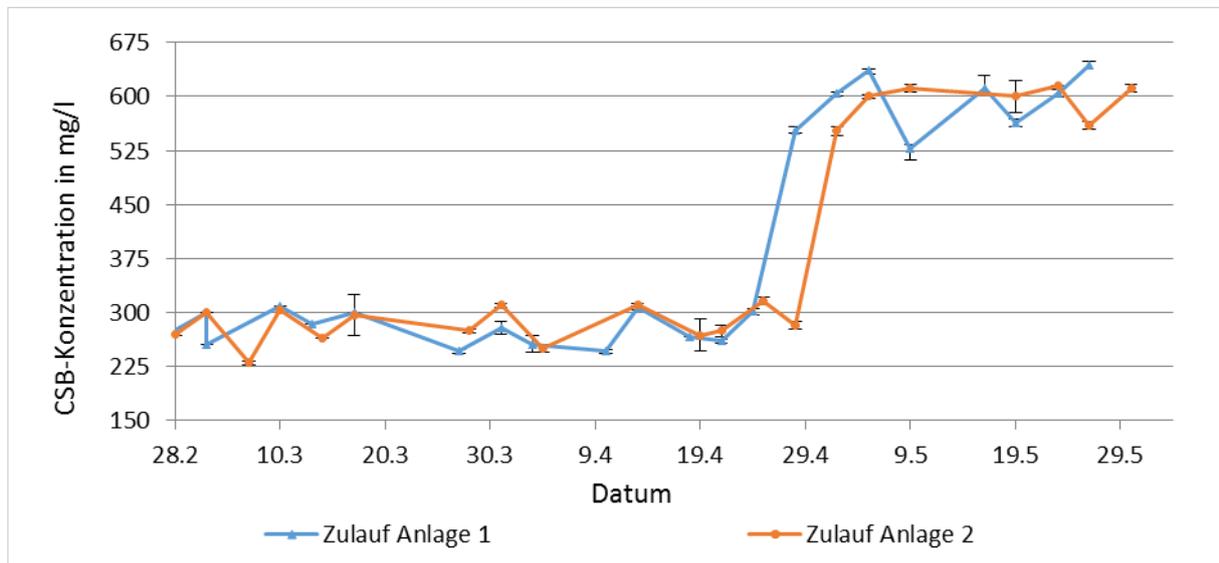


Abbildung 14: $C_{CSB,ZB}$ vor und nach der Umstellung des Zulaufvolumenstromes

6.3 Abbauverhalten des gekühlten Vorlagebehälters

Nach DIN EN ISO 11733:2004 (D) soll die gemeinsame Ansetzung der organischen und anorganischen Substanzen des OECD-Mediums Abbauprozesse begünstigen. Die mittlere gemessene Abweichung der Zulaufkonzentration aus Kapitel 6.2 dürfte nach Änderung der Betriebsführung nicht mehr durch die Zulaufschläuche verursacht werden.

Aus diesen Gründen sollte das Abbauverhalten im Vorlagebehälter ermittelt werden. Dafür wurde die CSB-Konzentration im Vorlagebehälter über die Zeit gemessen. In Abbildung 15 ist eine Mittelung aller Messwerte aus Anhang E mit den Standardabweichungen dargestellt.

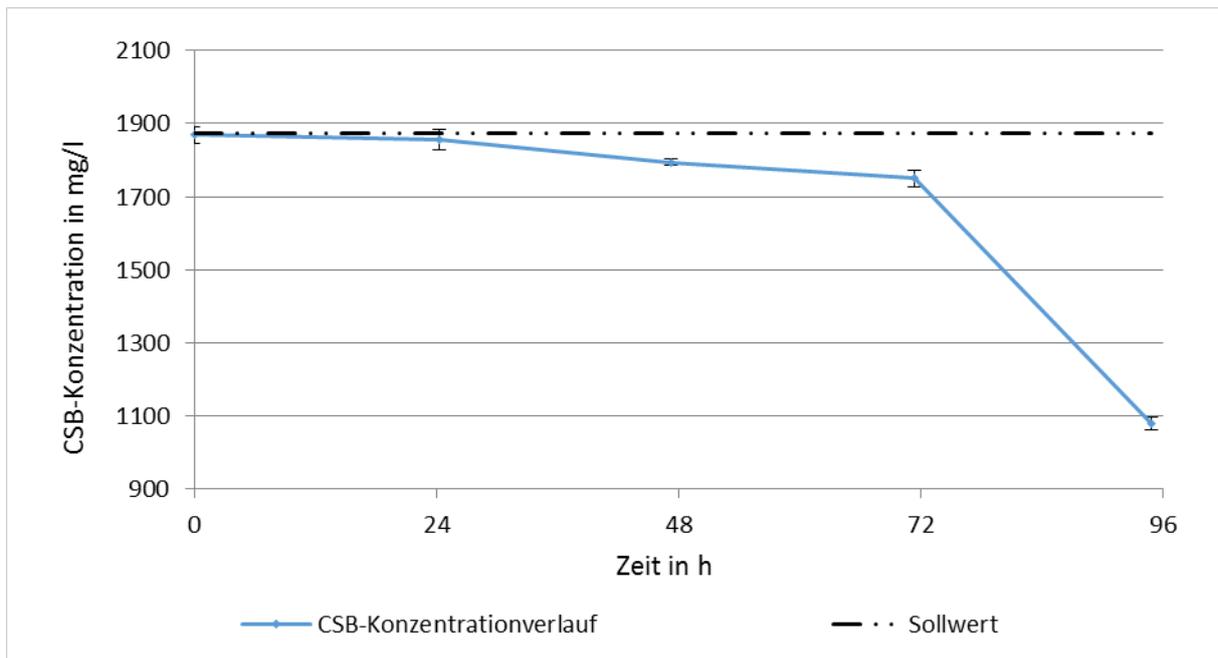


Abbildung 15: Charakterisierung des Abbauverhaltens der CSB-Konzentration im Vorlagebehälter des OECD-Mediums bei 4°C über 96 Stunden

Die CSB-Konzentration nimmt in den ersten 24 Stunden nur leicht und anschließend über die nächsten 48 Stunden stärker ab. Nach 72 Stunden konnte ein starkes Abbauverhalten im Vorlagebehälter festgestellt werden. Die Konzentration im Vorlagebehälter nimmt nach 24 Stunden im Mittel um ca. 1%, nach 48 Stunden um ca. 4,3%, nach 72 Stunden um ca. 6,7% und nach 96 Stunden um ca. 42,4% ab. Der Vorlagebehälter muss die Anlagen mindestens drei Tage mit Nährstoff versorgen können, daher reicht es die ersten 72 Stunden des Abbauverhaltens zu betrachten (vgl. Abbildung 16). In diesem Bereich kann man über eine Näherung mit dem Polynom $y = -0,0139x^2 - 0,7743x + 1872,3$ das Abbauverhalten beschreiben.

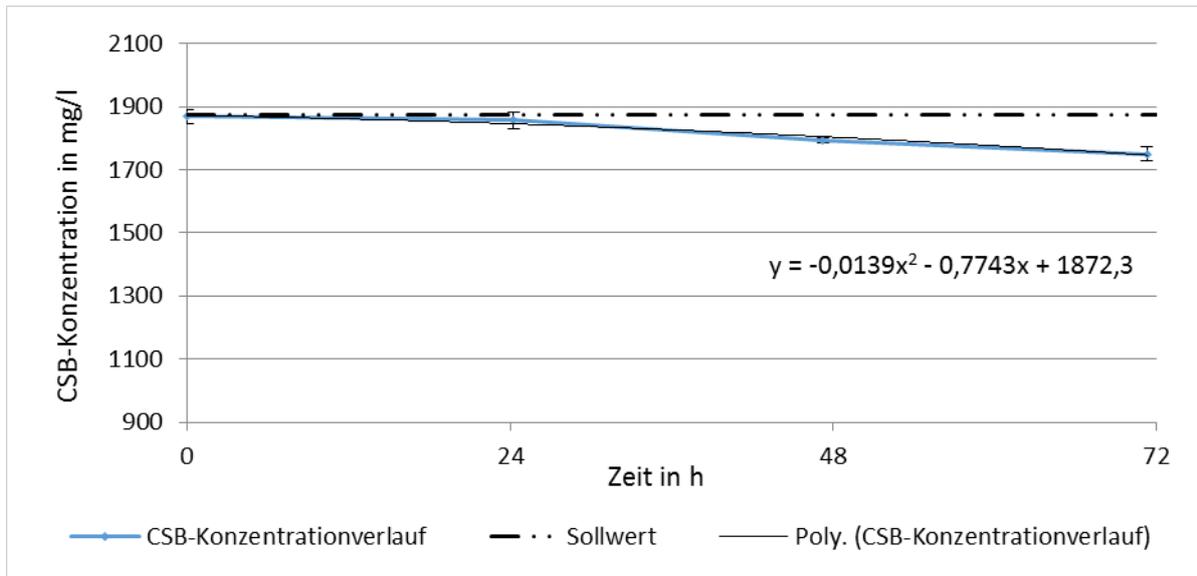


Abbildung 16: Charakterisierung des Abbauverhaltens der CSB-Konzentration im Vorlagebehälter des OECD-Mediums bei 4°C über 72 Stunden

Mit diesem Polynom und der Gleichung 3-5 lässt sich die mittlere Wochenfracht für den Zulauf abschätzen. Bei dieser Betrachtung werden die Verluste aus Kapitel 6.2 im Schlauch mit Null angenommen und die eventuellen Schwankungen der Fördermenge vernachlässigt. Der Vorlagebehälter wurde montags, mittwochs und freitags neu angesetzt (vgl. Kapitel 6.8). Die Soll-Wochen-Zulauffracht lässt sich aus der täglichen Nährstoffzulaufmenge ($Q_{ZB,Feed}$ von 2,88 l/d und der CSB-Zulaufkonzentration im Vorlagebehälter von 1875 mg/l berechnen. Daraus ergibt sich eine tägliche Soll-Zulauffracht von 5400 mgCSB/l, somit beträgt die wöchentliche Soll-Zulauffracht 37800 mgCSB/l.

Über die Näherungsgleichung $y(x)$ lassen sich die Verlustfrachten für die Zeiträume Montag bis Mittwoch, Mittwoch bis Freitag und Freitag bis Montag berechnen. Mit der Annahme, dass das korrekte Verhältnis der Zulaufvolumenströme konstant bleibt, ergibt die Summe dieser Frachten näherungsweise die Ist-Wochenzulauffracht. Mit der Abweichung der Ist-Wochenfracht und der mittleren Standardabweichung von 1,10% kann die mittlere CSB-Zulaufkonzentration pro Woche ermittelt werden. Die Werte können der Tabelle 16 entnommen werden.

Tabelle 16: Wochen Soll- und Ist-Frachten des Zulaufes

| Wechselintervalle | IST-Fracht in mg/d | Soll-Fracht in mg/d |
|---------------------|--------------------|---------------------|
| Mo. - Mi. | 10627 | 10800 |
| Mi. - Fr. | 10627 | 10800 |
| Fr. - Mo. | 15744 | 16200 |
| Wochenfracht | 36998 ± 414 | 37800 |

Damit ergibt sich ein wöchentlicher Frachtverlust durch die Abbauprozesse im Vorlagebehälter von rund 2,12% ±1,1% bzw. 802 mgCSB/w ± 8,82 mgCSB/w. Umgerechnet entspricht das einer durchschnittlichen Zulaufkonzentration im Nährstoffzulauf von ca. 1835 mgCSB/l ± 20,20 mg/CSB/l. Damit lässt sich eine durchschnittliche CSB-Zulaufkonzentration von ca. 587 mg/l ± 6,5 mg/l berechnen.

Diese durchschnittliche Zulaufkonzentration entspricht somit fast der ermittelten Wochenzulaufkonzentration aus Kapitel 6.2 mit 592,5 mgCSB/l. Um die Abbauprozesse im Vorlagebehälter auszugleichen, müsste die Vorlagenbehälterkonzentration um rund 40 mgCSB/l auf 1915 mgCSB/l erhöht werden. Dadurch würde eine mittlere Wochenzulaufkraft von ca. 600 mgCSB/l erreicht werden.

6.4 Maßnahmen zur Blähschlammvermeidung nach DIN EN ISO 11733:2004 (D)

Die Untersuchungen zur Wirksamkeit von Maßnahmen zur Blähschlammvermeidung wurden im Vorfeld im Zeitraum vom 10.02 bis 12.05.2017 durchgeführt. Dabei wurden zum Teil zwei Maßnahmen gleichzeitig angewandt. Üblicherweise sollten die einzelnen Maßnahmen nacheinander durchgeführt werden, um eine genaue Beurteilung bzw. Zuweisung deren Wirkungen treffen zu können. Die zeitliche Abfolge der verschiedenen Maßnahmen ist in Tabelle 17 aufgeführt und wird nachfolgend erklärt(vgl. Kapitel 3.1.3).

Tabelle 17: Zeitliche Abfolge der Maßnahmen zur Blähschlammvermeidung

| Nr. | Beginn | Ende | Maßnahme |
|-----------|------------|-------------------------------|---|
| <u>a.</u> | 19.01.2017 | 10.02.107 (Inbetriebnahme) | Aufbau der Pumpen und der gekühlten Vorlage |
| <u>b.</u> | 14.02.2017 | Beibehalten | Phosphatelimination mit Eisen-III-Chlorid-Lösung |
| <u>c.</u> | 13.03.2017 | 10.04.2017 | Zugabe von Spurenelementen |
| <u>d.</u> | 15.03.2017 | Beibehalten | Verkleidung der Becken mit Alu-Folie gegen UV-Strahlung |
| <u>e.</u> | 04.04.2017 | Beibehalten | Diskontinuierliche Rührung des Belebungsbeckens der Nitrifikation |
| <u>f.</u> | 10.04.2017 | Einmalig | Schlammwechsel mit frischem Schlamm aus der KA Ahrensburg |
| <u>g.</u> | 13.04.2017 | Beibehalten | O ₂ -Regelung auf 1,6 - 1,7 ppm verringert |
| <u>h.</u> | 01.05.2017 | 04.05.2017 | Rührer in der Nachklärung in Betrieb genommen |
| <u>i.</u> | 09.05.2017 | Beibehalten | Kontinuierlicher Schlammabzug |
| <u>j.</u> | 12.05.2017 | Beibehalten | Zulaufvolumenstrom auf 6,25 ml/min halbiert |

a. Die starken Schwankungen der Zulaufkonzentration von bis zur mehr als 50% aus der vorangegangenen Bachelorarbeit (Scharff, 2017) und der Ableitung aus den gemessenen Werte aus Kapitel 6.3, konnten durch die Umbaumaßnahmen des Vorlagebehälters und der Anpassung der Wechselintervalle (vgl. Kapitel 5.7) verringert werden. Um eine konstante Zulaufkonzentration zu erreichen, müssen die Fördermengen der Pumpen P2 und P3 nur geringe Abweichungen zum eingestellten Sollwert einhalten, da das Verhältnis der beiden Zuläufe die CSB-Zulaufkonzentration einstellt. Des Weiteren müssen die Abbauprozesse vor Zuführung in die Anlage so gering wie möglich gehalten werden, dafür ist eine Kühlung für den Vorlagebehälter auf 4 °C vorgesehen. Durch diese Maßnahmen konnte eine im Mittel konstante Zulaufkonzentration erzielt werden (vgl. Kapitle 5.3, 5.4 und 5.5) und ein besseres Schlammwachstum erreicht werden (vgl. Kapitel 6.6).

b. Durch eine konstante Fällung mit Eisen-III-Chlorid wurde zum einen der Phosphatgehalt im Ablauf auf einen praxisnahen Wert eingestellt und zum anderen das Flockungs- bzw. Absetzverhalten des Schlammes verbessert. Durch die tägliche Eisendosierung konnte ein besseres Absetzverhalten und eine geringer Phosphatgehalt im Ablauf erreicht werden (siehe Kapitel 6.6).

c. Die Zusammensetzung der Spurenelemente ist in Kapitel 3.3.1/Tabelle 8 aufgeführt. Diese wurden dem OECD-Medium beim Ansatz der Vorlage beigemischt. Durch die Spurenelemente erhielten die Mikroorganismen eine „ausgewogene“ Nährstoffzusammensetzung, wodurch die Bildung von fadenförmigen Schlammflocken vermindert werden sollte. Eine Bildung von fadenförmigen Schlammflocken begünstigt das Aufschwimmen durch Gasblasen, die an diesen Strukturen leichter anhaften können.

Im Zeitraum der Zugabe von Spurenelementen konnte eine Veränderung der Schlammfarbe und der Geruchsbildung im Belebungsbecken festgestellt werden. Zusätzlich begünstigten die Spurenelemente die Ablagerungsbildung in den Zulaufschläuchen und färbten diese schwarz (siehe Abbildung 17.). Zum Teil waren diese Ablagerungen so stark, dass kaum noch Nährstoff fließen konnte. Zusätzlich bildeten sich weiße Schimmel-/Pilzsporen im Schlamm (vgl. Abbildung 18.) Eine Verbesserung des Absetzverhaltens oder einer Verringerung der Blähschlamm-Bildung konnte nicht festgestellt werden, deshalb wurden nach 4 Wochen auf die weitere Zugabe von Spurenelementen verzichtet.



Abbildung 18: Schimmel-/Pilzsporen im Überlaufschlamm (eigene Darstellung)



Abbildung 17: Schwarze Färbung der Nährstoffzulaufschläuche durch die Spurenelemente (eigene Darstellung)

d. Die Becken wurden wie in Abbildung 19 mit Aluminiumfolie vor der UV-Strahlung abgeschottet. Dadurch sollte die Algen- bzw. Biofilmbildung an der Beckeninnenwand verhindert werden. Nach Umsetzung konnte festgestellt werden, dass sich die Algen- bzw. Biofilme nicht mehr bildeten, diese aber in keinem Zusammenhang mit der Gasbildung in der NK standen und weiterhin Blähschlamm auftrat.



Abbildung 19: Abdeckung der Laborkläranlage mit Alu-Folie, mit Sichtfenstern in der Nachklärung (eigene Darstellung)

e. Die diskontinuierliche Rührung im Belebungsbecken der Nitrifikation (1 min an und 10 min aus) soll die Flockenbildung verbessern, da eine ausreichende Durchmischung durch die Belüftung vorhanden ist und durch den Rührerkopf eventuell die Schlammflocken zerschlagen werden könnten. Es konnte beobachtet werden, dass Schlammflocken etwas größer und dichter wurden. Jedoch wurde dadurch die Bildung von Blähschlamm weiterhin nicht verhindert.

f. Durch das tägliche Überlaufen des Schlammes aus den Anlagen kam es gerade an den Wochenenden dazu, dass der Schlamm 3 Tage ohne Belüftung in der Auffangwanne ruhte. In dieser Zeit wurden die Mikroorganismen im Schlamm nicht mit Sauerstoff versorgt und ein Teil der Mikroorganismen starb ab, weshalb frischer Schlamm mit vielen verschiedenen Mikroorganismen der KA-Ahrensburg aus der Kaskade verwendet werden musste. Nach dem Schlammwechsel konnte ein gutes Absetzverhalten in der Nachklärung beobachtet werden. Es kam zunächst zwei weitere Tage zu keinem Blähschlamm, jedoch weiterhin zur Gasbildung im Flockenfilter⁸ der Nachklärung. Nach drei Tagen kam es wieder zur Blähschlammbildung.

g. Im Nitrifikationsbecken sollte durch die Sauerstoffregelung die Sauerstoffkonzentration in einem Bereich von 1,5 bis 2 mg/l gehalten werden. Da die Sauerstoffregelung zwischen 2,0 und 2,6 mg/l eingestellt war, wurde die Regelung auf 1,6 und 1,7 mg/l verändert. So konnte sichergestellt werden, dass der Sauerstoffbereich durch die Trägheit der Sauerstoffsonden zwischen 1,5 und 2 mg/l pendelte. Durch diese Maßnahme konnte nur eine leichte Verringerung der Gasblasenbildung in der Nachklärung beobachtet werden, zur Blähschlammbildung kam es jedoch immer noch.

h. Durch eine sehr langsame Rührung, die das Absetzen des Schlammes in der Nachklärung nicht verhindert, sollten die Gasblasen vom Schlamm abgetrennt werden (siehe Abbildung 20). Im Vorfeld konnten mit der manuellen Rührung mit Hilfe eines Stabs die Gasblasen vom Schlamm getrennt werden. Dadurch konnte sich der Schlamm tagsüber gut absetzen, nur über Nacht und am Wochenende kam es dennoch zu Blähschlamm. Der Rührer wurde über das Wochenende in Anlage 2 getestet, führte jedoch nicht zum gewünschten Ergebnis. Der Schlamm wurde eher noch länger in der Nachklärung gehalten, was zu mehr Gasblasen führte.



Abbildung 20: Rührung in der Nachklärung mit einem Gleichstrommotor für sehr geringe Umdrehungen (eigene Darstellung)

⁸ Schlammssäule im unterem Bereich der Nachklärung, Eindickung des Schlammes vor dem Saugräumer (Schlammrückföhrpumpe)

i. Wie unter Punkt a beschrieben, konnte das Schlammwachstum erhöht werden, sodass erstmals zu viel Schlamm in der Anlage vorhanden war. Der Trockensubstanzgehalt soll auf einem Wert von 3,0 g/l gehalten werden, sodass ein täglicher Schlammabzug realisiert werden musste. Durch den Schlammabzug stellte sich eine Verbesserung des Absetzverhaltens ein und es kam zu geringeren Blähschlammüberläufen.

j. Über die gesamte Versuchszeit wurde täglich der Wasserzulauf der Anlagen mehrfach abgeschaltet um ein Absetzen des Schlammes in der Nachklärung zu erhalten. Es konnte ein direkter Zusammenhang mit der Zulaufmenge und dem Auftreten von Blähschlamm festgestellt werden. Außerdem kann es laut DIN EN ISO 11733:2004 (D) durch die Temperierung zu Turbulenzen an den Beckeninnenwänden kommen, die ein Absetzen des Schlammes verhindern bzw. stören. Durch ein zu großen Zulaufvolumenstrom und der Turbulenz durch die Temperierung könnte eine höhere Verweilzeit verursacht werden, wodurch der Schlammindeix vermutlich nicht mehr im optimalen Bereich von 100-150 l/kg lag (DWA, 2016). Das hätte zu folge, dass eine höhere Schlammbelastung, verursacht durch schlechteres Absetzverhalten, in der Nachklärung entstanden ist und die Flächenbeschickung⁹ der Nachklärung überschritten wurde. Durch zu große Verweilzeiten kann es zu Abbauprozessen in der Nachklärung kommen, die wiederum zu Gasblasenbildung führen können. Durch die Kombination aus einer zu großen Verweilzeit, einem Schlammindeix im nicht optimalen Bereich, der Gasblasenbildung und der daraus resultierenden Überschreitung der Flächenbeschickung wäre eine Blähschlamm Bildung sehr wahrscheinlich.

Nach Umstellung des Zulaufvolumenstromes von 12,5 ml/min ($Q_{\text{Feed}} = 6,25 \text{ ml/min}$ und $Q_{\text{Water}} = 6,25 \text{ ml/min}$) und einer CSB-Zulaufkonzentration von 300 mg/l auf 6,25 ml/min Zulaufvolumenstrom ($Q_{\text{Feed}} = 2 \text{ ml/min}$ und $Q_{\text{Water}} = 4,25 \text{ ml/min}$) und einer CSB-Zulaufkonzentration von 600 mg/l konnte nach dem Wochenende festgestellt werden, dass kein Schlamm übergelaufen war, sich jedoch eine große Schlammsäule in der Nachklärung befand. Die Halbierung des Zulaufvolumenstromes hat eine Verdoppelung der hydraulischen Verweilzeit auf ca. 22 h zufolge. Ab dem 12.05.2017 kam es über den restlichen Versuchszeitraum zu keiner Blähschlamm Bildung mehr.

⁹ Für vorwiegend vertikal durchströmte Nachklärbecken gilt bei Ausbildung eines geschlossenen Flockenfilters oder bei gut flockbarem belebtem Schlamm eine Flächenbeschickung von $< 650 \text{ l/(m}^2\cdot\text{h)}$ (DWA, 2016)

6.5 CSB-Fraktionierung des synthetischen Abwassers

Die gelösten und partikulären Anteile der CSB-Fraktion wurde wie im 5.6 für die Wechselintervalle des OECD-Mediums im Vorlagebehälter bestimmt. Die Konzentration im Vorlagebehälter lag bei 1875 mgCSB/l und die Ablaufkonzentrationen der LKA lagen im Mittel bei ca. 16 mgCSB/l. Bei der Bestimmung der Fraktionen im Ablauf konnte festgestellt werden, dass der verwendete Filter und die Probengefäße die gemessenen CSB-Konzentrationen erhöht. Es wurden bei der Messung des Ablaufes nach der Filtration mehr CSB gemessen als die gesamte CSB-Konzentration in der unfiltrierten Probe. In nachfolgenden Messungen konnte eine mittlere Zunahme der CSB-Konzentration durch die Filter in Kombination mit den Probengefäßen von 11 mgCSB/l \pm 0,28 mg/CSB/l festgestellt werden (vgl. Anhang F). Des Weiteren hat eine Rücksprache mit dem Hersteller ergeben, dass die Filter vor einer Benutzung vorsichtshalber gespült werden sollten. Daher wurden bei allen gemessenen Werten nach Filtration die angegebenen Werte rechnerisch korrigiert und um 11 mgCSB/l verringert.

Aus Tabelle 18 ergeben sich im Wochenmittel auf die CSB-Zulaufkonzentration bezogen ein partikulärer Anteil von 21,50% \pm 1,29% und ein gelöster Anteil von 79,50% \pm 1,29. Bei einer Zulaufkonzentration von 592 mgCSB/l erhält man ein $X_{CSB,ZB}$ von 127,17 mgCSB/l \pm 7,75 mgCSB/l und ein $S_{CSB,ZB}$ von 464,83 mgCSB/l \pm 13,45 mgCSB/l (vgl. Anhang F und Anhang F.1).

Tabelle 18: Wochenmittel der gelösten und partikulären Anteile der CSB-Fraktion im Zulauf

| Wechselintervalle | partikuläre Anteile in % | gelöste Anteile in % |
|-------------------|--------------------------|----------------------|
| Mo.-Mi. | 18,91 | 81,09 |
| Mi.-Fr. | 18,91 | 81,09 |
| Fr.-Mo. | 23,69 | 76,31 |

Aus Tabelle 19 ergeben sich im Wochenmittel auf die CSB-Ablaufkonzentration bezogen ein partikulärer Anteil von 41,53% \pm 5,29% und ein gelöster Anteil von 58,47% \pm 5,29%. Die mittlere Ablaufkonzentration lag bei ca. 16 mgCSB/l. Daraus ergibt sich ein $X_{CSB,AN}$ von 6,64 mgCSB/l \pm 0,85 mgCSB/l und ein $S_{CSB,AN}$ von 9,36 mgCSB/l \pm 0,85 mg/l. Der partikuläre Anteil und der gelöste Anteil im Ablauf kann auch auf die Zulaufkonzentration bezogen werden, dann ist der partikulären Anteil 1,11% \pm 0,16% und der gelösten Anteil 1,56% \pm 0,16% der Zulaufkonzentration(vgl. Anhang F.2).

Tabelle 19: Wochenmittel der gelösten und partikulären Anteile der CSB-Fraktionen im Ablauf

| Wechselintervalle | partikuläre Anteile in % | gelöste Anteile in % |
|-------------------|--------------------------|----------------------|
| Mo.-Mi. | 41,25 | 58,75 |
| Mi.-Fr. | 41,25 | 58,75 |
| Fr.-Mo. | 42,09 | 57,91 |

Der tatsächliche partikuläre Anteil im Zulauf der LKA weicht von dem gemessenen Wochenmittelwert ab, da die Messung für das OECD-Medium im Vorlagebehälter durchgeführt wurde. Die partikulären Anteile wurden durch die Abbauvorgänge im Vorlagebehälter und im Nährstoff-Zulaufschlauch erhöht. Die partikulären Anteile im Wasserzulauf wurden nicht berücksichtigt. Die Erhöhung der partikulären Anteile lässt sich aus den Messwerten der Tabelle 19 und Tabelle 20, sowie aus den Beobachtungen in Kapitel 6.2 und 6.3 ableiten. Dieser Anteil wird nachfolgend bei der Berechnung des Schlammüberschusses in Kapitel 6.6 nur teilweise berücksichtigt.

6.6 Auswertung der Trockensubstanzmessung und Schlamm Bilanzierung

Die Trockensubstanz-Messungen wurden über den gesamten Zeitraum des Projektes durchgeführt. Die Anlagen konnten für den Zeitraum vom 12.05 bis 02.06.2017 im stabilen Betrieb ohne Blähschlamm betrieben werden. Für diesen Zeitraum erfolgen eine Auswertung der Trockensubstanzmessungen und die Berechnung des Schlammalters. Die Messwerte zu den Berechnungen und Abbildungen sind in Anhang G aufgeführt.

Die Abbildung 21 zeigt den Verlauf des Trockensubstanzgehalts im Belebungsbecken der Nitrifikation (TS_{BB}) der LKA 1 und 2. Die gemessene Trockensubstanzgehalte pro Tag wurde aus fünf Messwerten gemittelt und mit der Standardabweichung angegeben. In beiden LKA konnte durch täglichen Schlammabzug ein TS_{BB} um 3,00 g/l eingestellt werden. Dabei zeigt sich nur eine leichte Abweichung bei den gemessenen Werten zwischen LKA 1 und 2. Der mittlere TS_{BB} von LKA 1 liegt für den gesamten Versuchszeitraum bei $3,19 \text{ g/l} \pm 0,12 \text{ g/l}$, für die LKA 2 ergibt sich ein mittlerer TS_{BB} von $3,07 \text{ g/l} \pm 0,13 \text{ g/l}$.

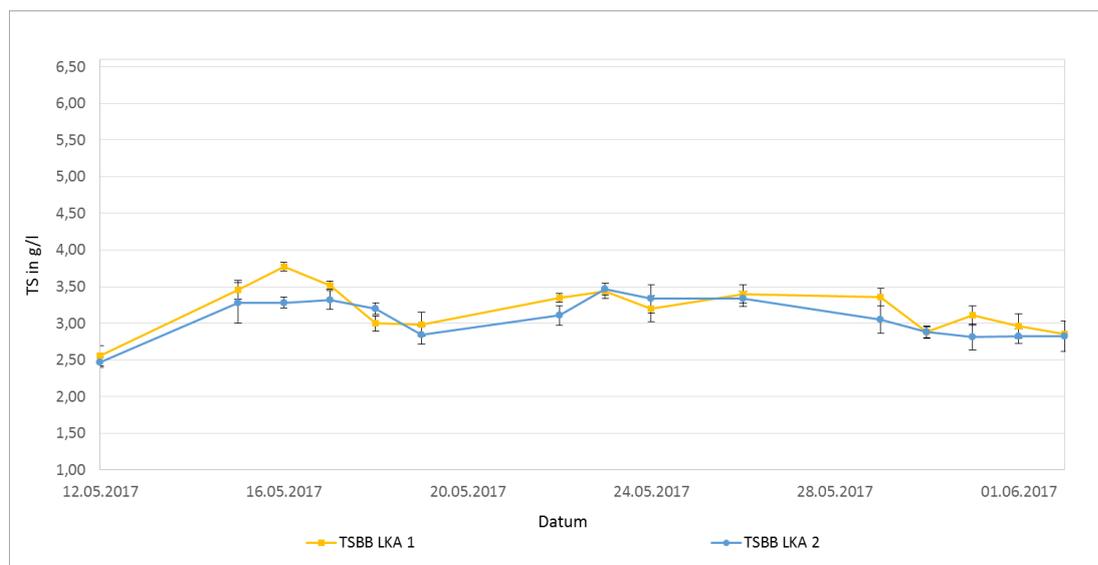


Abbildung 21: Trockensubstanzgehalt im Belebungsbecken der Nitrifikation

Der Trockensubstanzgehalt des Rückführschlammes (TS_{RS}) kann für beide LKA aus Abbildung 22 abgelesen werden. An den Versuchstagen 18.05, 29.05 und 31.05.2017 lassen sich große Unterschiede zwischen beiden LKA beobachten. Auch zeigt sich das die TS_{RS} Werte in den LKA selbst sehr stark schwanken. Diese Schwankungen sind zum Teil auf die Probennahme und der Höhe des Flockenfilters, sowie der Eindickung in der Nachklärung zurückzuführen. Durch die Probennahme über das Drei-Wege-Ventil wurde auch indirekt die Verdünnung des Schlammes gesteuert/verursacht. Ein großes Öffnen des Ventils bewirkte Turbulenzen in der Nachklärung durch nachströmendes Schlammwassergemisch aus dem Nitrifikationsbecken und führte zu niedrigeren Messwerten. Wurde das Ventil nur sehr gering geöffnet, führte dies zu einer zu geringen Verdünnung des Schlammes, wodurch eher der Trockensubstanzgehalt des Bodenschlammes (TS_{BS}) in der Nachklärung gemessen wurde. Für die LKA 1 wurde ein mittlerer TS_{RS} von $4,37 \text{ g/l} \pm 0,13 \text{ g/l}$ und in LKA 2 ein mittlerer TS_{RS} von $5,01 \text{ g/l} \pm 0,15 \text{ g/l}$ ermittelt.

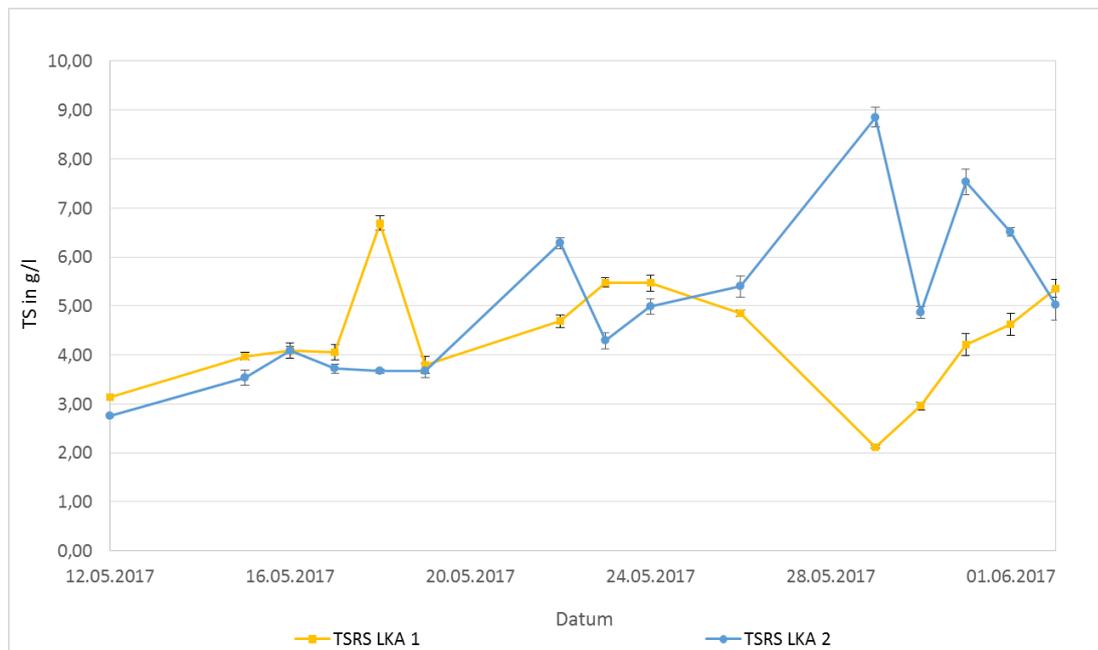


Abbildung 22: Trockensubstanzgehalt des Rückführschlammes

Der Überschussschlamm in Abbildung 23 setzt sich aus dem gemessenen Trockensubstanzgehalt des abgezogenen Schlammes, der Schlammverluste durch die Probennahme zur Bestimmung der Trockensubstanzgehalte TS_{BB} und TS_{RS} und aus der täglich positiven dazugekommenen Schlammmasse im Belebungsbecken zusammen. Die großen Schwankungen der abgezogenen Werte der LKA 1 und 2 werden durch die Abzugsmenge und deren Trockensubstanzgehalt verursacht. Die LKA 1 hat im Mittel einen Schlammabzug von $2,93 \text{ g/d} \pm 0,15 \text{ g/d}$ und LKA 2 von $2,80 \text{ g/d} \pm 0,16 \text{ g/d}$. In Kapitel 6.2 wurde gezeigt, dass das Abbauverhalten in den Zulaufschläuchen einen Einfluss auf die Zulaufkonzentration hat. Da die Zulaufschläuche der LKA 1 zu Beginn dieser Arbeit länger als die der LKA 2 waren, hat im ersten Abschnitt des Versuchszeitraums (27.02 - 24.04) die LKA 1 weniger Überschussschlamm produziert. Im zweiten Abschnitt des Versuchszeitraums (28.04 - 30.05) ist der Zulaufschlauch durch die Umbaumaßnahmen der LKA 1 kürzer als die der LKA 2, deshalb lässt sich die etwas größere Schlammproduktion in LKA 1 auf die Länge der Zulaufschläuche zurückführen (vgl. Kapitel 6.2, Tabelle 14 und Tabelle 15).

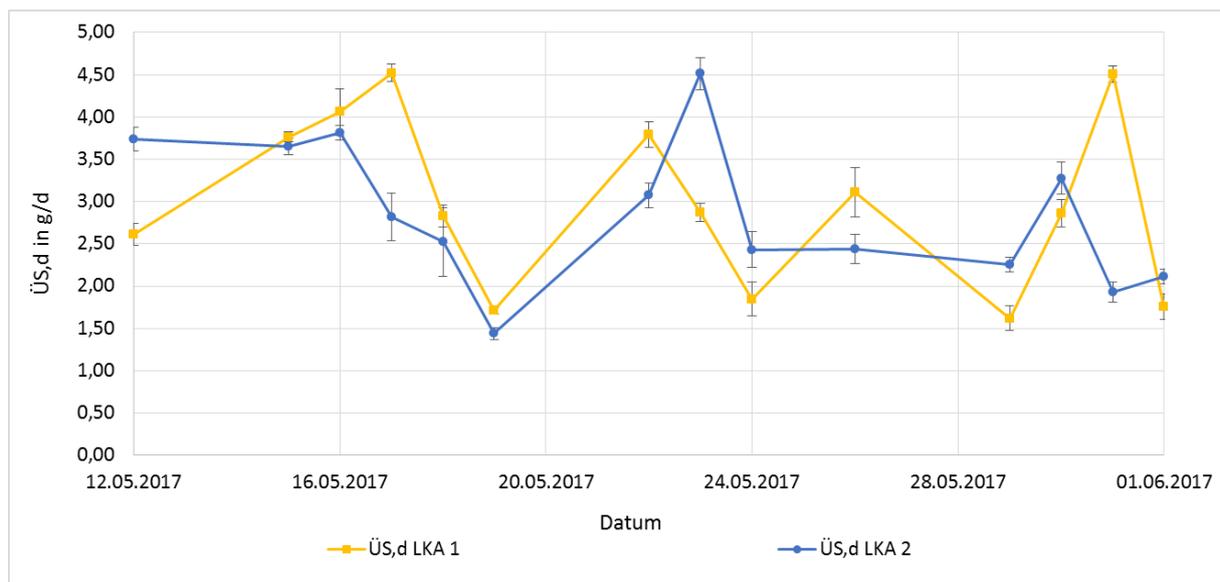


Abbildung 23: Gesamter Überschussschlamm aus Messungen der Trockensubstanz und Berechnungen des täglich positiven Schlammzuwachses im Belebungsbecken der Nitrifikation des ermittelten Trockensubstanzgehaltes vom Vortag

Das Schlammalter wurde als gleitender Sieben-Tage-Mittelwert dargestellt um die Schwankungen des Überschussschlammabzuges auszugleichen bzw. zu glätten (vgl. Abbildung 24). Mit einem V_{BB} von 8,2 l, einem TS_{BB} von 3,00 g/l, einer Zulaufkonzentration von 600 mgCSB/l, einer Zulaufmenge von 0,375 l/h und dem theoretisch berechneten \dot{U}_d von 1,45 g/d sollte sich ein Schlammalter von 17 d einstellen (vgl. Tabelle 3 und Gleichung 3-28).

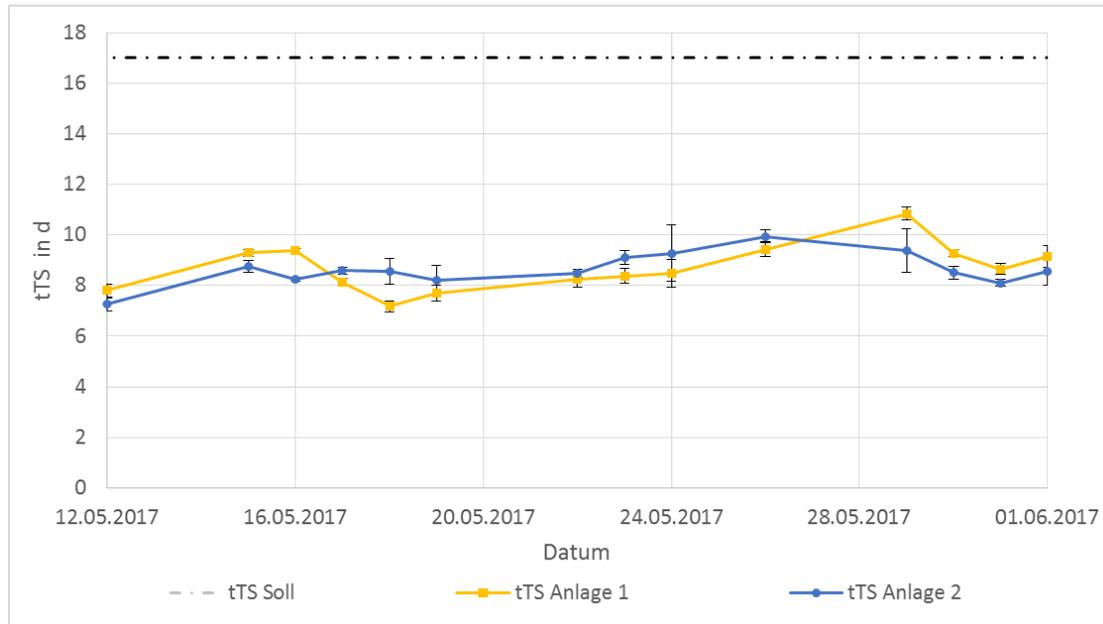


Abbildung 24: Siebentage Mittelwert des Schlammalters

Laut einer vorangegangenen Bachelorarbeit mit einem VBB von 8,2 l, einem TSBB von 3,00 g/l, einer Zulaufkonzentration von 300 mgCSB/l, einer Zulaufmenge von 0,75 l/h sollte sich theoretisch berechnet (nach DWA-A 131) ein \dot{U}_d von 1,60 g/d ohne Berücksichtigung der partikulären Anteile der CSB-Fractionen einstellen (Scharff, 2017). Mit diesem \dot{U}_d und einem TSBB von 3,0 g/l sollte sich ein Schlammalter von 15,38 d einstellen. Für die Berechnungen des Schlammalters für die LKA 1 und 2 wurde ein VBB von 8,2 l einer mittleren CSB-Zulaufkonzentration von 592 mg/l und einem Zulaufvolumenstrom von 0,375 l/h verwendet. Die CSB-Tagesfracht ist in beiden Betrachtungen wie schon erwähnt nicht dieselbe, woraus sich leicht unterschiedliche Schlammproduktion und daraus resultierend das Schlammalter einstellen. Für die LKA 1 ergibt sich mit einem mittleren TS_{BB} von 3,19 g/l \pm 0,12 g/l ein Schlammalter von 8,93 d \pm 0,28 d, bei der LKA 2 ergibt sich ein Schlammalter von 8,99 d \pm 0,39 d mit einem mittleren TS_{BB} von 3,07 g/l \pm 0,13 g/l. Die Schlammproduktion lässt sich über die Nährstoffzufuhr bzw. der CSB-Zulaufkonzentration anpassen. Um ein Schlammalter von 10 d bzw. 17 d einzustellen muss die Schlammproduktion auf 2,46 g/d und 1,44 g/d eingestellt werden. Im nachfolgenden Kapitel 6.2 wird näher auf die gemessenen Abweichungen zum theoretisch berechneten Wert aus der vorangegangenen Bachelorarbeit (Scharff, 2016) eingegangen.

6.7 Bestimmung der Zulaufkonzentration für verschiedenen Schlammalter

Um eine Aussage über die CSB-Zulaufkonzentration für verschiedene Schlammalter machen zu können, wurde in Anlehnung an das Bemessungsschema des DWA-A 131 (vgl. Kapitel 3.3.4) die Phosphatbilanz, die Stickstoffbilanz und die CSB-Fraktionen berechnet (DWA, 2016). Die verwendeten Parameter sind in Tabelle 20 aufgeführt. Die Berechnungen werden nach den Annahmen des DWA-A 131 aus Kapitel 3.3 und mit den gemessenen Werten aus Kapitel 6.6 durchgeführt.

Tabelle 20: Verwendete Parameter der CSB-Fraktionen, Phosphatbilanz und Stickstoffbilanz für die Berechnungen des Schlammalters in Abhängigkeit der CSB-Zulaufkonzentration

| ¹ CSB-Fraktionierung | | Beschreibung | Einheit |
|---------------------------------|----------------|--|---------|
| $f_{CSB,ZB}$ | 0,7852 | Faktor zur Berechn. der gelösten Anteile im Zulauf | - |
| $f_{CSB,AN}$ | 0,0160 | Faktor zur Berechn. der gelösten Anteile im Ablauf | - |
| $f_{X_{CSB,ZB}}$ | 0,2148 | Faktor zur Berechn. der partikulären Anteile im Zulauf | - |
| $f_{X_{CSB,AN}}$ | 0,0110 | Faktor zur Berechn. der partikulären Anteile im Ablauf | - |
| f_{CSB} | 0,2000 | Faktor des leicht abbaubaren CSBs am abbaubaren CSB | - |
| Phosphatbilanz | | | |
| ² $C_{P,ZB}$ | 7,07 - 25,28 | Theoretisch berechnete Phosphatkonzentration im Zulauf (multipliziert mit 1,42, wird nachfolgend erläutert) | mg/l |
| ¹ $C_{P,AN}$ | 3,06 | Gemittelte Phosphatkonzentration im Ablauf | mg/l |
| ³ $f_{CP,BM}$ | 0,005 | Fakt. zur Berechn. des in die BM eingebauten Phosphors | - |
| ³ $f_{XP,Bio}$ | 0,002 | Fakt. zur Berechn. des bio. geb. Phosphors der bio. P- Elimination | - |
| Stickstoffbilanz | | | |
| ² $C_{N,ZB}$ | 45,09 - 160,81 | Theoretisch berechnete Stickstoffkonzentration im Zulauf | |
| ³ $S_{orgN,AN}$ | 2,00 | Konz. im Ablauf des gelösten organischen Stickstoffs | mg/l |
| ³ $S_{NH4,AN}$ | 0,00 | Konz. des gelösten Ammoniumstickstoffs als N | mg/l |
| ³ $f_{SNO3,AN}$ | 0,70 | Faktor der Konz. des gelösten Nitratstickstoffs als N | - |
| ¹ $S_{NO3,AN}$ | 6,97 | Im Mittel gemessene Stickstoffablaufkonzentration der LKA | mg/l |
| ³ $f_{XorgN,BM}$ | 0,07 | Fakt. zur Berechn. des in die BM eingebauten org. N | - |
| ³ $f_{XorgN,inert}$ | 0,03 | Fakt. zur Berechn. des inerten partikulär gebundenen org. N | - |

Fortführung der Tabelle 20: Verwendete Parameter der CSB-Fractionen, Phosphatbilanz und Stickstoffbilanz für die Berechnungen des Schlammalters in Abhängigkeit der CSB-Zulaufkonzentration

Benötigte Parameter für die Berechnung der CSB-Fraktion und der Phosphat- und Stickstoffbilanz

⁴Der Laborkläranlagen

| | | | |
|--------------|------|--|-----|
| V_D | 4,2 | Volumen des Denitrifikationsbeckens | l |
| V_{BB} | 8,2 | Volumen des Belebungsbeckens (V_D+V_N) | l |
| $Q_{d,Konz}$ | 9,0 | Täglicher Zu- und Ablaufvolumenstrom | l/d |
| T_p | 20,0 | Temperatur im Belebungsbecken/Nachklärung | °C |
| t_{TS} | 17,0 | Schlammalter des Belebungsbeckens (variabel f. Berechnung) | d |

³Nach DWA-A 131

| | | | |
|---------------|-------------|---|-----------------|
| Y | 0,67 | Ertragskoeff. der geb. BM vom CSB pro abbaubaren CSB | g/g |
| b | 0,17 | Zerfallskoeffizient | d ⁻¹ |
| $\mu_{A,max}$ | 0,47 | Max. Wachstumsrate der autotrophen Organismen für 15°C | d ⁻¹ |
| F_T | 1,42 | Temperaturfaktor für endogene Veratmung ($1,0^{(15-T_p)}$) | - |
| f_A | 0,20 - 0,35 | Inerter Anteil am partikulären CSB | - |
| f_B | 0,20 - 0,30 | Anteil der anorganischen Stoffe an den abfiltrierbaren Stoffe | - |
| f_{CSB} | 0,15 - 0,25 | Anteil des leicht abbaubaren CSB am abbaubaren CSB | - |

¹Mittelwert der im Mittel gemessenen Werte beider LKA

²Theo. berechnete Werte aus Herstellerangaben der verwendeten Substanzen in Abhängigkeit der CSB-Zulaufkonzentration

³Übliche Faktoren und Koeffizienten bei kommunalen Abwasser aus dem DWA-A 131 (DWA, 2016)

⁴Analytisch bestimmte Werte der CSB-Fraktion nach dem DWA-A 131 (DWA, 2016, vgl. Kapitel 6.5)

Im Kapitel 3.3.4 wurde schon angedeutet, dass die Bemessung der LKA nicht nach dem Bemessungsschema nach DWA-A 131 vorgenommen werden kann. Üblicherweise wird die Bemessung von Belebungsanlagen durch Iteration durchgeführt, da sich viele Faktoren gegenseitig beeinflussen. Das Belebungsbecken wird über die Iteration des Quotienten aus Sauerstoffzehrung zu Sauerstoffangebot dimensioniert. Im Vorfeld wird die Zulaufmenge, die CSB-, die Stickstoff- und die Phosphatfracht durch Messungen oder bekannte Werte ausgewählt. Nachfolgend kann durch die CSB-Fractionen und der Phosphatelimination die Anteile der Schlammproduktion berechnet werden. Mit der Stickstoffbilanz können die Sauerstoffzehrung und das Sauerstoffangebot bestimmt werden. Sollte das Verhältnis aus der Gleichung 3-36 kleiner 1 oder größer 1 sein kann über das Verhältnis V_D/V_{BB} durch Veränderung von V_D oder der zusätzlichen Dosierung von Kohlenstoffquellen eine Iteration erfolgen bis der Wert 1 ist. Die Bemessung des Nachklärbeckens wird nachfolgend für die zu erwartende Schlammbelastung ausgelegt.

Eine Bemessung der LKA kann nicht über das Verhältnis von V_D/V_{BB} vorgenommen werden, da das Belebungsbeckenvolumen durch den Hersteller Bohr-Labor-Technik festgelegt ist. Dasselbe gilt für die Nachklärung der LKA. Die Anpassung für einen optimalen Betrieb kann daher nur noch über eine Anpassung der CSB-Zulaufkonzentration, den TS_{BB} und über die Zusammensetzung des synthetischen Abwassers erfolgen. Weshalb eine Iteration über die CSB-Zulaufkonzentration für verschiedene Schlammalter und dem Mittelwert des TS_{BB} aus beiden mittleren TS_{BB} der LKA von 3,13 g/l erfolgte. Die verwendeten Faktoren und Anteile aus Tabelle 20 beziehen sich auf kommunales Abwasser. Es ist jedoch fraglich, ob diese Faktoren auch für das verwendete synthetische Abwasser gelten (Koppe & Stozek, 1990). Auf Grund dessen wurde zuerst die Iteration für die maximalen, mittleren und minimalen Anteile von f_A und f_{CSB} vorgenommen, um deren Einflüsse auf die Schlammproduktion beurteilen zu können. Der Anteil der anorganischen abfiltrierbaren Stoffe f_B im synthetischen Abwasser wird als gering bzw. geringer als im DWA-A 131 angenommen. Der Anteil f_B wird daher bei der Iteration mit 0,2 und 0,1 ausgewählt (vgl. Tabelle 21). Die Stickstoffzulaufkonzentration wurde aus den Herstellerangaben und den Anteilen des synthetischen Abwassers theoretisch für die CSB-Zulaufkonzentration von 592 mg/l berechnet (vgl. Kapitel 3.3.1 und Anhang A). Die Phosphatkonzentration wurde analytisch ermittelt, im Zulauf betrug diese im Mittel 13,95 mg/l und ist damit um ca. 1,42-mal größer als die theoretisch berechnete Konzentration nach Herstellerangaben. Aus diesem Grund wurden die berechneten Phosphatzulaufkonzentrationen nach Herstellerangaben um diesen Faktor erhöht. Die Stickstoff- und Phosphatkonzentration wurden bei der Iteration für die jeweilige Zulaufkonzentration berechnet (vgl. Kapitel 3.3.1 und Anhang A). Für jedes Schlammalter wurde die Zulaufkonzentration solange variiert bis das entsprechende Schlammalter erreicht wurde.

Tabelle 21: Ergebnisse der Iteration über $C_{CSB,ZB}$ in Abhängigkeit des Schlammalters mit Variation der Anteile für kommunales Abwasser nach DWA-A 131

| Anteile | t_{TS} in d | $C_{CSB,ZB,theo}$ in mg/l | Anteile | t_{TS} in d | $C_{CSB,theo}$ in mg/l |
|-------------------|---------------|------------------------------|-------------------|---------------|---------------------------|
| $f_B = 0,20$ | 8,94 | 845 | $f_B = 0,10$ | 8,94 | 970 |
| $f_A = 0,20$ | 10 | 785 | $f_A = 0,20$ | 10 | 900 |
| $f_{CSB} = 0,15$ | 17 | 530 | $f_{CSB} = 0,15$ | 17 | 630 |
| $f_B = 0,200$ | 8,94 | 825 | $f_B = 0,100$ | 8,94 | 945 |
| $f_A = 0,275$ | 10 | 760 | $f_A = 0,275$ | 10 | 875 |
| $f_{CSB} = 0,200$ | 17 | 528 | $f_{CSB} = 0,200$ | 17 | 610 |
| $f_B = 0,20$ | 8,94 | 810 | $f_B = 0,10$ | 8,94 | 920 |
| $f_A = 0,35$ | 10 | 745 | $f_A = 0,35$ | 10 | 855 |
| $f_{CSB} = 0,25$ | 17 | 515 | $f_{CSB} = 0,25$ | 17 | 591 |

Die Berechnung der CSB-Zulaufkonzentration für das mittlere Schlammalter aus LKA 1 und 2 von 8,94 d ergab eine weitaus höhere Zulaufkonzentration als tatsächlich verwendet (vgl. Tabelle 21, Spalte $C_{CSB,ZB}$).

Der Einfluss auf die produzierte Schlammmenge, durch die Variation der Anteile f_A und f_{CSB} zeigt, dass eine geringere Zulaufkonzentration für dieselbe Schlammproduktion bei höheren Anteilen erreicht wird. Die Variation von f_B beeinflusst sehr stark die produzierte Schlammmenge aus der Zulaufkonzentration. Je kleiner f_B ist desto größer muss die Zulaufkonzentration für die gleiche Schlammproduktion sein.

Für die Iteration zur Bestimmung der ungefähren CSB-Zulaufkonzentration für bestimmte Schlammalter und des Verhältnisses von Sauerstoffzehrung zu Sauerstoffdargebot wurde f_B mit 0,1 gewählt. Der Anteil an anorganischen Stoffen der abfiltrierbaren Stoffe (f_A) wurde für das synthetische Abwasser als gering angenommen mit 0,2. Die leicht abbaubaren Anteile wurden als groß angenommen mit 0,25.

Bei der Iteration zeigt sich, dass das Verhältnis von Sauerstoffzehrung und Sauerstoffdargebot bei kleineren Konzentrationen größer 1 wird (siehe Anhang H und Tabelle 22). Das lässt darauf schließen, dass das Denitrifikationsbecken im Verhältnis zum gesamten Belebungsbeckenvolumen etwas zu groß ist und dieses beim normalen Bemessungsgang verkleinert werden müsste (vgl. Anhang B). Des Weiteren kann bei der Berechnung gesehen werden, dass der Überschussschlamm aus der Phosphatelimination einen großen Einfluss auf den gesamten Überschussschlamm hat.

Tabelle 22: Iteration über die CSB-Zulaufkonzentration für verschiedene Schlammalter mit einem TS_{BB} von 3,13 g/l

| $X_{P,Fäll}$ | $X_{P,BM}$ | $X_{P,Bio}$ | $C_{P,ZB}$ | $C_{CSB,ZB}$ | $\ddot{U}_{d,C}$ | $\ddot{U}_{d,P}$ | \ddot{U}_d | t_{TS} | $C_{N,ZB}$ | x |
|--------------|------------|-------------|------------|--------------|------------------|------------------|--------------|----------|------------|------|
| in mg/l | | | | | in g/d | | | in d | in mg/l | - |
| 13,01 | 4,85 | 1,94 | 22,86 | 970,00 | 2,03 | 0,85 | 2,88 | 8,94 | 145,86 | 0,99 |
| 11,94 | 4,53 | 1,81 | 21,33 | 905,00 | 1,81 | 0,78 | 2,59 | 10,00 | 136,09 | 1,01 |
| 7,38 | 3,15 | 1,26 | 14,85 | 630,00 | 1,02 | 0,49 | 1,51 | 17,00 | 94,74 | 1,08 |

Der theoretisch berechnete Wert der Zulaufkonzentration in Tabelle 22 mit den Gleichungen aus Kapitel 3.3.4 für ein Schlammalter von 8,94 d ist ca. 1,64-mal größer als die praktisch gemessene Zulaufkonzentration von 592 mgCSB/l. Mithilfe dieses Faktors wurden die Näherungswerte für die Zulaufkonzentration berechnet (vgl. Tabelle 23).

Bei der Iteration ist im Vergleich zu den gemessenen Werten eine zu geringe Überschussschlammproduktion berechnet worden, weshalb sich auch zu große Zulaufkonzentration für die angestrebten Schlammalter ergeben. Die Überschussschlammproduktion im Denitrifikationsbecken unterscheidet sich von der im Nitrifikationsbecken. Üblicherweise wird für anoxische Bedingungen eine Ausbeute von 75% der Ausbeute aus aeroben Bedingungen angenommen (siehe Gleichung 3-32).

Im Denitrifikationsbecken kann jedoch nur der CSB umgesetzt werden, für den Nitrat vorhanden ist (vgl. Kapitel 3.2.5). Durch das etwas zu große Denitrifikationsbecken wurde vermutlich bei der Denitrifikation der entsprechend des Volumenanteils zur Verfügung stehende abbaubare CSB nicht komplett abgebaut, sondern erst im Nitrifikationsbecken. Dies hätte zur Folge, dass eine zu geringe Überschussschlammproduktion berechnet wurde. Durch eine Verringerung der Zulaufkonzentration kann ein bestimmtes Schlammalter eingestellt werden. Das Verhältnis von Sauerstoffzehrung zu Sauerstoffangebot kann über die Veränderung der Stickstoffkonzentration oder der CSB-Konzentration im Zulauf vorgenommen werden, sodass das Verhältnis 1 wird. (vgl. Tabelle 23 und Anhang I).

Tabelle 23: Iteration über die CSB-Zulaufkonzentration mit einem TS_{BB} von 3,13 g/l und einer Variation der Stickstoffzulaufkonzentration

| $X_{P,Fäll}$ | $X_{P,BM}$ | $X_{P,Bio}$ | $C_{P,ZB}$ | $C_{CSB,ZB}$ | $ÜS_d$ | t_{TS} | $C_{N,ZB}$ | x | $C_{N,ZB,Anp}$ | x_{Anp} |
|--------------|------------|-------------|------------|--------------|--------|----------|------------|------|----------------|-----------|
| in mg/l | | | | in mg/l | in g/d | in d | in mg/l | - | in mg/l | - |
| 6,75 | 2,96 | 1,18 | 13,95 | 592,00 | 2,88 | 8,94 | 89,02 | 1,04 | 92,00 | 1,00 |
| 6,09 | 2,76 | 1,10 | 13,02 | 552,33 | 2,59 | 10,00 | 83,06 | 1,05 | 86,50 | 1,00 |
| 3,31 | 1,92 | 0,77 | 9,06 | 384,49 | 1,51 | 17,00 | 57,82 | 1,12 | 63,00 | 1,00 |

Bei einer Zulaufkonzentration von 592 mg/l müsste die Stickstoffkonzentration um ca. 2,80 mg/l vergrößert werden. Damit sich ein Schlammalter von 10 d einstellt muss die CSB-Zulaufkonzentration auf 541 mgCSB/l eingestellt werden und die Stickstoffkonzentration um ca. 3,44 mg/l erhöht werden. Ein Schlammalter von 17 d ergibt sich aus einer CSB-Zulaufkonzentration von 334 mgCSB/l mit einer Erhöhung der Stickstoffkonzentration von ca. 5,20 mg/l. Außerdem zeigen auch das eingestellte Rückführverhältnis (RF) von 7,12 im Vergleich zum benötigten RF von 8,87 und die niedrige Nitratlaufkonzentration (vgl. Tabelle 27), dass eine höhere Stickstoffkonzentration benötigt wird. Prozentual gesehen muss bei höheren Zulaufkonzentrationen die Stickstoffkonzentration weniger erhöht werden als bei niedrigen Zulaufkonzentrationen.

6.8 Anlagen Endzustand

Nach Umsetzung der Maßnahmen aus Kapitel 5.3 und Tabelle 5 ergibt sich ein neues Fließschema für die Laborkläranlage aus Abbildung 25.

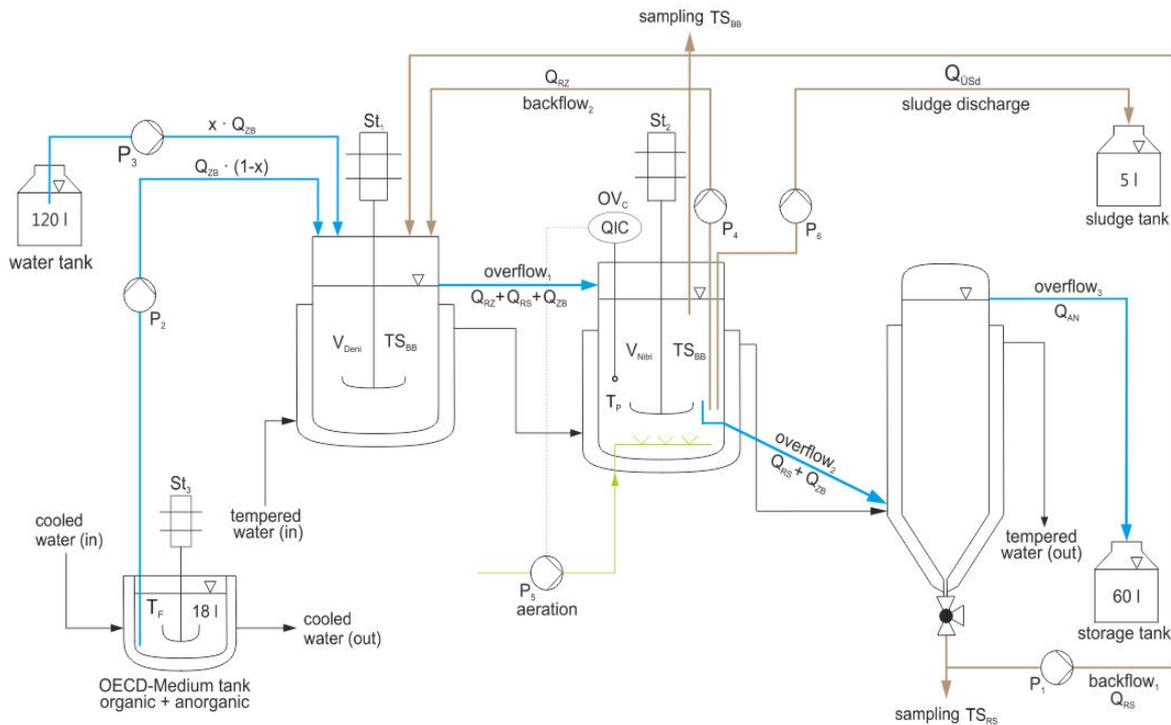


Abbildung 24: Fließschema der Laborkläranlage auf Grundlage von (Demmer, 2016)

Die Pumpen P2 und P3 wurden durch neue Pumpen ersetzt, mit denen die Dosierung genauer erfolgen kann. Das synthetische Abwasser wurde in einem doppelwandigen Vorlagebehälter auf 4°C gekühlt. Der organische und anorganische Anteil wurde dabei gemeinsam im Vorlagebehälter angesetzt und durch einen zusätzlichen Rührer stetig vermischt. Im Vorlagebehälter wurde eine hohe CSB-Konzentration angesetzt, da das Volumen des Vorlagebehälters auf 18 Liter begrenzt ist. Die Einstellung der gewünschten CSB-Konzentration im Zulauf des Denitrifikationsbeckens erfolgte durch eine Verdünnung mit Leitungswasser. Deshalb wurde ein zusätzlicher Wassertank und die Pumpe P3 zur Dosierung des Leitungswassers installiert. Durch den Umbau ergab sich der Zulaufvolumenstrom aus dem Nährstoffzulauf (Q_{Feed}) und dem Wasserzulauf (Q_{Water}). Die Anlagenbecken wurden von außen mithilfe von Aluminiumfolie gegen die Sonneneinstrahlung geschützt (Abbildung 26). Ein diskontinuierlicher Überschussschlammabzug wurde durch die Pumpe P6 realisiert. Der Überschussschlamm wird in einem fünf Liter Messbecher aufgefangen.



Abbildung 26: Endzustand der Laborkläranlage nach Umbau (eigene Darstellung)

In Tabelle 24 sind die Anlagenparameter zusammengefasst, mit denen die LKA während des Versuchszeitraumes betrieben wurden.

Tabelle 24: Auslegungsparameter der Laborkläranlage zum Ende der Bachelorarbeit

| Parameter | Werte | Beschreibung |
|------------------------|----------|--|
| Bauweise | | |
| V_D | 4,2 l | Füllvolumen der Denitrifikation |
| V_N | 4,0 l | Füllvolumen der Nitrifikation |
| $V_{BB} = (V_D + V_N)$ | 8,2 l | Gesamtfüllvolumen des Belebungsbeckens |
| V_{NK} | 2,3 l | Füllvolumen der Nachklärung |
| gewählte | | |
| T_p | 20°C | Betriebstemperatur der Laborkläranlage |
| $Q_{d,ZB}^*$ | 9 l/d | Gesamtzulaufstrom des Abwassers |
| HRT | 21,87 h | Hydraulische Verweilzeit |
| t_{TS} | 17 d | Aerobes Schlammalter für gewählten Betriebspunkt |
| $C_{CSB,ZB}$ | 600 mg/l | CSB-Zulaufkonzentration |
| TS_{BB} | 3,0 g/l | TS-Gehalt der im Durchschnitt erreicht werden soll |

Gemessene

| | | |
|-------------------|----------|---|
| $C_{CSB,ZB}$ | 592 mg/l | CSB-Zulaufkonzentration im Wochenmittel |
| $TS_{BB,A1}$ | 3,19 g/l | Durchschnittlicher TS-Gehalt im BB der LKA 1 |
| $TS_{BB,A2}$ | 3,07 g/l | Durchschnittlicher TS-Gehalt im BB der LKA 2 |
| $\ddot{U}_{d,A1}$ | 2,93 g/d | Durchschnittlicher Überschussschlamm der LKA 1 |
| $\ddot{U}_{d,A2}$ | 2,80 g/d | Durchschnittlicher Überschussschlamm der LKA 2 |
| $t_{TS,A1}$ | 8,93 d | Durchschnittlicher Schlammalter der LKA 1 |
| $t_{TS,A2}$ | 8,99 d | Durchschnittlicher Schlammalter der LKA 2 |
| $TS_{RS,A1}$ | 4,37 g/l | Durchschnittlicher TS vom Rückführschlamm LKA 1 |
| $TS_{RS,A2}$ | 5,01 g/l | Durchschnittlicher TS vom Rückführschlamm LKA 2 |

berechnet nach DWA-A 131

| | | |
|-----------------------|-----------------|--|
| $F_{FeCl3,40\%}^{**}$ | 910 μ l/d | Dosiermenge an Fällmittel (von 40% $FeCl_3$ -Lösung) |
| RV^{***} | 7,12 | Rückführverhältnis ($Q_{RS}+Q_{RZ}$) im Verhältnis zur Zulaufmenge |
| Q_{RS} | ca. 10 ml/min | Rückführstrom der Nachklärung |
| Q_{RZ} | ca. 34,5 ml/min | Interne Zirkulation Nitrifikation zu Denitrifikation |

* Durch Halbierung des Zulaufvolumenstromes hat sich die hydraulische Verweilzeit verdoppelt

** Der Fällmittelbedarf wurde aus Gleichung 3-24 berechnet mit einem $C_{P,ZB}$ von 13,95 mg/l und einem $C_{P,AN}$ von 2,48 mg/l und den Werten aus Tabelle 20 (der $C_{P,AN}$ Wert entspricht der Ablaufkonzentration im Mittel vor Versuchsbeginn)

*** Das Rückführverhältnis sollte nach Gleichung 3-38 = 8,87 betragen

6.9 Vorversuch zum Umfang von Abbauvorgängen in bereitgestellten Sammelproben unter verschiedenen Randbedingungen

Die Versuche 1 und 2 wurden wie in Kapitel 5.9 mit SMX und die Versuche 3 und 4 ohne SMX angesetzt. Der Versuch 1 und 3 wurde bei 4°C im Kühlschrank über 96 h gelagert und Versuch 2 und 4 bei 25°C im temperierten Wasserbad. Die Temperaturen konnten mit leichten Schwankungen auf die Sollwerte eingestellt werden (vgl. Abbildung 27).

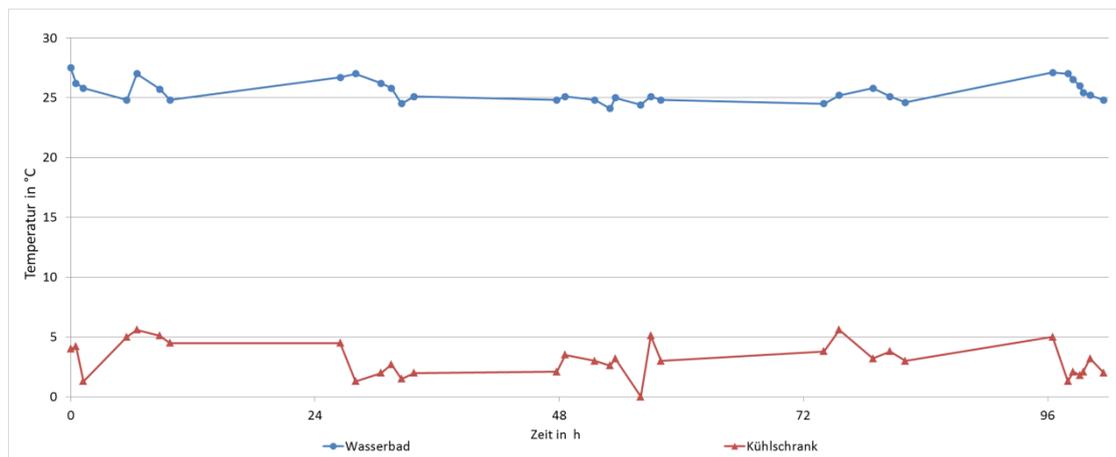


Abbildung 27: Temperaturverläufe des Wasserbads/Kühlschranks während des Versuchszeitraums der Versuche 1 bis 4

Der Versuch 1 und 2 sollte wie in Kapitel 5.9 mit einer SMX Konzentration von 500 ng/l angesetzt werden. Die gemessenen SMX Konzentrationen der Versuch 1 und 2 liegen im Mittel jedoch nur bei ca. 230 ng/l (vgl. Tabelle 25 und Anhang J). Die Anfangskonzentration der Versuche 1 und 2 sollten idealerweise gleich sein, da die Proben aus einer Mischprobe stammen. Die gemessenen Anfangskonzentrationen weichen um ca. 2,1% voneinander ab. Bei dem Versuch 1 (4°C) kann eine Abnahme der SMX-Konzentration nach 96 h von 1,39% und bei Versuch 2 (25°C) von 2,54% gemessen werden. Die Abnahme der SMX-Konzentration kann jedoch nicht als Abbau bzw. Umwandlungsprozess gewertet werden, da auch schon eine Abweichung unter den beiden Anfangskonzentrationen gemessen wurde.

Tabelle 25: Ergebnisse Sulfamethoxazolmessung der Versuch 1 und 2

| Datum | Probe | Versuch | Konzentration in ng/l | Abnahme in % |
|------------|------------------|---------|-----------------------|--------------|
| 29.05.2017 | t _{0h} | 1 | 232,60 | 0,00% |
| 31.05.2017 | t _{48h} | 1 | 231,06 | 0,66% |
| 02.06.2017 | t _{96h} | 1 | 229,36 | 1,39% |
| 29.05.2017 | t _{0h} | 2 | 227,75 | 0,00% |
| 31.05.2017 | t _{48h} | 2 | 226,77 | 0,43% |
| 02.06.2017 | t _{96h} | 2 | 221,96 | 2,54% |

Bei den Wasseranalysen (siehe Anhang L) der Stickstoffkonzentrationen konnten leichte Änderungen bei beiden Temperaturen festgestellt werden. Der Nitratstickstoff bei 4°C verringert sich minimal, bei 25°C ist eher ein Anstieg zu beobachten. In der Abbildung 28 kann jedoch auch die große Abweichung der Messwerte beobachtet werden, wodurch eine eindeutige Aussage bzw. ein Vergleichen der Proben in Bezug auf Abbauprozesse nicht gemacht werden kann.

Die Messungen der Nitritstickstoff-Konzentrationen zeigt bei Versuch 1 (4°C) einen absinken über die Versuchszeit und bei Versuch 2 (25°C) einen Anstieg. Die Standardabweichung der Nitritstickstoff-Konzentration bei 96 h ist sehr groß, daher könnten die Konzentrationen auch nach 96 h im Bereich der Anfangskonzentration liegen. Eine eindeutige Aussage über eine Tendenz der Abbauprozesse kann hier nicht getroffen werden.

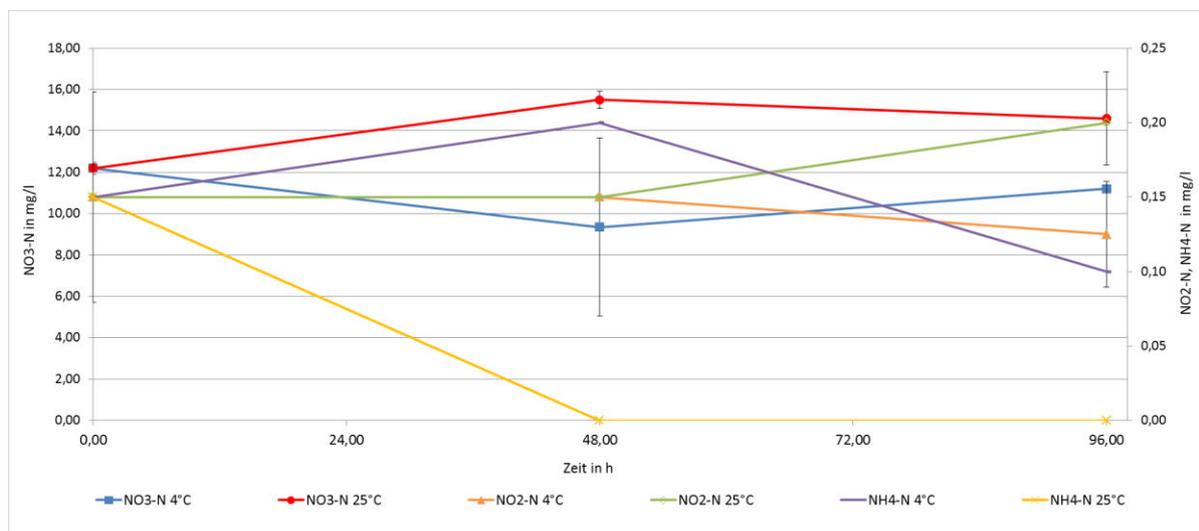


Abbildung 28: Werte der Stickstoff-Wasseranalyse von Versuche 1 (4°C) und 2 (25°C) mit SMX

Die Ammoniumstickstoff-Konzentration ist bei Versuch 2 (25°C) nach 48 h bei unter 0,1 mg/l und ist deshalb mit 0,0 mg/l angegeben (vgl. Messbereich Tabelle 11). Die Konzentration bei Versuch 1 (4°C) steigt bei 48 h an und sinkt nach 96 h auf 0,1 mg/l ab. Die Ammoniumstickstoff-Konzentration vom Versuch 2 nach 96 h könnte auch bei 0,09 mg/l liegen, daher ist auch in diesem Fall keine eindeutige Aussage zum Abbauverhalten machbar.

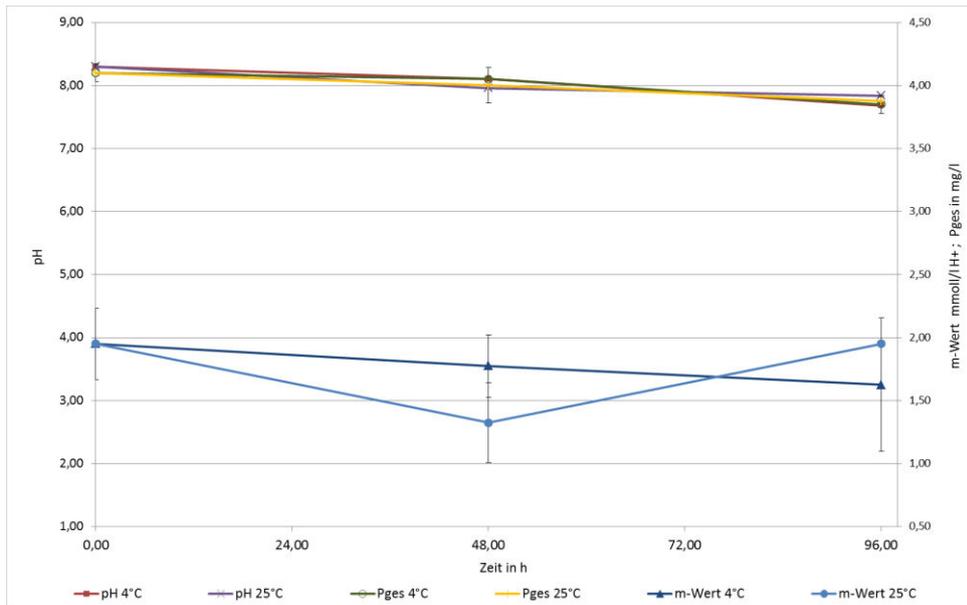


Abbildung 29: Messwerte der Gesamtphosphat-, PH-Wert- und Säurekapazitäts-Wasseranalyse von Versuch 1 (4°C) und 2 (25°C)

Bei dem Versuch 1 und 2 konnte bei dem Gesamtphosphat, dem pH-Wert und der Säurekapazität nur geringe Veränderung festgestellt werden (vgl. Abbildung 29).

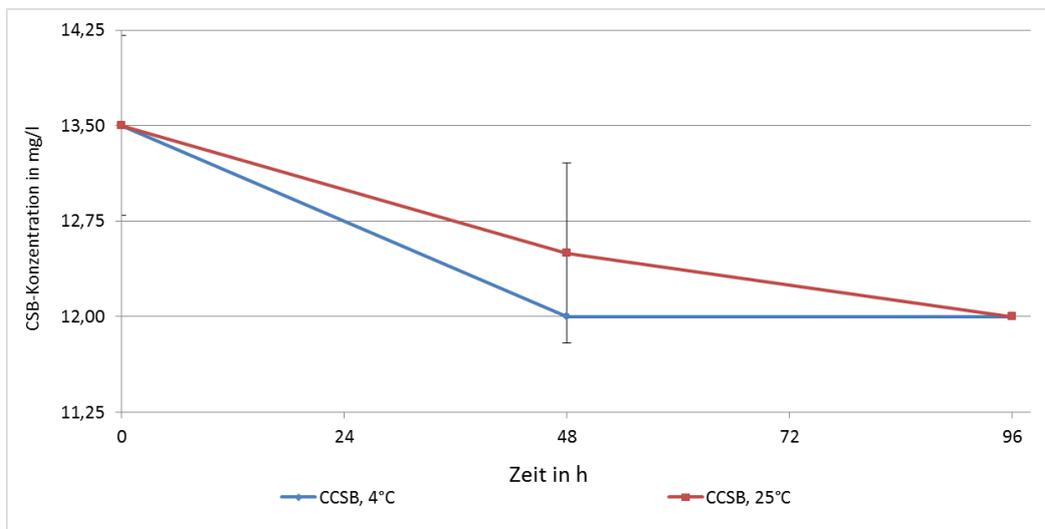


Abbildung 30: CSB-Konzentrationen der Proben von Versuch 1 (4°C) und 2 (25°C)

Bei der CSB-Konzentration konnte ein Abbau von 1,5 mgCSB/l bei beiden Versuchen festgestellt werden. Die Abnahme der CSB-Konzentration lässt auf Abbauprozess in beiden Proben schließen (vgl. Abbildung 30).

In Abbildung 31 ist der Verlauf der Sauerstoffkonzentration in den Proben des Versuches 1 und 2 dargestellt. Es wurde ein Anstieg der Sauerstoffkonzentration bei Versuch 1 gemessen, die Sauerstoffkonzentration von Versuch 2 ist minimal abgesunken. Die Sauerstoffsättigung in Wasser bei 4°C liegt bei 12,70 mgO₂/l und bei 25°C bei 8,11 mgO₂/l (Chemie-master, 2017). Bei beiden Versuchen wurde der Sättigungspunkt nicht erreicht. Dennoch kann durch den Anstieg der Sauerstoffkonzentration bei 4°C angenommen werden, dass weniger Abbau-/Umwandlungsprozesse stattfinden als bei 25°C.

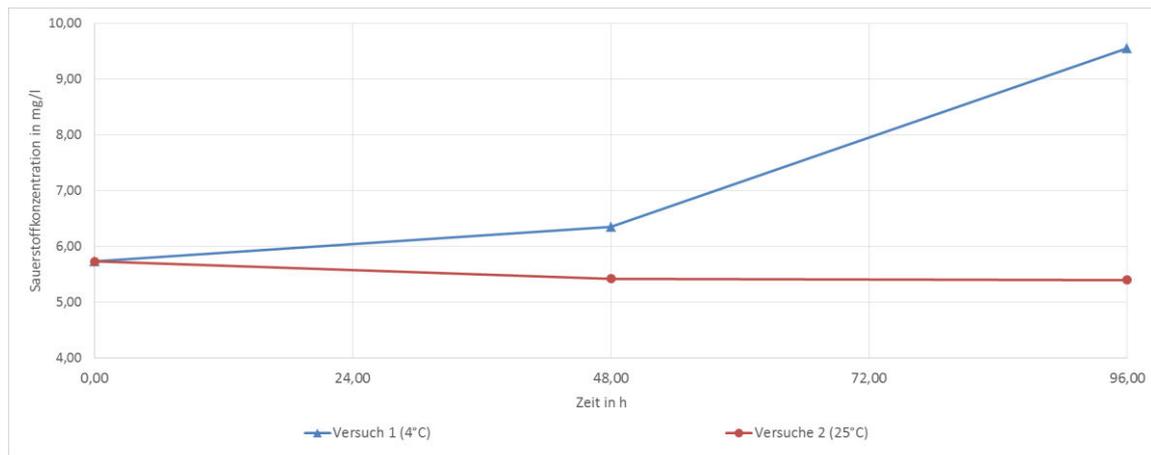


Abbildung 31: Sauerstoffkonzentrationen der Proben vom Versuch 1 (4°C) und 2 (25°C)

Bei den Versuchen 3 und 4 ohne SMX konnten ähnliche Beobachtungen wie bei den Versuchen 1 und 2 gemacht werden. Die Stickstoffkonzentrationen Ammonium und Nitrat nahmen leicht ab, die Nitritstickstoff-Konzentrationen stiegen minimal an. Die Standardabweichung und der Messbereich machen eine eindeutige Aussage über einen Abbauprozess jedoch nicht möglich (vgl. Abbildung 32).

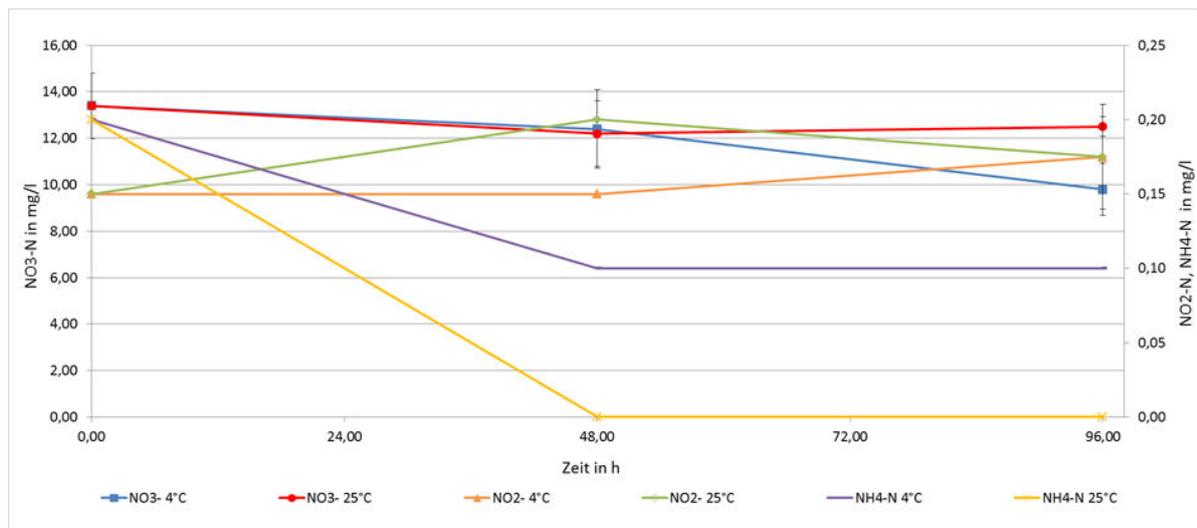


Abbildung 32: Stickstoffkonzentrationen in den Proben der Versuche 3 (4°C) und 4 (25°C) ohne SMX

Bei den Versuchen 3 und 4 wurde im Gegensatz zu den Versuchen 1 und 2 ein absinken beim pH-Wert beobachtet und ein leichter Anstieg bei der Säurekapazität. Die Phosphatkonzentration ist auch leicht abgesunken. Jedoch verhalten sich die Proben von Versuch 3 und 4 ähnlich, weshalb ein unterschied vom Abbauverhalten nicht getroffen werden kann (vgl. Abbildung 33).

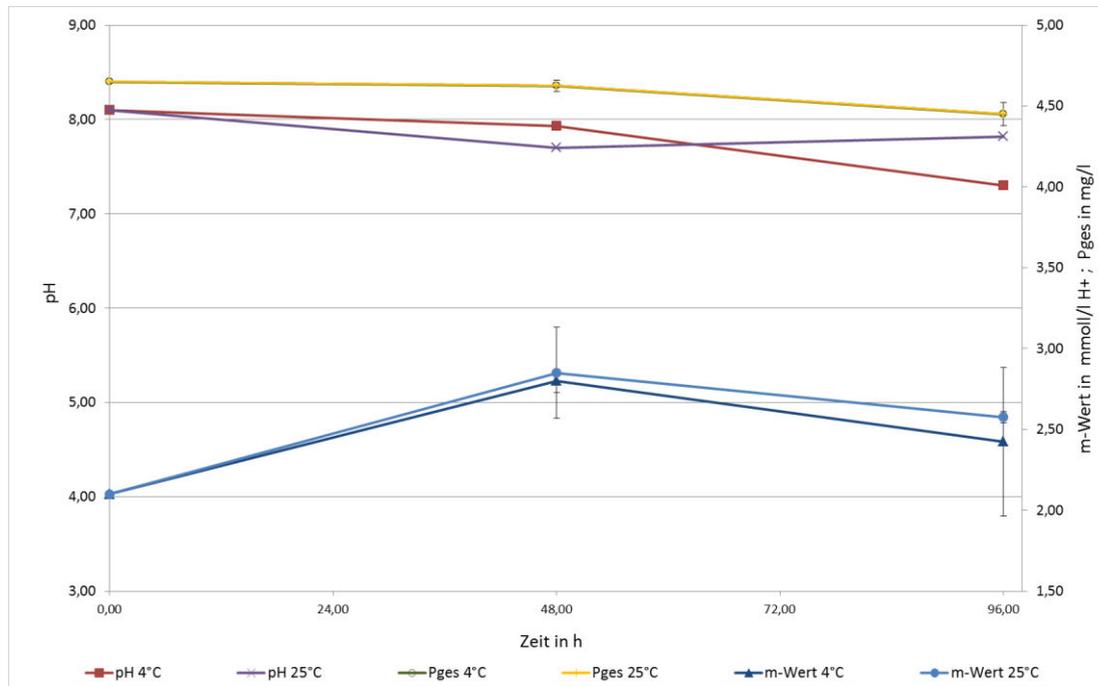


Abbildung 33: Messwerte der Gesamtphosphat-, PH-Wert- und Säurekapazitäts-Wasseranalyse von Versuch 3 (4°C) und 4 (25°C)

Die CSB-Konzentration nimmt bei beiden Versuchen über 96 h gleich stark ab (vgl. Abbildung 34). Die Standardabweichung vom Versuch 4 (25%) bei 48 h deutet auf einen Messfehler hin. Der CSB-Abbau lässt auf ähnliche Abbauvorgänge in beiden Versuchen schließen.

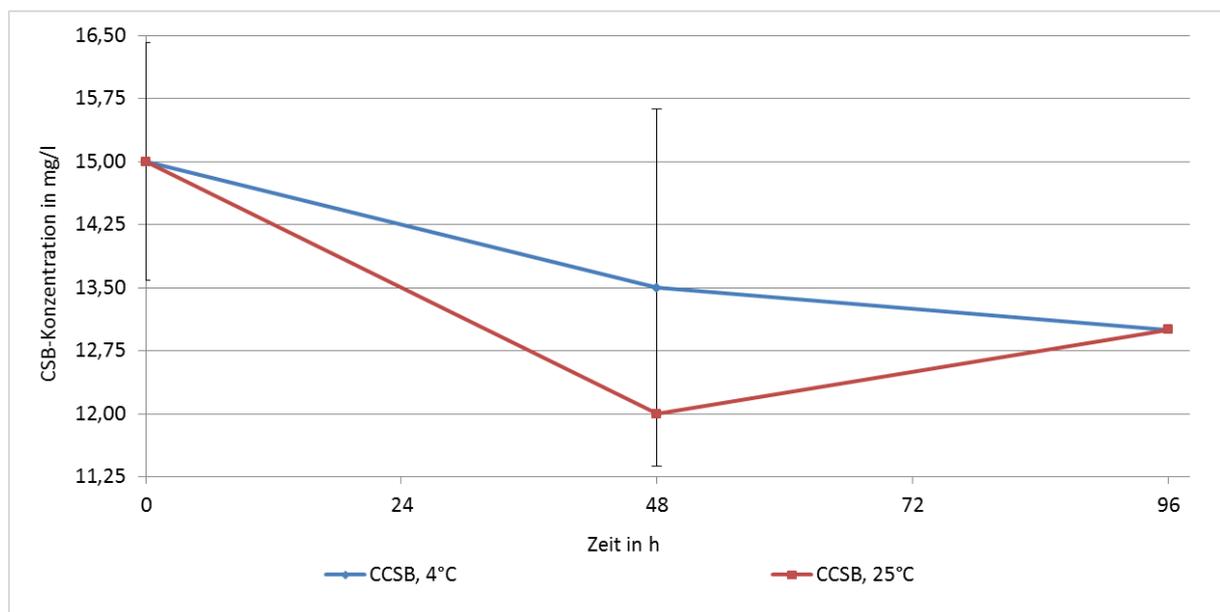


Abbildung 34: CSB-Konzentrationen der Proben von Versuch 3 (4°C) und 4 (25°C)

Die Sauerstoffkonzentration beim Versuch 3 steigt bei 4°C über den Versuchszeitraum an und bei Versuch 4 mit 25°C ist ein minimales absinken zu erkennen (vgl. Abbildung 35), wie bei den Versuch 1 und 2. Durch diese Feststellung kann vermutet werden, dass bei 4°C weniger Abbau/Umwandlungsprozesse stattfinden als bei 25°C.

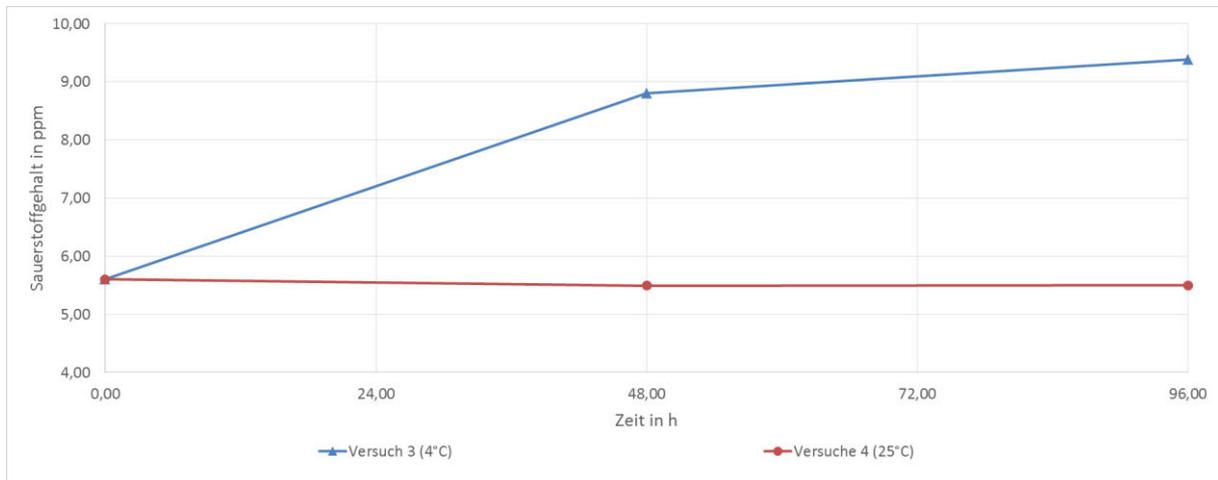


Abbildung 35: Sauerstoffkonzentrationen der Proben vom Versuch 3 (4°C) und 4 (25°C)

6.10 Elimination von Sulfamethoxazol

Die Eliminationsrate ergibt sich aus der Gleichung 1-1 in Kapitel 1.1.4. Für die gemessenen Konzentrationen \leq Nachweisgrenze (NG) wurde 50% des Wertes 2,29 ng/l der NG für die Berechnung der Elimination angenommen. Die Zulaufkonzentration ergibt sich aus der Tagesfracht aus Kapitel 5.10 mit theoretisch 500 ng/l. Jedoch hat sich in Kapitel 6.9 gezeigt, dass die Stammlösung eine geringere Konzentration im Versuchszeitraum von ca. 230 ng/l hatte. Mit einer Zulaufkonzentration von 230 ng/l und der gemessenen Ablaufkonzentration ergab sich folgende Eliminationsraten in Tabelle 26 (vgl. Anhang J). Bei der Durchführung der SPE wurde immer eine Negativprobe zur Kontrolle der SPE-Schläuche mit analysiert. Die gemessene Blindprobe enthielt bei allen Messungen kein SMX. Dadurch können Einflüsse durch die Schläuche der SPE ausgeschlossen werden.

Tabelle 26: Ergebnisse der Sulfamethoxazol Dosierung in LKA 2, basierend auf rechnerisch korrigierten Zulaufwerten

| Probe | Probennahme | Gemessene Ablauf-Konzentration in ng/l | Eliminationsrate in % |
|--------|-------------|--|-----------------------|
| A1toP1 | 22.05.2017 | ≤NG | 99,5 |
| A1toP2 | 22.05.2017 | ≤NG | 99,5 |
| A1t5P3 | 22.05.2017 | ≤NG | 99,5 |
| A1t5P4 | 22.05.2017 | ≤NG | 99,5 |
| A2toP1 | 22.05.2017 | ≤NG | 99,5 |
| A2toP2 | 22.05.2017 | ≤NG | 99,5 |
| A2t5P3 | 22.05.2017 | ≤NG | 99,5 |
| A2t5P4 | 22.05.2017 | ≤NG | 99,5 |
| AP5 | 24.05.2017 | ≤NG | 99,5 |
| AP6 | 24.05.2017 | ≤NG | 99,5 |
| AP7 | 26.05.2017 | ≤NG | 99,5 |
| AP8 | 26.05.2017 | ≤NG | 99,5 |
| AP9 | 29.05.2017 | ≤NG | 99,5 |
| AP10 | 29.05.2017 | ≤NG | 99,5 |
| AP11 | 31.05.2017 | ≤NG | 99,5 |
| AP12 | 31.05.2017 | 41,18 | 82,09 |
| AP13 | 02.06.2017 | 31,37 | 86,36 |
| AP14 | 02.06.2017 | 45,59 | 80,18 |
| AP15 | 05.06.2017 | 79,12 | 65,60 |
| AP16 | 05.06.2017 | 66,49 | 71,09 |

Es wurde eine mittlere Eliminationsrate von ca. 93,9% ± 2,07% für den gesamten Versuchszeitraum berechnet. Typische Eliminationswerte liegen zwischen 75 - 3% (vgl. Kapitel 1.1.4). Wird jedoch nur der Zeitraum vom 31.05 bis 05.06.2017 betrachtet, ergibt sich eine mittlere Elimination von 80,6% ± 6,85%. Diese Elimination würde sich auch mit den Literaturwerten decken. Die höhere Elimination im Zeitraum 22.05 bis 31.05.2017 kann eventuell durch den manuellen Schlammabzug hervorgerufen worden sein, da dieser erst nach der Dosierung und in einem Zeitraum von ca. 10 min über eine Pumpe aus dem Nitrifikationsbecken realisiert wurde. In diesem Zeitraum wurden auch größere Schlammengen abgezogen.

Der konstante Schlammabzug über 24 Stunden wurde erst ab dem 30.05.2017 umgesetzt, in diesem Zeitraum wurden auch geringere bzw. konstante Schlammengen abgezogen. Die Dosierung der gesamten Tagesfracht am Morgen könnte durch den nachfolgenden Schlammabzug dazu geführt haben, dass ein Teil der SMX Dosierung mit abgezogen wurde. Jedoch zeigen sich auch große Abweichungen bis zu ca. 17% am selben Proben Tag. Die Proben wurden wie in Kapitel bis zur Probenvorbereitung eingefroren und anschließend aufgetaut. Beim Auftauen konnte beobachtet werden, dass ein Fällungsprozess in der Probe stattfindet. Dieser Fällungsprozess konnte jedoch nicht bei allen Proben beobachtet werden. Des Weiteren konnte auch nicht festgestellt werden, ob tatsächlich ein Teil des SMXs ausfällt. In Tabelle 27 sind die Mittelwerte der photometrischen Messungen im Vergleich zu den angestrebten Ablaufkonzentrationen aufgeführt (vgl. Anhang K).

Tabelle 27: Ergebnisse der photometrischen Messungen als Mittelwert vom 28.04 bis 01.06.2017 im Vergleich zu angestrebten Ablaufkonzentrationen zusammengetragen aus verschiedenen Quellen

| Ablauf-Analyt | Mittelwerte in mg/l | | Richtwerte in mg/l |
|----------------------|---------------------|----------|--------------------|
| | LKA eins | LKA zwei | |
| Ammonium | 0,47 | 0,37 | ≤1* |
| Nitrit | 0,26 | 0,17 | ≤1* |
| Nitrat | 7,10 | 6,84 | ≤11* |
| Alkalinität | 3,95 | 3,18 | ≥2** |
| Phosphat | 2,90 | 3,22 | ≤1*** |
| CSB | 16,06 | 16,00 | ≤30**** |
| Zulauf-Analyt | | | |
| CSB | 593 | 591,5 | 600 |

* (DIN EN ISO, 2004)

** (Mudrack und Kunst, 2010)

*** (DWA, 2016)

**** (DWA, 2014)

Die beiden LKA zeigen nur leichte Abweichungen über den gesamten Versuchszeitraum untereinander. Der Ammoniumstickstoff und Nitritstickstoff konnte unter einer Ablaufkonzentration von 1 mg/l gehalten werden, solange keine Störung des Betriebes durch z.B. verstopfte oder geplatze Leitungen hervorgerufen wurde. Eine Störung durch eine Verstopfung des Zulaufes vom Denitrifikationsbecken zum Nitrifikationsbecken ist in der Nacht vom 22.05 zum 23.05.2017 bei der LKA 1 aufgetreten. Durch die Verstopfung erhöhten sich die Ammoniumstickstoff-Konzentration auf 24 mg/l und die CSB-Ablaufkonzentration auf 58 mg/l. Die Versuchsanlage LKA 2 lief im Versuchszeitraum ohne Störungen. Die angestrebten Ablaufwerte konnten über den gesamten Versuchszeitraum eingehalten werden.

Die LKA 2 hatte ab dem 16.05. einer geringen Säurekapazität als die LKA 1, jedoch sank die Säurekapazität schon vor Beginn der Dosierung von SMX daher ist ein direkter Zusammenhang nicht nachweisbar (vgl. Abbildung 36). Die pH-Werte sind nicht mit aufgeführt, da das verwendete pH-Messgerät im Versuchszeitraum ausgefallen ist. Daher könnte der eventuelle Einfluss von SMX auf den pH-Wert nicht bewiesen bzw. beobachtet werden. Es lässt sich durch die geringere Säurekapazität bei LKA 2 lediglich vermuten, dass sich der pH-Wert der LKA 2 durch die Zugabe von SMX verringert hat. Am 23.05.2017 wurde der Rücklaufstrom (Q_{RZ}) von ca. 34,5 ml/min der internen Zirkulation auf ca. 18 ml/min reduziert. Die Reduzierung des Rücklaufstromes verursachte einen leichten Anstieg der Nitratstickstoffkonzentration im Ablauf.

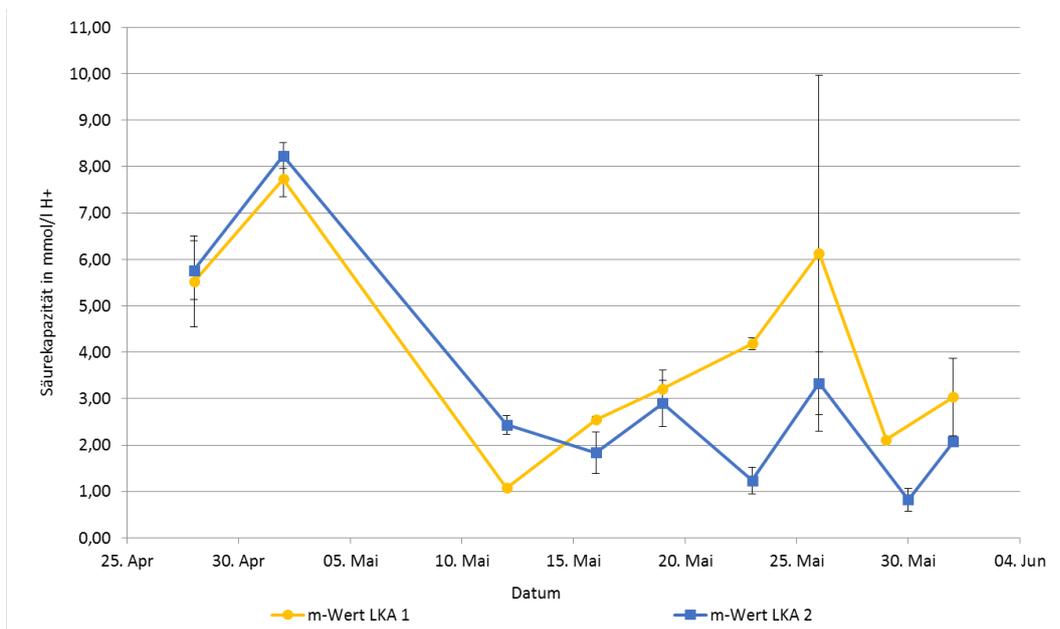


Abbildung 36: Ablaufkonzentration der Säurekapazität

7 Diskussion & Fazit

In dieser Bachelorarbeit konnte gezeigt werden, dass eine CSB-Zulaufkonzentration im Wochenmittel auf einen konstanten Wert eingestellt werden kann. Hierbei müssen jedoch die aufgezeigten Betriebsführungspunkte aus Kapitel 5.7 eingehalten werden, da auch ein Abbauprozess trotz Kühlung im Vorlagebehälter nachgewiesen wurde. Des Weiteren wurde der nicht unerhebliche Einfluss der Abbauprozesse und Ablagerungsprozesse in den Zulaufschläuchen festgestellt, weshalb eine regelmäßige Spülung der Schläuche erfolgen sollte. Außerdem sollte eine neue Positionierung des Vorlagebehälters und der Verlegung der Zulaufschläuche in Betracht gezogen werden, damit die Schlauchlängen gleich lang und so kurz wie möglich gehalten werden (vgl. Kapitel 6.6, Abschnitt: Überschussschlamm).

Durch die Umsetzung der Maßnahmen zur Blähschlamm Vermeidung aus DIN EN ISO 11733:2004 (D) konnte ein Zusammenhang zwischen Zulaufvolumenstrom und der Entstehung von Blähschlamm in der Nachklärung festgestellt werden. Durch die Verringerung des Zulaufvolumenstroms konnte ein besseres Absetzverhalten und Eindickung erreicht werden. Die beobachtete Gasblasenbildung in der Nachklärung weist auf längere Verweilzeiten hin. Hieraus resultierende Abbauprozesse führten wahrscheinlich zu einem geringeren Schlammindex, woraus eine zu große Schlammbelastung für die zulässige Flächenbeschickung hervorgerufen wurde und andererseits Schwimmschlamm entstanden ist. Des Weiteren beeinflusst zusätzlich die Temperierung der Becken die Strömungsverhältnisse am Beckeninnenrand, wodurch das wärmere Wasser am Rand nach oben strömt und für zusätzliche Turbulenzen und ein schlechteres Absetzverhalten sorgen kann (DIN EN ISO 11733, 2004 (D)). Weshalb bei zukünftigen Forschungsvorhaben ein Zulaufvolumenstrom von 7 ml/min nicht überschritten werden sollte.

Bei der Untersuchung des synthetischen Abwassers konnten partikuläre und gelöste Anteile der CSB-Fraktion bestimmt werden. Woraus eine höhere Überschussschlammproduktion nach DWA-A 131 resultiert (vgl. Gleichung 3-22), jedoch konnte dieser Anteil nicht konkret bestimmt werden. Hierbei wurde in Anlehnung an das Bemessungsschema aus DWA-A 131 näherungsweise die CSB-Zulaufkonzentration für verschiedene Schlammalter iterativ berechnet. Es konnte festgestellt werden, dass das Denitrifikationsbeckenvolumen im Verhältnis zum Belebungsbeckenvolumen etwas zu groß ist, wodurch eine zu geringe Überschussschlammproduktion, als praktisch ermittelt, berechnet wurde. Das etwas zu große Verhältnis von V_D/V_{BB} kann jedoch nicht allein für die vermehrte Überschussschlammmenge sein. Zudem konnte der große Einfluss der Überschussschlammproduktion aus der Phosphatelimination festgestellt werden. Sollten hierbei falsche Annahmen zur Berechnung des Überschussschlammes aus der Phosphatelimination getroffen worden sein, könnte die produzierte Schlammmenge größer ausfallen.

Des Weiteren könnte durch die Dosierung des Fällmittels als Tagesfracht am Morgen mehr Überschussschlamm produziert worden sein als in Gleichung 3-25 angenommen wird. Weshalb eine kontinuierliche Dosierung des Fällmittels über 24 h in Betracht gezogen werden sollte. Außerdem gelten die Annahmen für die Berechnungen der CSB-Fraktionen aus dem DWA-A 131 für kommunales Abwasser und groß Anlagen, in wie weit das verwendete synthetische Abwasser mit kommunalen Abwasser vergleicht werden kann, ist nicht bekannt. Das DWA-A 131 verweist für die Bemessung von kleinen Kläranlagen auf die Arbeitsblätter DWA-A 221, DWA-M 222 und DWA-A226. Um die Annahmen aus dieser Arbeit überprüfen zu können müssten genaue Analysen des synthetischen Abwassers durchgeführt werden und die Ausführungen der genannten Arbeitsblätter berücksichtigt werden.

Durch eine Verringerung der CSB-Zulaufkonzentration können die Schlammalter 10 d und 17 d eingestellt werden. Bei zukünftigen Forschungsvorhaben muss überprüft werden, ob mit den näherungsweise berechneten CSB-Zulaufkonzentrationen aus Kapitel 6.7 die Schlammalter eingestellt werden können. Zudem kann mit einer Erhöhung der Stickstoffzulaufmenge das Verhältnis aus Sauerstoffzehrung zu Sauerstoffangebot auf 1 eingestellt werden. In wie weit die Erhöhung tatsächlich eine Verringerung der Überschussschlammengen beeinflusst, müsste überprüft werden.

Bei den Vorversuchen zum Abbauverhalten des gereinigten Abwassers, konnten für beide Temperaturen (4°C und 25°C) Abbauvorgänge beobachtet werden. Ein Anstieg der Sauerstoffkonzentration bei den Versuchen mit einer Temperatur von 4°C lässt darauf schließen, dass geringere Abbauvorgänge als bei 25°C bestehen. Bei den Versuchen mit 4°C könnten die Abbauprozesse auch zu Beginn des Versuches stattgefunden haben, da die Proben eine Anfangstemperatur von 25°C hatten. Ein Abbau der SMX-Konzentration bei Versuch 1 und 2 konnte nicht festgestellt werden, da die Abweichung zu Beginn des Versuches zwischen Versuch 1 und 2 näherungsweise genau so groß waren wie die Abnahme der SMX-Konzentration am Ende des Versuches. Um eine eindeutige Aussage über Abbauvorgänge zur den Wasserparameter und zum Sulfamethoxazol machen zu können, müssten die Versuche über längere Zeit durchgeführt werden. Wo durch eventuell größere Unterschiede bei verschiedenen Temperaturen festgestellt werden könnten.

Die ermittelten Eliminationsraten des Antibiotikums SMX sind nicht aussagekräftig, weil sich die Berechnungen auf eine einmalige Messung der Zulaufkonzentration in Kapitel beziehen. Es konnte lediglich festgestellt werden, dass ein Abbau bzw. eine Umwandlung von SMX erfolgt und eine Dosierung als gesamte Tagesfracht am Morgen nicht realen Bedingungen entspricht. In weiteren Forschungsvorhaben sollte eine Dosierung über den Wasserzulauf geschehen und die Zulaufkonzentration kontinuierlich erfasst werden. Wodurch eine Aussage zur tatsächlichen Eliminationsrate der LKA getroffen werden könnte. Bei der Dosierung über den Versuchszeitraum konnte beim Vergleich der Wasserparameter nur geringe Unterschiede festgestellt werden, welche auch schon vor der Dosierung mit SMX beobachtet wurden. Um eventuelle Einflüsse auf die Schlammproduktion und die Reinigungsleistung der LKA durch SMX beurteilen zu können muss die Dosierung für einen längeren Zeitraum geschehen. Hierbei sollte die Zulaufkonzentration im Bereich von 1000 ng/l eingestellt (vgl. Kapitel 1.1.4) werden, damit reale Zulaufkonzentrationen und ein Vergleich mit kommunalen Kläranlagen möglich ist.

Literaturverzeichnis

- Abegglen, C., & Siegrist, H. (2012). *Mikroverunreinigungen aus kommunalem Abwasser. Verfahren zur weitergehenden Elimination auf Kläranlagen*. Bundesamt für Umwelt, Bern, Umwelt-Wissen Nr. 1214:210 S.
- AbwV. (21. März 1997). Abwasserverordnung in der Fassung der Bekanntmachung vom 17. Juni 2004 (BGBl. I S. 1108, 2625), die zuletzt. Deutschland: Ein Service des Bundesministeriums der Justiz und für Verbraucherschutz in Zusammenarbeit mit der juris GmbH - <https://www.gesetze-im-internet.de/abwv/AbwV.pdf>, Abgerufen um 12:30, am 05.07.2017.
- BLAC. (2003). *Arzneimittel in der Umwelt Auswertung der Untersuchungsergebnisse*. Hamburg: Freie und Hansestadt Hamburg-Behörde für Umwelt und Gesundheit-Institut für Hygiene und Umwelt.
- Cantas, L. S. (2013). A brief multi-disciplinary review on antimicrobial resistance in medicine and its linkage to the global environmental microbiota. *frontiers in Microbiology*.
- Chemie-master. (2017). *Löslichkeit von Sauerstoff in Wasser bei 1013,25 hPa*. Von Chemie-master: <http://www.chemie-master.de/FrameHandler.php?loc=http://www.chemie-master.de/pse/pse.php?modul=tab13> abgerufen (Abgerufen 08.08.2017)
- DART2020. (2015). *Antibiotika-Resistenzen bekämpfen zum Wohle von Mensch und Tier*. Berlin: Bundesministerium für Gesundheit.
- Demmer, J. (2016). *Fließschema der Laborkläranlage*. Hamburg: Projekt PharmCycle.
- DIN EN ISO 11733. (2004 (D)). *Wasserbeschaffenheit-Bestimmung der Elimination und der biologischen Abbaubarkeit organischer Verbindungen in einem wässrigen Medium-Belebschlamm-Simulation (ISO11733:2004); Deutsche Fassung EN ISO 11733:2004*. Berlin: Beuth Verlag GmbH.
- DWA. (2014). 27. Leistungsvergleich kommunaler Kläranlagen. Hennef: Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall e.V.
- DWA. (2016). *Bemessung von einstufigen Belebungsanlagen*. Hennef: Unter Mitarbeit von DWA-Fachausschüsse KA-5 und KA-6: Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft Abwasser und Abfall (DWA-Arbeitsblatt, A 131).
- Färber, H., Skutlarek, D., & Exner, M. (1999-2001). *Untersuchung von Krankenhausabwässern von kommunalem Abwasser sowie von Oberflächenwasser und Uferfiltraten auf Rückstände ausgewählter antibiotika*. Bonn: Institut für Hygiene und Öffentliche Gesundheit Universität Bonn.
- Fent, K. (2013). *Ökotoxikologie Umweltchemie-Toxikologie-Ökologie* (Bd. 4. Auflage). Rütli: Georg Thieme Verlag KG.
- Frimmel, F. H., & Müller, M. B. (2006). *Heil-Lasten Arzneimittelrückstände in Gewässern*. Karlsruhe: Springer-Verlag Berlin Heidelberg.
- GERMAP2015. (2016). *Antibiotika-Resistenz und -Verbrauch-Bericht über den Antibiotikaverbrauch und die Verbreitung von Antibiotikaresistenzen in der Human- und Veterinärmedizin in Deutschland*. Rheinbach: Antiinfectives Intelligence.

- Graefe, K. H., Lutz, W., & Bönisch, H. (2016). *Pharmakologie und Toxikologie* (Bd. 2). Würzburg/Bonn: Georg Thieme Verlag KG.
- Heidolph, I. (Feb. 2017). Betriebsanleitung. Hamburg: © Heidolph Instruments GmbH & Co. KG.
- Heitmann, M. (11. 07 2017). *Haw-Hamburg.de*. Von <https://www.haw-hamburg.de/forschung/projekte-uebersicht/projekt-news/projekt-news-detail/artikel/arzneimittelbelastung-in-gewaessern-projekt-pharmcycle-erforscht-loesungen.html> abgerufen
- Heseding, J. (2017). *Abwasseranalytik-SPE-Arbeitsanweisung*. Hamburg: Hochschule für Angewandte Wissenschaften Hamburg-PharmCycle.
- Hübner, D. m. (2016). *DLG-Expertenwissen 1/2016: Antibiotika - Fakten für eine sachliche Auseinandersetzung*. Frankfurt a. M.: DLG e.V.
- Koppe, P., & Stozek, A. (1990). Kommunales Abwasser- Seine Inhaltsstoffe nach Herkunft, Zusammensetzung und Reaktionen im Reinigungsprozeß einschließlich Kläranlagen. Essen: Vulkan-Verlag.
- LAWA-AO. (2016). *Mikroschadstoffe in Gewässern*. Magdeburg: LAWO-AO Geschäftsstelle-Ministerium für Landwirtschaft und Umwelt.
- Lübbert, C., Baars, C., Dayakar, A., Lippmann, N., Rodloff, A. C., Kinzig, M., & Sörgel, F. (2017). *Environmental pollution with antimicrobial agents from bulk drug manufacturing industries in Hyderabad, South India, is associated with dissemination of extended-spectrum beta-lactamase and carbapenemase-producing pathogens*. Berlin: Springer-Verlag Berlin Heidelberg.
- LUBW. (2014). *Spurestoffinventar der Fließgewässer in Baden-Württemberg*. Stuttgart: Ministerium für Umwelt, klima und Energiewirtschaft Baden-Württemberg.
- MACHEREY-NAGEL. (2017). *Wasseranalytik-Grundlagen der Wasseranalytik*. Düren: MACHEREY-NAGEL GmbH & Co. KG.
- Miehle, U. (2010). *Wirksamkeit technischer Barrieren zur Entfernung von anthropogenen Spurenstoffen-Kläranlagen und Raumfilter-*. Berlin: Fakultät III-Prozesswissenschaften-der Technischen Universität Berlin.
- Mudrack und Kunst. (2010). *Biologie der Abwasserreinigung* (Bd. 5 Auflage Hrsg). Heidelberg: Spektrum Akademischer Verlag.
- NDR, W. (2017). Tödliche Supererreger aus Pharmafabriken. *NDR Presse und Information*.
- Scharff, T. (2017). Inbetriebnahme einer Laborkläranlage zur Untersuchung des Abbaus von Antibiotika im Abwasser. (D. Umwelttechnik, Hrsg.) Hamburg: Hochschule für Angewandte Wissenschaften Hamburg.
- Türk, J., Dazio, M., Ebben, T., Hassani, V., Herbst, H., Hochstrat, R., . . . Wogens, T. (2013). *Abschlussbericht zum Forschungsvorhaben "Volkswirtschaftlicher Nutzen der Ertüchtigung kommunaler Kläranlagen zur Elimination von organischen Spurenstoffen, Arzneimitteln, Industriechemikalien, bakteriologisch relevante Keimen und Viren (TP 9)"*. Duisburg: Institut für Energie- und Umwelttechnik e.V. (IUTA).

Weiterbildendes Studium Wasser und Umwelt. (2009). *Abwasserbehandlung-Gewässerbelastung, Bemessungsgrundlagen, Mechanische Verfahren, Biologische Verfahren, Reststoffe aus der Abwasserbehandlung, Kleinkläranlagen* (Bd. 3. überarbeitete Auflage). (W. S. Umwelt, Hrsg.) Weimar: Universitätsverlag Weimar.

Winhaus-Labortechnik. (2016). WinLab Data-Line-Bedienunganleitung/Manual Sauerstoffmessgerät .

Eidesstattliche Erklärung

Hiermit erkläre ich, dass ich die vorliegende Bachelorarbeit mit dem Titel „Optimierung der verfahrenstechnischen Parameter einer Laborkläranlage zur Untersuchung des Abbaus von Antibiotika“ selbständig angefertigt habe. Es wurden nur die in der Arbeit ausdrücklich benannten Quellen und Hilfsmittel benutzt. Wörtlich oder sinngemäß übernommenes Gedankengut habe ich als solches kenntlich gemacht.

Ort und Datum

Unterschrift

Anhang A: Herstellerangaben zur Zusammensetzung der verwendeten Substanzen des OECD-Mediums

| | | | |
|--|---|---|---|
| <p>Harnstoff REF3941, Hersteller: Roth >99,5 %, p. a.</p> <p>Formel: CH4N2O Dichte: 1,323 Molekulargewicht: 60,06 g/mol</p> <p>Garantieanalyse Gehalt (aus N2) In CH5OH unlösliche Anteile Schmelzbereich Sulfatasche Chlorid (Cl) Sulfat (SO4) Ammonium (NH4) Schwermetalle (als Pb) Arsen (As) Eisen (Fe) Kupfer (Cu) Biuret</p> | <p>Natriumchlorid REF9265, Hersteller: Roth >99,8 %, mit Antikackmittel</p> <p>Formel: NaCl Dichte: 2,17 Molekulargewicht: 58,44 g/mol</p> <p>Typanalyse Gehalt Calcium (Ca) Magnesium (Mg) Trennmittel Schüttdichte</p> | <p>Pepton REF8203-SKG-F, Hersteller: SIGMA-ALDRICH Grade for biotechnological purposes assay ~1,3% total nitrogen (N) basis ~0,3 AN:TN ratio <1,7% <6% loss on drying 7,0±0,5 (2% in H2O) pH H2O: soluble 2%, clear, yellow to tan water soluble 2%, clear, faintly brown-yellow</p> | <p>Pepton REF8203-SKG-F, Hersteller: SIGMA-ALDRICH Grade for biotechnological purposes assay ~1,3% total nitrogen (N) basis ~0,3 AN:TN ratio <1,7% <6% loss on drying 7,0±0,5 (2% in H2O) pH H2O: soluble 2%, clear, yellow to tan water soluble 2%, clear, faintly brown-yellow</p> |
| <p>Magnesiumsulfat-Hepahydrat REF027, Hersteller: Roth >99 %, p. a., ACS</p> <p>Formel: MgSO4 · 7 H2O Dichte: 1,67 Molekulargewicht: 246,48 g/mol</p> <p>Garantieanalyse Gehalt (kompl.) pH-Wert In H2O unlösliche Anteile Chlorid (Cl) Phosphat (PO4) Nitrat (NO3) Ammonium (NH4) Schwermetalle (als Pb) Arsen (As) Kupfer (Cu) Kalium (K) Natrium (Na) Blei (Pb) Strontium (Sr) Calcium (Ca) Eisen (Fe) Mangan (Mn) Nickel (Ni) Silicium (Si) Zink (Zn)</p> | <p>Calciumchlorid-Dihydrat REF5239, Hersteller: Roth >99 %, p. a., ACS</p> <p>Formel: CaCl2 · 2 H2O Dichte: 1,85 Molekulargewicht: 147,02 g/mol</p> <p>Garantieanalyse Gehalt (kompl.) pH-Wert (5 %, Wasser) In H2O unlösliche Anteile Sulfat (SO4) Phosphat (PO4) Ammonium (NH4) Oxidierende Substanzen (als NO3) Barium (Ba) Blei (Pb) Eisen (Fe) Kalium (K) Kupfer (Cu) Magnesium (Mg) Mangan (Mn) Natrium (Na) Nickel (Ni) Schwermetalle (als Pb) Strontium (Sr) Zink (Zn)</p> | <p>Wasserfreies Dikaliumhydrogenphosphat REFP749, Hersteller: Roth >99 %, p. a., wasserfrei</p> <p>Formel: K2HPO4 Dichte: 2,44 Molekulargewicht: 174,18 g/mol</p> <p>Garantieanalyse Gehalt (acidim.) pH-Wert (5 %ige Lösung) In H2O unlösliche Anteile Trocknungsverlust (105 °C) N-Verbindungen (als N) Chlorid (Cl) Sulfat (SO4) Arsen (As) Blei (Pb) Cadmium (Cd) Calcium (Ca) Eisen (Fe) Kobalt (Co) Kupfer (Cu) Magnesium (Mg) Mangan (Mn) Nickel (Ni) Zink (Zn)</p> | <p>Wasserfreies Dikaliumhydrogenphosphat REFP749, Hersteller: Roth >99 %, p. a., wasserfrei</p> <p>Formel: K2HPO4 Dichte: 2,44 Molekulargewicht: 174,18 g/mol</p> <p>Garantieanalyse Gehalt (acidim.) pH-Wert (5 %ige Lösung) In H2O unlösliche Anteile Trocknungsverlust (105 °C) N-Verbindungen (als N) Chlorid (Cl) Sulfat (SO4) Arsen (As) Blei (Pb) Cadmium (Cd) Calcium (Ca) Eisen (Fe) Kobalt (Co) Kupfer (Cu) Magnesium (Mg) Mangan (Mn) Nickel (Ni) Zink (Zn)</p> |

Anhang B: Bemessungsschema der Denitrifikation nach DWA-A 131

| | | |
|---|--|---|
| Aerobes Schlammalter | $t_{TS,aerob,Bem} = PF \cdot 1,6 \cdot \frac{1}{\mu_{A,max}} = PF \cdot 1,6 \cdot \frac{1109^{(15-T)}}{0,47} \text{ (d)}$ | |
| Schätzung V_D/V_{BB} | $V_D/V_{BB} \text{ (-) (Schätzung: 0,2 - 0,6)}$ | |
| $t_{TS,Bem}$ | $t_{TS,Bem} = t_{TS,aerob,Bem} \cdot \frac{1}{1 - V_D/V_{BB}} \text{ (d)}$ | |
| Berechnung der Schlammproduktion | $X_{CSB,BM} = [C_{CSB,abb,ZB} \cdot Y_{CSB,abb} + C_{CSB,dos} \cdot Y_{CSB,dos}] \cdot \frac{1}{1 + b \cdot t_{TS} \cdot F_T} \text{ (mg/l)}$ $X_{CSB,inert,BM} = 0,2 \cdot X_{CSB,BM} \cdot b \cdot t_{TS} \cdot F_T \text{ (mg/l)}$ | |
| Ertragskoeffizienten | $Y_{CSB,abb} = 0,67 \text{ (kg CSB}_{BM}\text{/kg CSB}_{abb})$ $Y_{CSB,dos} = 0,42 - 0,45 \text{ (kg CSB}_{BM}\text{/kg CSB}_{dos}) \text{ gemäß Tabelle 1}$ | |
| Berechnung des zu denitrifizierenden Nitrats | $S_{NOS,D} = C_{N,ZB} - S_{orgN,AN} - S_{NH,AN} - S_{NOS,AN} - X_{orgN,BM} - X_{orgN,inert} \text{ (mg/l)}$ <ul style="list-style-type: none">$S_{orgN,AN} = 2 \text{ mg/l}$$S_{NH,AN} = 0 \text{ mg/l}$$S_{NOS,AN} = 0,8 \text{ bis } 0,6 S_{2,orgN,DW} \text{ (mg/l)}$$X_{orgN,BM} = 0,07 \cdot X_{CSB,BM} \text{ (mg/l)}$$X_{orgN,inert} = 0,03 \cdot (X_{CSB,inert,BM} + X_{CSB,inert,ZB}) \text{ (mg/l)}$ | |
| O_2 -Verbrauch für C-Abbau: | $OV_C = C_{CSB,abb,ZB} + C_{CSB,dos} - X_{CSB,BM} - X_{CSB,inert,BM} \text{ (mg/l)}$ | |
| - Gesamt; | 1) $OV_{C,la,vorg} = f_{CSB} \cdot C_{CSB,abb,ZB} \cdot (1 - Y) + C_{CSB,dos} \cdot (1 - Y_{CSB,dos}) \text{ (mg/l)}$ | |
| - Anteil „ OV_C “ des leicht abbaubaren CSB, separat für vorgeschaltete und intermittierende Denitrifikation; | 2) $OV_{C,la,int} = C_{CSB,dos} \cdot (1 - Y_{CSB,dos}) \text{ (mg/l), nur bei gezielter Dosierung in „Deniphase“}$ | |
| - „Sauerstoffverbrauch“ in der Denitrifikationszone | 1) $OV_{C,D} = 0,75 \cdot [OV_{C,la,vorg} + (OV_C - OV_{C,la,vorg}) \cdot (V_D/V_{BB})^{0,48}] \text{ (mg/l), vorgeschaltete Denitrifikation}$ 2) $OV_{C,D} = 0,75 \cdot [OV_{C,la,int} + (OV_C - OV_{C,la,int}) \cdot (V_D/V_{BB})] \text{ (mg/l), intermittierende Denitrifikation mit gezielter Dosierung}$ 3) $OV_{C,D} = 0,75 \cdot OV_C \cdot V_D/V_{BB} \text{ (mg/l), simultane Denitrifikation}$ | |
| | <ul style="list-style-type: none">Faktor für Nitratatemung = 0,75. Erhöhte Atmung in der Denitrifikationszone bei vorgeschalteter Denitrifikation - $(V_D/V_{BB})^{0,48}$$f_{CSB} = C_{CSB,la,ZB}/C_{CSB,abb,ZB}$ (Anteil leicht abbaubaren CSB bei kommunalem Abwasser 0,15 - 0,25; Abweichungen sind nachzuweisen) | |
| Vergleich von „ O_2 -Verbrauch“ und „ O_2 -Angebot“ | $x = \frac{OV_{C,D}}{2,86 \cdot S_{NOS,D}}$ | |
| | $x > 1$ | $x = 1$ |
| | $V_D/V_{BB} \downarrow$ bzw. $C_{CSB,dos} \downarrow$ | Bemessung \downarrow |
| | | $V_D/V_{BB} \uparrow$ bzw. $C_{CSB,dos} \uparrow$ |
| | $OS_d = OS_{d,C} + OS_{d,D}$ | |
| | TS_{BB} aus Bemessung NB (kg/m ³) | |
| | $V_{BB} = M_{TS,BB}/TS_{BB} = OS_d \cdot t_{TS}/TS_{BB} \text{ (m}^3\text{)}$ | |

Anhang C: Zusammenfassung zur Durchführung der photometrischen Messungen

NANOCOLOR® CSB 160 / COD / DCO / DQO

Method(e): 0261
15–160 mg/L O₂

20–80%: 15 44 131 160 mg/L O₂

REF 985 026

MACHEREY-NAGEL MN
www.mn-net.com

1 Probe / Sample
Échant. / Muestra
2.0 mL

2 Schütteln / Shake
Agiter / Agitar
REF: 916 37

3 160 °C / 30 min
148 °C / 2 h

4 Schütteln / Shake
Agiter / Agitar
warm / hot
chaud / cálido

5 20 °C–25 °C
Abkühlen / Cool
Refróidir / Enfriar

6 Säubern / Clean
Nettoyer / Limpiar

7 436 nm
Messen / Measure
Mesurer / Medir

A037165 / 985 026 / 10530

Arbeitsanweisung für die CSB-Messung im Messbereich von 15 – 160 mg/l. Die Arbeitsanweisung für die CSB-Messung im Messbereich von 2 – 40 mg/l ist gleich und daher nicht gesondert aufgeführt. Für die CSB-Messung ist keine Referenzprobe nötig (NULL ZERO), da diese im Photometer werkseitig gespeichert ist.

NANOCOLOR® gesamt-Phosphat 1 / Phosphate / Fosfato

Method(e): 0761 | 0762
0.05–1.50 mg/L P | 0.2–5.0 mg/L PO₄³⁻

20–80%: 0.05 0.34 1.21 1.50 mg/L P
0.2 1.2 4.0 5.0 mg/L PO₄³⁻

REF 985 076

MACHEREY-NAGEL MN
www.mn-net.com

1 Probe / Sample
Échant. / Muestra
4.0 mL
pH 0–10

2 1 x NANOFIX R2

3 Schütteln / Shake
Agiter / Agitar

4 120 °C / 30 min
100 °C / 1 h

5 20 °C–25 °C
Abkühlen / Cool
Refróidir / Enfriar

6 1 x NANOFIX R3

7 200 µL R4

8 Schütteln / Shake
Agiter / Agitar

9 Säubern / Clean
Nettoyer / Limpiar

10 690 nm
Messen / Measure
Mesurer / Medir

A037178 / 985 076 / 05514

Arbeitsanweisung für die Gesamtphosphat Messung im Messbereich 0,05 – 1,50 mg/l. Eine Referenzprobe (NULL ZERO) der unverdünnten Probe wird benötigt (MACHEREY-NAGEL, 2017).

visicolor[®] ECO Ammonium 3
Amonio

690 nm

Method(e) / Método

5081 0.1–2.0 mg/L NH₄-N
5082 0.1–2.5 mg/L NH₄⁺
5083 0.1–2.0 mg/L NH₃

Test 5-08

REF 931 208



Probe / sample
échantillon / muestra



Küvetten spülen
Rinse test tubes
Rincer les éprouvettes
Lavar los tubos



5 mL Probe
Sample
Echantillon
Muestra



10 ∆ NH₄-1



Schütteln
Shake
Agiter
Agitar



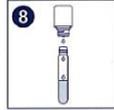
1 ∆ NH₄-2



Schütteln
Shake
Agiter
Agitar



5'00 min



4 ∆ NH₄-3



Schütteln
Shake
Agiter
Agitar



Säubern
Clean
Nettoyer
Limpiar



7'00 min



Messung
Measurement
Mesure
Medición

Arbeitsanweisung für die Ammonium Messung im Messbereich 0,1 – 2,0 mg/l. Eine Referenzprobe (NULL ZERO) der unverdünnten Probe wird benötigt (MACHEREY-NAGEL, 2017).

visicolor[®] ECO Nitrit
Nitrite / Nitrito

540 nm

Method(e) / Método

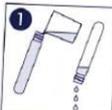
5441 0.01–0.15 mg/L NO₂-N
5442 0.02–0.50 mg/L NO₂⁻

Test 5-44

REF 931 244



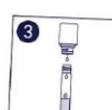
Probe / sample
échantillon / muestra



Küvetten spülen
Rinse test tubes
Rincer les éprouvettes
Lavar los tubos



5 mL Probe
Sample
Echantillon
Muestra



4 ∆ NO₂-1



Schütteln
Shake
Agiter
Agitar



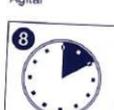
1 ∆ NO₂-2



Schütteln
Shake
Agiter
Agitar



Säubern
Clean
Nettoyer
Limpiar



10'00 min



Messung
Measurement
Mesure
Medición

Arbeitsanweisung für die Nitrit Messung im Messbereich 0,01 – 0,15 mg/l. Eine Referenzprobe (NULL ZERO) der unverdünnten Probe wird benötigt (MACHEREY-NAGEL, 2017).

visocolor® ECO Nitrat
Nitrate/Nitrato

436 nm

Method(e) / Método

5411
5412

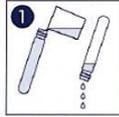
1,0–14,0 mg/L NO₃⁻
4–60 mg/L NO₃⁻

Test 5-41

REF 931 241



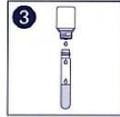
Probe / sample
échantillon / muestra



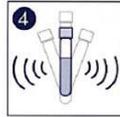
Küvetten spülen
Rinse test tubes
Rincer les éprouvettes
Lavar los tubos



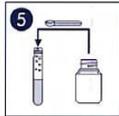
5 mL Probe
Sample
Echantillon
Muestra



5 ∆ NO₃-1



Schütteln
Shake
Agiter
Agitar



1 ∆ NO₃-2



1 min Kräftig schütteln
Shake well
Bien agiter
Agitar intensamente



Säubern
Clean
Nettoyer
Limpiar



5'00 min



Messung
Measurement
Measure
Medición

Arbeitsanweisung für die Nitrat Messung im Messbereich 1,0 – 14,0 mg/l. Eine Referenzprobe (NULL ZERO) der unverdünnten Probe wird benötigt (MACHERY-NAGEL, 2017).

visocolor® ECO Alkalinität TA
Alkalinity TA / Alcalinité TA / Alkalinidad TA

436/585 nm

Method(e) / Método

5041

0,3–14 °d

5042

0,10–5,00 mmol/L H⁺

5043

0,4–17,5 °e

5044

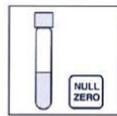
0,5–25,0 °f

5045

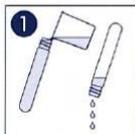
5–250 mg/L CaCO₃

Test 5-04

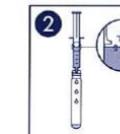
REF 931 204



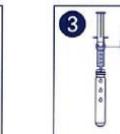
Probe / sample
échantillon / muestra



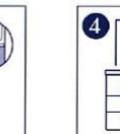
Küvetten spülen
Rinse test tubes
Rincer les éprouvettes
Lavar los tubos



5 mL Probe
Sample
Echantillon
Muestra



200 µL TA-1



1 NANOFIX TA-2



Schütteln
Shake
Agiter
Agitar



Säubern
Clean
Nettoyer
Limpiar



2'00 min



Messung
Measurement
Measure
Medición

Arbeitsanweisung für die Alkalinität (Säurekapazität) Messung im Messbereich 0,10 – 5,00 mmol/l H⁺. Eine Referenzprobe (NULL ZERO) der unverdünnten Probe wird benötigt (MACHERY-NAGEL, 2017).

Anhang D: Kalibrierung der Peristaltik-Pumpen „ heidolph-Hei-Flow Precision 01“

Hinweis: Regelgenauigkeit von $\pm 0,5\%$ und Fördermengenbereich für 1,7 innen \varnothing von 2-40 ml/min (H_2O). Die Fördermenge ist Abhängig von der benutzten Schlauchgröße, in diesem Fall wird ein Schlauch mit einem Innen-Durchmesser von 1,7 mm verwendet (Heidolph, Feb. 2017).

Pumpe anhand der Fördermenge (Flow) ml/min kalibrieren

1. Gerät muss einschaltet sein
2. Das zu fördernde Fluid ist an die Pumpe angeschlossen
3. Der korrekte Pumpenkopf und Schlauchdurchmesser ist eingestellt
4. Menü Punkt „Flow“ auswählen (LED leuchtet Grün)
5. Gewünschte Fördermenge einstellen
6. Die Taste „CAL“ drücken (Display blinkt)
7. Pumpe Starten über Einschalttaste, Pumpe fördert für genau 1 Min
8. Gefördertes Volumen auffangen und anschließend messen
9. Gemessenen Wert mittels Pfeiltasten einstellen und die „CAL“-Taste gedrückt halten bis im Display CAL erscheint
10. Diesen Vorgang solange wiederholen bis gewünschte Fördermenge eingestellt ist

Abbildung 37: Bedienfeld Hei-Flow Precision (Heidolph, Feb. 2017)

Hei-FLOW Precision: Bedienfeld



Anhang E: CSB-Messung zum Abbauverhalten im Vorlagebehälter bei 4°C

(Rot markierte Messwerte wurden nicht in die Mittelwertbildung einbezogen und werden als Messfehler betrachtet)

| Uhrzeit | Stunden in h | Stunden | Datum | Verdünnung | 1. in mgCSB/l | 2. in mgCSB/l | Mittelwert in mgCSB/l | Abweichung zum Soll | Stanbw. in mgCSB/l |
|---------|--------------|---------|------------|------------|---------------|---------------|-----------------------|---------------------|--------------------|
| 11:00 | 0,00 | 0,00 | 16.02.2017 | 25 | 1650 | 1850 | 1850 | -1,33% | #DIV/0! |
| 11:30 | 24,50 | 24,50 | 17.02.2017 | 25 | 1875 | 1850 | 1863 | -0,67% | 17,68 |
| 7:30 | 20,00 | 92,50 | 20.02.2017 | 25 | 875 | 900 | 888 | -52,67% | 17,68 |
| 11:00 | 0,00 | 0,00 | 20.02.2017 | 25 | 1850 | 1775 | 1813 | -3,33% | 53,03 |
| 11:00 | 24,00 | 24,00 | 21.02.2017 | 25 | 1875 | 1825 | 1850 | -1,33% | 35,36 |
| 11:00 | 24,00 | 48,00 | 22.02.2017 | 25 | 1750 | 1750 | 1750 | -6,67% | 0,00 |
| 11:00 | 24,00 | 72,00 | 23.02.2017 | 25 | 1650 | 1725 | 1688 | -10,00% | 53,03 |
| 11:00 | 24,00 | 96,00 | 24.02.2017 | 25 | 1325 | 1300 | 1313 | -30,00% | 17,68 |
| 12:00 | 0,00 | 0,00 | 13.03.2017 | 25 | 1925 | 1900 | 1913 | 2,00% | 17,68 |
| 11:00 | 23,00 | 46,50 | 15.03.2017 | 25 | 1850 | 1825 | 1838 | -2,00% | 17,68 |
| 10:30 | 23,50 | 70,00 | 16.03.2017 | 25 | 1775 | 1775 | 1775 | -5,33% | 0,00 |
| 10:00 | 23,50 | 93,50 | 17.03.2017 | 25 | 1825 | 1800 | 1813 | -3,33% | 17,68 |
| 11:00 | 0,00 | 0,00 | 27.03.2017 | 25 | 1900 | 1900 | 1900 | 1,33% | 0,00 |
| 11:00 | 24,00 | 72,00 | 30.03.2017 | 25 | 1775 | 1800 | 1788 | -4,67% | 17,68 |
| 11:00 | 24,00 | 96,00 | 31.03.2017 | 25 | 1050 | 1025 | 1038 | -44,67% | 17,68 |

| Mittelwerte | | | | | |
|-------------|------------|-------------------|------------|-----------------|-------------------------|
| Stunden h | Verdünnung | Gesamt in mgCSB/l | Abweichung | Soll in mgCSB/l | Standardabw. in mgCSB/l |
| 0,00 | 25 | 1869 | -0,3% | 1875 | 24 |
| 24,25 | 25 | 1856 | -1,0% | 1875 | 27 |
| 47,25 | 25 | 1794 | -4,3% | 1875 | 9 |
| 71,33 | 25 | 1750 | -6,7% | 1875 | 24 |
| 94,83 | 25 | 1079 | -42,4% | 1875 | 18 |

Anhang F: Auswirkung des Filtermaterials auf die Messung der CSB-Fractionen

| | | Auswirkung des Filters und der Probegefäße auf die CSB-Messung | | | | | | | | | | | |
|------------|---------|--|-----------------------------|----|--|----|---|-------------|-------------------------|-------------|--------------------------------|----|--|
| Datum | Uhrzeit | Probenvolumen in ml | Reinstwasser vor Filtration | | Reinstwasser nur durch das Unterdruckgerät laufen lassen | | Reinstwasser nach dem Filtern im Probegefäß | | Standardabw. in mgCSB/l | | Reinstwasser nur im Probegefäß | | |
| | | | Messung in mg CSB/l | | Messung in mg CSB/l | | Messung in mg CSB/l | | mgCSB/l | | Messung in mg CSB/l | | |
| | | | 1. | 2. | 1. | 2. | 1. | 2. | 1. | 2. | 1. | 2. | |
| 09.06.2017 | 10:00 | 45 | <2 | <2 | <2 | <2 | 10 | 11 | 0,71 | 3 | <2 | | |
| 12.06.2017 | 10:00 | 45 | <2 | <2 | - | - | 11 | 11 | 0,00 | - | - | | |
| | | 45 | <2 | <2 | - | - | 13 | 12 | 0,71 | - | - | | |
| | | 45 | <2 | <2 | - | - | 12 | 12 | 0,00 | - | - | | |
| 13.06.2017 | 10:00 | 45 | <2 | <2 | - | - | 10 | 10 | 0,00 | - | - | | |
| | | 45 | <2 | <2 | - | - | 9 | 9 | 0,00 | - | - | | |
| | | 45 | <2 | <2 | - | - | 9 | 9 | 0,00 | - | - | | |
| 14.06.2017 | 10:00 | 45 | <2 | <2 | - | - | 10 | 10 | 0,00 | - | - | | |
| | | 45 | <2 | <2 | - | - | 13 | 14 | 0,71 | - | - | | |
| | | 45 | <2 | <2 | - | - | 12 | 13 | 0,71 | - | - | | |
| | | | | | | | Mittelwert | 10,9 | 11,1 | 0,28 | | | |
| | | | | | | | Abweichung | 11 | + - 0,28 | | | | |

Anhang F.1: CSB-Fraktionierung im Zulauf (Vorlagebehälter) bei 1875 mgCSB/l

(Rot markierte Zellen wurden nicht in die Mittelwertbildung einbezogen und werden als Messfehler betrachtet)

| Messung der gesamten CSB-Fraktion (vor der Filtration) | | | | | | | | | |
|--|----------------------|--------------------------|--------------------|-------------------|--------------------------|---------------------|-----------------------|-------------------------|-------------------|
| Datum | Uhrzeit | Probenahme | Vorgangsalter in h | Verdünnungsfaktor | Proben Volumen in ml | Messung in mgCSB/l | Mittelwert in mgCSB/l | Standardabw. in mgCSB/l | Standardabw. in % |
| 16.05.2017 | 10:30 | | 0,25 | 25 | 45 | 1925 | 1825 | 1875 | 71 |
| 17.05.2017 | 10:15 | | 24,00 | 25 | 45 | 1925 | 1925 | 1925 | 0 |
| 18.05.2017 | 10:15 | | 48,00 | 25 | 45 | 1725 | 1700 | 1713 | 18 |
| 19.05.2017 | 10:15 | | 72,00 | 25 | 45 | 1550 | 1475 | 1513 | 53 |
| 29.05.2017 | 09:45 | | 0,50 | 25 | 45 | 1750 | 1750 | 1750 | 0 |
| 30.05.2017 | 09:30 | | 24,00 | 25 | 45 | 1850 | 1850 | 1850 | 0 |
| 31.05.2017 | 09:30 | | 48,00 | 25 | 45 | 1675 | 1725 | 1700 | 35 |
| 09.06.2017 | 09:30 | | 72,00 | 25 | 45 | 1550 | 1500 | 1525 | 35 |
| Messung der gelösten Anteile der CSB-Fraktion (nach Filtration mit 0,45µm) | | | | | | | | | |
| Datum | Uhrzeit | Probenahme | Vorgangsalter in h | Verdünnungsfaktor | Proben Volumen in ml | Messung in mgCSB/l | Mittelwert in mgCSB/l | Standardabw. in mgCSB/l | Standardabw. in % |
| 16.05.2017 | 10:30 | | 0,25 | 25 | 45 | 1425 | 1500 | 1463 | 53 |
| 17.05.2017 | 10:15 | | 24,00 | 25 | 45 | 1500 | 2200 | 1500 | #DIV/0! |
| 18.05.2017 | 10:15 | | 48,00 | 25 | 45 | 1400 | 1400 | 1400 | 0 |
| 19.05.2017 | 10:15 | | 72,00 | 25 | 45 | 1050 | 1050 | 1050 | 0 |
| 29.05.2017 | 09:45 | | 0,50 | 25 | 45 | 1475 | 1500 | 1488 | 18 |
| 30.05.2017 | 09:30 | | 24,00 | 25 | 45 | 1500 | 1500 | 1500 | 0 |
| 31.05.2017 | 09:30 | | 48,00 | 25 | 45 | 1400 | 1425 | 1413 | 18 |
| 09.06.2017 | 09:30 | | 72,00 | 25 | 45 | 775 | 1050 | 1050 | #DIV/0! |
| CSB-Fraktionierung im Vorlagebehälter | | | | | | | | | |
| Datum | Uhrzeit | Probenahme | Vorgangsalter in h | Verdünnungsfaktor | Proben Volumen in ml | Messung in mgCSB/l | Mittelwert in mgCSB/l | Standardabw. in mgCSB/l | Standardabw. in % |
| 16.05.2017 | 10:30 | | 0,25 | 25 | 45 | 1925 | 1825 | 1875 | 71 |
| 17.05.2017 | 10:15 | | 24,00 | 25 | 45 | 1925 | 1925 | 1925 | 0 |
| 18.05.2017 | 10:15 | | 48,00 | 25 | 45 | 1725 | 1700 | 1713 | 18 |
| 19.05.2017 | 10:15 | | 72,00 | 25 | 45 | 1550 | 1475 | 1513 | 53 |
| 29.05.2017 | 09:45 | | 0,50 | 25 | 45 | 1750 | 1750 | 1750 | 0 |
| 30.05.2017 | 09:30 | | 24,00 | 25 | 45 | 1850 | 1850 | 1850 | 0 |
| 31.05.2017 | 09:30 | | 48,00 | 25 | 45 | 1675 | 1725 | 1700 | 35 |
| 09.06.2017 | 09:30 | | 72,00 | 25 | 45 | 1550 | 1500 | 1525 | 35 |
| Messung der gelbsten Anteile der CSB-Fraktion (nach Filtration mit 0,45µm) | | | | | | | | | |
| Datum | Uhrzeit | Probenahme | Vorgangsalter in h | Verdünnungsfaktor | Proben Volumen in ml | Messung in mgCSB/l | Mittelwert in mgCSB/l | Standardabw. in mgCSB/l | Standardabw. in % |
| 16.05.2017 | 10:30 | | 0,25 | 25 | 45 | 1425 | 1500 | 1463 | 53 |
| 17.05.2017 | 10:15 | | 24,00 | 25 | 45 | 1500 | 2200 | 1500 | #DIV/0! |
| 18.05.2017 | 10:15 | | 48,00 | 25 | 45 | 1400 | 1400 | 1400 | 0 |
| 19.05.2017 | 10:15 | | 72,00 | 25 | 45 | 1050 | 1050 | 1050 | 0 |
| 29.05.2017 | 09:45 | | 0,50 | 25 | 45 | 1475 | 1500 | 1488 | 18 |
| 30.05.2017 | 09:30 | | 24,00 | 25 | 45 | 1500 | 1500 | 1500 | 0 |
| 31.05.2017 | 09:30 | | 48,00 | 25 | 45 | 1400 | 1425 | 1413 | 18 |
| 09.06.2017 | 09:30 | | 72,00 | 25 | 45 | 775 | 1050 | 1050 | #DIV/0! |
| CSB-Fraktionen Mittelwerte der Messungen | | | | | | | | | |
| Vorgangsalter in h | gelbster Anteil in % | partikulärer Anteil in % | Standardabw. in % | Wechselintervalle | partikulärer Anteil in % | gelöste Anteil in % | f _{CSB,25} | f _{CSB,25} | |
| 0,38 | 81,38 | 18,62 | 2,15 | Mo.-Mit. | 18,91 | 81,09 | | | |
| 24,00 | 79,47 | 20,53 | 0,00 | Mit.-Fr. | 18,91 | 81,09 | 0,2050 | 0,2050 | |
| 48,00 | 82,42 | 17,58 | 1,09 | Fr.-Mo. | 23,69 | 76,31 | 0,7950 | 0,7950 | |
| 72,00 | 69,14 | 30,86 | 1,94 | | | | | | |

Anhang G: Schlamm Bilanzierung LKA 1 und 2

Trockensubstanzgehalt, Überschussschlamm (Verluste durch Probenahme schon berücksichtigt (siehe w.u.) und Schlammalter.

| Anlage 1 | | | | | | | | | |
|------------|------------|-------------------------|--------------------------|---------------|----------------------|--------------------------|------------------------------------|----------------------|--------------------------------|
| Wochentag | Datum | TS _{BB} in g/l | TS _{Üsd} in g/l | Stabw. in g/l | Schlammbabzug in l/d | Q _{Üs,d} in g/d | Q _{Üs,d} in g/d 7 Tage MW | t _{TS} in d | t _{TS} in d 7 Tage MW |
| Freitag | 28.04.2017 | 4,45 | 4,45 | | 3,00 | 13,43 | | 2,72 | |
| Mittwoch | 03.05.2017 | 2,77 | 2,80 | | 1,00 | 2,86 | | 7,94 | |
| Donnerstag | 04.05.2017 | 5,24 | 3,00 | | 0,40 | 21,48 | | 2,00 | |
| Freitag | 05.05.2017 | 6,21 | 4,80 | | 0,23 | 5,17 | | 9,85 | |
| Montag | 08.05.2017 | 3,33 | 8,41 | | 1,25 | 10,61 | | 2,58 | |
| Dienstag | 09.05.2017 | 2,77 | 3,67 | | 2,50 | 9,22 | | 2,47 | |
| Mittwoch | 10.05.2017 | 2,44 | 0,00 | | 0,00 | 2,77 | | 7,21 | |
| Freitag | 12.05.2017 | 2,56 | 3,17 | 0,13 | 0,50 | 2,61 | 2,69 | 8,04 | 7,80 |
| Montag | 15.05.2017 | 3,45 | 3,17 | 0,06 | 0,40 | 3,76 | 3,05 | 7,52 | 9,29 |
| Dienstag | 16.05.2017 | 3,77 | 2,79 | 0,28 | 0,50 | 4,06 | 3,30 | 7,62 | 9,37 |
| Mittwoch | 17.05.2017 | 3,52 | 4,47 | 0,11 | 1,00 | 4,52 | 3,55 | 6,38 | 8,14 |
| Donnerstag | 18.05.2017 | 3,00 | 3,47 | 0,13 | 0,80 | 2,83 | 3,43 | 8,69 | 7,18 |
| Freitag | 19.05.2017 | 2,99 | 3,48 | 0,04 | 0,48 | 1,71 | 3,18 | 14,32 | 7,70 |
| Montag | 22.05.2017 | 3,35 | 2,64 | 0,16 | 0,85 | 3,79 | 3,33 | 7,24 | 8,25 |
| Dienstag | 23.05.2017 | 3,44 | 2,93 | 0,11 | 0,70 | 2,87 | 3,36 | 9,83 | 8,38 |
| Mittwoch | 24.05.2017 | 3,20 | 1,99 | 0,20 | 0,90 | 1,85 | 3,09 | 14,20 | 8,49 |
| Freitag | 26.05.2017 | 3,40 | 3,17 | 0,29 | 0,70 | 3,11 | 2,95 | 8,97 | 9,44 |
| Montag | 29.05.2017 | 3,36 | 3,11 | 0,15 | 0,50 | 1,62 | 2,54 | 17,01 | 10,85 |
| Dienstag | 30.05.2017 | 2,88 | 4,00 | 0,17 | 0,70 | 2,86 | 2,54 | 8,25 | 9,28 |
| Mittwoch | 31.05.2017 | 3,11 | 3,72 | 0,10 | 0,70 | 4,50 | 2,94 | 5,66 | 8,65 |
| Donnerstag | 01.06.2017 | 2,96 | 2,45 | 0,15 | 0,70 | 1,76 | 2,65 | 13,78 | 9,15 |
| Freitag | 02.06.2017 | 2,85 | 2,92 | 0,26 | 0,70 | 2,10 | 2,54 | 11,15 | 9,20 |

| Anlage 2 | | | | | | | | | |
|------------|------------|-------------------------|--------------------------|---------------|----------------------|--------------------------|------------------------------------|----------------------|--------------------------------|
| Wochentag | Datum | TS _{BB} in g/l | TS _{Üsd} in g/l | Stabw. in g/l | Schlammbabzug in l/d | Q _{Üs,d} in g/d | Q _{Üs,d} in g/d 7 Tage MW | t _{TS} in d | t _{TS} in d 7 Tage MW |
| Freitag | 28.04.2017 | 5,51 | 5,51 | | 3,00 | 16,62 | | 2,72 | |
| Mittwoch | 03.05.2017 | 3,87 | 3,87 | | 1,20 | 4,70 | | 6,75 | |
| Donnerstag | 04.05.2017 | 4,00 | 3,30 | | 0,75 | 3,63 | | 9,03 | |
| Freitag | 05.05.2017 | 4,79 | 6,12 | | 0,26 | 8,11 | | 4,84 | |
| Montag | 08.05.2017 | 3,27 | 3,71 | | 1,25 | 4,71 | | 5,69 | |
| Dienstag | 09.05.2017 | 2,22 | 4,43 | | 2,50 | 11,12 | | 1,63 | |
| Mittwoch | 10.05.2017 | 2,20 | 0,33 | | 5,00 | 1,84 | | 9,82 | |
| Freitag | 12.05.2017 | 2,47 | 3,03 | 0,14 | 0,50 | 3,74 | 2,79 | 5,41 | 7,26 |
| Montag | 15.05.2017 | 3,28 | 3,43 | 0,10 | 0,40 | 3,65 | 3,08 | 7,37 | 8,75 |
| Dienstag | 16.05.2017 | 3,28 | 4,72 | 0,09 | 0,80 | 3,82 | 3,26 | 7,05 | 8,25 |
| Mittwoch | 17.05.2017 | 3,32 | 3,05 | 0,28 | 0,80 | 2,82 | 3,17 | 9,65 | 8,58 |
| Donnerstag | 18.05.2017 | 3,20 | 3,08 | 0,41 | 0,80 | 2,52 | 3,06 | 10,40 | 8,56 |
| Freitag | 19.05.2017 | 2,84 | 2,92 | 0,07 | 0,48 | 1,44 | 2,83 | 16,17 | 8,22 |
| Montag | 22.05.2017 | 3,11 | 2,41 | 0,14 | 0,80 | 3,08 | 3,01 | 8,28 | 8,47 |
| Dienstag | 23.05.2017 | 3,47 | 2,52 | 0,18 | 0,60 | 4,51 | 3,12 | 6,30 | 9,11 |
| Mittwoch | 24.05.2017 | 3,33 | 2,63 | 0,21 | 0,90 | 2,43 | 2,95 | 11,23 | 9,28 |
| Freitag | 26.05.2017 | 3,33 | 3,40 | 0,17 | 0,70 | 2,44 | 2,75 | 11,21 | 9,94 |
| Montag | 29.05.2017 | 3,05 | 4,12 | 0,09 | 0,53 | 2,26 | 2,67 | 11,09 | 9,38 |
| Dienstag | 30.05.2017 | 2,88 | 4,59 | 0,19 | 0,70 | 3,28 | 2,78 | 7,21 | 8,51 |
| Mittwoch | 31.05.2017 | 2,81 | 2,63 | 0,12 | 0,70 | 1,93 | 2,85 | 11,97 | 8,11 |
| Donnerstag | 01.06.2017 | 2,83 | 2,79 | 0,09 | 0,70 | 2,12 | 2,71 | 10,94 | 8,56 |
| Freitag | 02.06.2017 | 2,83 | 2,65 | 0,07 | 0,70 | 1,93 | 2,34 | 11,98 | 9,90 |

Schlammverluste / Abzüge durch Probennahme. Diese Anteile sind in der Tabelle zum Überschuss-
schlamm rechnerisch berücksichtigt.

| Anlage 1 | | | | | | | |
|------------|-------------------------|-------------------------|------------|--------------------------------------|--------------------------------------|--------------------------------|-------------------|
| Datum | TS _{BB} in g/l | TS _{RS} in g/l | Abzug in l | ÜS _{d,Verlust, TSBB} in g/d | ÜS _{d,Verlust, TSRS} in g/d | ÜS _{d,Verlust} in g/d | 7 Tages MW in g/d |
| 28.04.2017 | 4,45 | 5,07 | 0,008 | 0,03 | 0,04 | 0,07 | 0,07 |
| 02.05.2017 | 3,56 | 4,77 | 0,008 | 0,03 | 0,04 | 0,06 | 0,07 |
| 03.05.2017 | 2,77 | 4,07 | 0,008 | 0,02 | 0,03 | 0,05 | 0,06 |
| 04.05.2017 | 5,24 | 5,33 | 0,008 | 0,04 | 0,04 | 0,08 | 0,07 |
| 05.05.2017 | 6,21 | 6,12 | 0,008 | 0,05 | 0,05 | 0,09 | 0,07 |
| 08.05.2017 | 3,33 | 3,64 | 0,008 | 0,03 | 0,03 | 0,05 | 0,07 |
| 09.05.2017 | 2,77 | 3,01 | 0,008 | 0,02 | 0,02 | 0,04 | 0,06 |
| 10.05.2017 | 2,44 | 2,89 | 0,008 | 0,02 | 0,02 | 0,04 | 0,06 |
| 11.05.2017 | 3,00 | 4,12 | 0,008 | 0,02 | 0,03 | 0,05 | 0,06 |
| 12.05.2017 | 2,56 | 3,13 | 0,008 | 0,02 | 0,02 | 0,04 | 0,06 |
| 15.05.2017 | 3,45 | 3,97 | 0,008 | 0,03 | 0,03 | 0,06 | 0,05 |
| 16.05.2017 | 3,77 | 4,09 | 0,008 | 0,03 | 0,03 | 0,06 | 0,05 |
| 17.05.2017 | 3,52 | 4,05 | 0,008 | 0,03 | 0,03 | 0,06 | 0,05 |
| 18.05.2017 | 3,00 | 6,69 | 0,008 | 0,02 | 0,05 | 0,07 | 0,05 |
| 19.05.2017 | 2,99 | 3,80 | 0,008 | 0,02 | 0,03 | 0,05 | 0,06 |
| 22.05.2017 | 3,35 | 4,69 | 0,008 | 0,03 | 0,04 | 0,06 | 0,06 |
| 23.05.2017 | 3,44 | 5,48 | 0,008 | 0,03 | 0,04 | 0,07 | 0,06 |
| 24.05.2017 | 3,20 | 5,47 | 0,008 | 0,03 | 0,04 | 0,07 | 0,06 |
| 26.05.2017 | 3,40 | 4,85 | 0,008 | 0,03 | 0,04 | 0,06 | 0,06 |
| 29.05.2017 | 3,36 | 2,12 | 0,008 | 0,03 | 0,02 | 0,04 | 0,06 |
| 30.05.2017 | 2,88 | 2,96 | 0,008 | 0,02 | 0,02 | 0,04 | 0,06 |
| 31.05.2017 | 3,11 | 4,21 | 0,008 | 0,02 | 0,03 | 0,05 | 0,06 |
| 01.06.2017 | 2,96 | 4,63 | 0,008 | 0,02 | 0,03 | 0,06 | 0,06 |
| 02.06.2017 | 2,85 | 5,36 | 0,008 | 0,02 | 0,04 | 0,06 | 0,06 |

| Anlage 2 | | | | | | | |
|------------|-------------------------|-------------------------|------------|--------------------------------------|--------------------------------------|--------------------------------|-------------------|
| Datum | TS _{BB} in g/l | TS _{RS} in g/l | Abzug in l | ÜS _{d,Verlust, TSBB} in g/d | ÜS _{d,Verlust, TSRS} in g/d | ÜS _{d,Verlust} in g/d | 7 Tages MW in g/d |
| 28.04.2017 | 5,51 | 7,39 | 0,008 | 0,04 | 0,06 | 0,10 | 0,10 |
| 02.05.2017 | 3,60 | 4,27 | 0,008 | 0,03 | 0,03 | 0,06 | 0,08 |
| 03.05.2017 | 3,87 | 4,67 | 0,008 | 0,03 | 0,04 | 0,06 | 0,07 |
| 04.05.2017 | 4,00 | 4,44 | 0,008 | 0,03 | 0,03 | 0,06 | 0,07 |
| 05.05.2017 | 4,79 | 4,84 | 0,008 | 0,04 | 0,04 | 0,07 | 0,07 |
| 08.05.2017 | 3,27 | 3,64 | 0,008 | 0,02 | 0,03 | 0,05 | 0,07 |
| 09.05.2017 | 2,22 | 2,39 | 0,008 | 0,02 | 0,02 | 0,03 | 0,06 |
| 10.05.2017 | 2,20 | 2,60 | 0,008 | 0,02 | 0,02 | 0,04 | 0,05 |
| 11.05.2017 | 3,09 | 4,57 | 0,008 | 0,02 | 0,03 | 0,06 | 0,05 |
| 12.05.2017 | 2,47 | 2,76 | 0,008 | 0,02 | 0,02 | 0,04 | 0,05 |
| 15.05.2017 | 3,28 | 3,53 | 0,008 | 0,02 | 0,03 | 0,05 | 0,05 |
| 16.05.2017 | 3,28 | 4,09 | 0,008 | 0,02 | 0,03 | 0,06 | 0,05 |
| 17.05.2017 | 3,32 | 3,72 | 0,008 | 0,02 | 0,03 | 0,05 | 0,05 |
| 18.05.2017 | 3,20 | 3,67 | 0,008 | 0,02 | 0,03 | 0,05 | 0,05 |
| 19.05.2017 | 2,84 | 3,68 | 0,008 | 0,02 | 0,03 | 0,05 | 0,05 |
| 22.05.2017 | 3,11 | 6,28 | 0,008 | 0,02 | 0,05 | 0,07 | 0,05 |
| 23.05.2017 | 3,47 | 4,29 | 0,008 | 0,03 | 0,03 | 0,06 | 0,06 |
| 24.05.2017 | 3,33 | 4,99 | 0,008 | 0,02 | 0,04 | 0,06 | 0,06 |
| 26.05.2017 | 3,33 | 5,40 | 0,008 | 0,03 | 0,04 | 0,07 | 0,06 |
| 29.05.2017 | 3,05 | 8,85 | 0,008 | 0,02 | 0,07 | 0,09 | 0,06 |
| 30.05.2017 | 2,88 | 4,87 | 0,008 | 0,02 | 0,04 | 0,06 | 0,06 |
| 31.05.2017 | 2,81 | 7,53 | 0,008 | 0,02 | 0,06 | 0,08 | 0,07 |
| 01.06.2017 | 2,83 | 6,52 | 0,008 | 0,02 | 0,05 | 0,07 | 0,07 |
| 02.06.2017 | 2,83 | 5,03 | 0,008 | 0,02 | 0,04 | 0,06 | 0,07 |

Standardabweichungen der Trockensubstanzgehalte zur Berechnung der Standardabweichung des Schlammalters nach partieller Ableitung.

| Standardabweichung LKA 1 | | | | | | |
|--------------------------|------|------|----------------|-------|--------|--------------|
| Δ TSBB | TSBB | TSRS | Δ TSÜSd | TSÜSd | ÜSd,v* | Δ tTS |
| 0,06 | 0,14 | 0,07 | 0,04 | 0,13 | 0,00 | 0,27 |
| 0,04 | 0,13 | 0,08 | 0,02 | 0,06 | 0,00 | 0,12 |
| 0,02 | 0,06 | 0,15 | 0,06 | 0,28 | 0,00 | 0,11 |
| 0,02 | 0,06 | 0,15 | 0,03 | 0,11 | 0,00 | 0,13 |
| 0,03 | 0,11 | 0,15 | 0,04 | 0,13 | 0,00 | 0,21 |
| 0,06 | 0,16 | 0,17 | 0,01 | 0,04 | 0,00 | 0,30 |
| 0,02 | 0,06 | 0,13 | 0,06 | 0,16 | 0,00 | 0,32 |
| 0,03 | 0,10 | 0,10 | 0,04 | 0,11 | 0,00 | 0,28 |
| 0,05 | 0,18 | 0,17 | 0,08 | 0,20 | 0,00 | 0,55 |
| 0,04 | 0,12 | 0,07 | 0,09 | 0,29 | 0,00 | 0,30 |
| 0,04 | 0,12 | 0,03 | 0,04 | 0,15 | 0,00 | 0,25 |
| 0,03 | 0,09 | 0,08 | 0,04 | 0,17 | 0,00 | 0,13 |
| 0,05 | 0,13 | 0,23 | 0,04 | 0,10 | 0,00 | 0,21 |
| 0,06 | 0,17 | 0,22 | 0,05 | 0,15 | 0,00 | 0,44 |
| 0,08 | 0,22 | 0,18 | 0,10 | 0,26 | 0,00 | 0,64 |

| Standardabweichung LKA 2 | | | | | | |
|--------------------------|------|------|----------------|-------|--------|--------------|
| Δ TSBB | TSBB | TSRS | Δ TSÜSd | TSÜSd | ÜSd,v* | Δ tTS |
| 0,03 | 0,07 | 0,04 | 0,05 | 0,14 | 0,00 | 0,24 |
| 0,08 | 0,28 | 0,15 | 0,03 | 0,10 | 0,00 | 0,23 |
| 0,02 | 0,07 | 0,08 | 0,02 | 0,09 | 0,00 | 0,08 |
| 0,04 | 0,13 | 0,10 | 0,06 | 0,28 | 0,00 | 0,15 |
| 0,03 | 0,08 | 0,05 | 0,14 | 0,41 | 0,00 | 0,52 |
| 0,04 | 0,12 | 0,14 | 0,04 | 0,07 | 0,00 | 0,55 |
| 0,04 | 0,13 | 0,11 | 0,04 | 0,14 | 0,00 | 0,16 |
| 0,02 | 0,08 | 0,17 | 0,06 | 0,18 | 0,00 | 0,29 |
| 0,06 | 0,19 | 0,15 | 0,11 | 0,21 | 0,00 | 1,13 |
| 0,03 | 0,11 | 0,22 | 0,06 | 0,17 | 0,00 | 0,24 |
| 0,06 | 0,18 | 0,20 | 0,05 | 0,09 | 0,00 | 0,84 |
| 0,03 | 0,07 | 0,12 | 0,07 | 0,19 | 0,00 | 0,27 |
| 0,06 | 0,18 | 0,26 | 0,03 | 0,12 | 0,00 | 0,14 |
| 0,03 | 0,10 | 0,09 | 0,05 | 0,09 | 0,00 | 0,55 |
| 0,07 | 0,21 | 0,31 | 0,03 | 0,07 | 0,00 | 0,47 |

$$\Delta e = \left| \frac{\partial f}{\partial x} \right| \cdot \Delta x + \left| \frac{\partial f}{\partial y} \right| \cdot \Delta y + \left| \frac{\partial f}{\partial z} \right| \cdot \Delta z$$

*Standardabweichung von $\dot{U}_{S_d,v}$ wurden vernachlässigt.

Anhang H: Iteration der CSB-Zulaufkonzentration

Iteration über $C_{CSB,ZB,theoretisch}$

| $X_{p,FBH}$ | $X_{p,BM}$ | $X_{p,Bio}$ | $C_{p,ZB}$ | HRT | $B_{d,CSB}$ | $C_{CSB,ZB}$ | $S_{CSB,ZB}$ | $X_{CSB,ZB}$ | $S_{CSB,AN}$ | $X_{CSB,INERT,ZB}$ | $C_{CSB,ABB,ZB}$ | $X_{CSB,BM}$ | $X_{CSB,INERT,BM}$ | $X_{TS,ZB}$ | $X_{ANORG,S,ZB}$ | $\dot{u}_{S,d,c}$ | $\dot{u}_{S,d,p}$ | $\dot{u}_{S,d}$ | t_{TS} | $C_{N,ZB}$ | $X_{erg,N,BM}$ | $X_{org,N,INERT}$ | $S_{NO3,D}$ | OV_C | $OV_{C,IA,ORG}$ | $OV_{C,D}$ | x |
|-------------|------------|-------------|------------|-------|-------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------------|------------------|--------------|--------------------|-------------|------------------|-------------------|-------------------|-----------------|----------|------------|----------------|-------------------|-------------|--------|-----------------|------------|------|
| | | in mg/l | | in h | in g/CSB/d | in mg/l | | | | in mg/l | | | | in g/d | | in d | | | | in mg/l | | | | | | | |
| 13,01 | 4,85 | 1,94 | 122,86 | 21,87 | 8,73 | 970,00 | 761,64 | 208,36 | 15,52 | 41,67 | 912,81 | 193,65 | 41,79 | 144,69 | 14,47 | 2,03 | 0,85 | 2,88 | 8,94 | 145,86 | 13,56 | 2,50 | 120,84 | 677,36 | 75,31 | 342,97 | 0,99 |
| 11,94 | 4,53 | 1,81 | 21,33 | 21,87 | 8,15 | 905,00 | 710,61 | 194,39 | 14,48 | 38,88 | 851,64 | 167,14 | 40,35 | 135,00 | 13,50 | 1,81 | 0,78 | 2,59 | 10,00 | 136,09 | 11,70 | 2,38 | 113,05 | 644,16 | 70,26 | 325,79 | 1,01 |
| 7,38 | 3,15 | 1,26 | 14,85 | 21,87 | 5,67 | 630,00 | 494,08 | 135,32 | 10,08 | 27,06 | 592,86 | 77,83 | 31,94 | 93,98 | 9,40 | 1,02 | 0,49 | 1,51 | 17,00 | 94,74 | 5,45 | 1,77 | 78,55 | 483,09 | 48,91 | 243,29 | 1,08 |

Anhang I: Anpassung der CSB-Zulaufkonzentration und der Stickstoffkonzentration

| Näherungstabelle $C_{CSB,ZB,Näherung}$ | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
|--|-------------|-------------|------------|-------|-------------|--------------|-------------|----------|------------|----------------|------------------|-------------|--------|------------------|------------|---------|------------|-----------------------|
| $X_{p,Fäll}$ | $X_{p,BMI}$ | $X_{p,Bio}$ | $C_{p,ZB}$ | HRT | $B_{d,CSB}$ | $C_{CSB,ZB}$ | \bar{U}_d | t_{TS} | $C_{N,ZB}$ | $X_{orgN,BMI}$ | $X_{orgN,inert}$ | $S_{NO3,D}$ | OV_C | $OV_{C,la,vorg}$ | $OV_{C,D}$ | X | $C_{N,ZB}$ | Anpassung Nges |
| in mg/l | | in mg/l | | in h | in gCSB/d | in mg/l | n g/d | in d | in mg/l | | | mg/l | | | | in mg/l | | |
| 6,75 | 2,96 | 1,18 | 13,95 | 21,87 | 5,33 | 592,00 | 2,88 | 8,94 | 89,02 | 8,27 | 1,53 | 70,25 | 413,40 | 45,96 | 209,32 | - | 92,00 | 1,00 |
| 6,09 | 2,76 | 1,10 | 13,02 | 21,87 | 4,97 | 552,33 | 2,59 | 10,00 | 83,06 | 7,72 | 1,43 | 64,95 | 385,70 | 42,88 | 195,29 | 1,05 | 86,50 | 1,00 |
| 3,31 | 1,92 | 0,77 | 9,06 | 21,87 | 3,46 | 384,49 | 1,51 | 17,00 | 57,82 | 5,37 | 0,99 | 42,49 | 268,50 | 29,85 | 135,95 | 1,12 | 63,00 | 1,00 |

Die Zulaufkonzentration wurde aus der Iterationstabelle über $C_{CSB,ZB,theoretisch}$ berechnet. (Aus der theoretischen Zulaufkonzentration mal den Faktor = $(970/592)=0,61$)

Anhang J: Analyseauswertung Sulfamethoxazol

| Calib Level | Probenname Datum | Injection Number | Acq. Date | Operator | Theor. Conc. | Theor. Conc. Unit | Conc. ISTD | Conc. Unit | RT Target Cmpd (s) | RT Target Cmpd (min) | Area Target Cmpd | Calc. Conc. | Calc. Conc. Unit | Ergebnis in ng/l |
|---------------------|------------------|------------------|---------------------|----------|--------------|-------------------|------------|------------|--------------------|----------------------|------------------|-------------|------------------|------------------|
| BW | | 1 | 16/06/2017 06:59:30 | bdal | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0,00 | 0 | 2,1077 µg/L | µg/L | <NG |
| A1t ₁ P1 | 22.05.2017 | 16 | 16/06/2017 14:50:21 | bdal | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0,00 | 0 | 2,1077 µg/L | µg/L | <NG |
| A1t ₁ P2 | 22.05.2017 | 17 | 16/06/2017 15:21:43 | bdal | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0,00 | 0 | 2,1077 µg/L | µg/L | <NG |
| A1t ₁ P3 | 22.05.2017 | 18 | 16/06/2017 15:53:05 | bdal | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0,00 | 0 | 2,1077 µg/L | µg/L | <NG |
| A1t ₁ P4 | 22.05.2017 | 19 | 16/06/2017 16:24:27 | bdal | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0,00 | 0 | 2,1077 µg/L | µg/L | <NG |
| A2t ₁ P1 | 22.05.2017 | 20 | 16/06/2017 16:55:49 | bdal | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0,00 | 0 | 2,1077 µg/L | µg/L | <NG |
| A2t ₁ P2 | 22.05.2017 | 21 | 16/06/2017 17:27:13 | bdal | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0,00 | 0 | 2,1077 µg/L | µg/L | <NG |
| A2t ₁ P3 | 22.05.2017 | 22 | 16/06/2017 17:58:36 | bdal | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0,00 | 0 | 2,1077 µg/L | µg/L | <NG |
| A2t ₁ P4 | 22.05.2017 | 23 | 16/06/2017 18:29:59 | bdal | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0,00 | 0 | 2,1077 µg/L | µg/L | <NG |
| A2P5 | 24.05.2017 | 24 | 16/06/2017 19:01:21 | bdal | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0,00 | 0 | 2,1077 µg/L | µg/L | <NG |
| A2P6 | 24.05.2017 | 25 | 16/06/2017 19:32:43 | bdal | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0,00 | 0 | 2,1077 µg/L | µg/L | <NG |
| A2P7 | 26.05.2017 | 26 | 16/06/2017 20:04:05 | bdal | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0,00 | 0 | 2,1077 µg/L | µg/L | <NG |
| A2P8 | 26.05.2017 | 49 | 17/06/2017 08:05:51 | bdal | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0,00 | 0 | 2,1077 µg/L | µg/L | <NG |
| A2P9 | 29.05.2017 | 50 | 17/06/2017 08:37:14 | bdal | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0,00 | 0 | 2,1077 µg/L | µg/L | <NG |
| A2P10 | 29.05.2017 | 51 | 17/06/2017 09:08:37 | bdal | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0,00 | 0 | 2,1077 µg/L | µg/L | <NG |
| A2P11 | 31.05.2017 | 52 | 17/06/2017 09:40:01 | bdal | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0,00 | 0 | 2,1077 µg/L | µg/L | <NG |
| A2P12 | 31.05.2017 | 53 | 17/06/2017 10:11:24 | bdal | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0,00 | 0 | 2,1077 µg/L | µg/L | <NG |
| A2P13 | 02.06.2017 | 54 | 17/06/2017 10:42:48 | bdal | 0 | 0 | 690,888 | 11,51 | 690,888 | 11,51 | 1.663,211 | 0,0412 µg/L | µg/L | 41,18 |
| A2P14 | 02.06.2017 | 45 | 17/06/2017 06:00:19 | bdal | 0 | 0 | 692,411968 | 11,54 | 692,411968 | 11,54 | 1.234,861 | 0,0314 µg/L | µg/L | 31,37 |
| A2P15 | 05.06.2017 | 46 | 17/06/2017 06:31:43 | bdal | 0 | 0 | 689,004992 | 11,48 | 689,004992 | 11,48 | 1.855,292 | 0,0456 µg/L | µg/L | 45,59 |
| A2P16 | 05.06.2017 | 47 | 17/06/2017 07:03:05 | bdal | 0 | 0 | 691,133952 | 11,52 | 691,133952 | 11,52 | 3.318,523 | 0,0791 µg/L | µg/L | 79,12 |
| A2P16 | 05.06.2017 | 48 | 17/06/2017 07:34:27 | bdal | 0 | 0 | 688,852992 | 11,48 | 688,852992 | 11,48 | 2.767,585 | 0,0665 µg/L | µg/L | 66,49 |

| Calib Level | Injection Number | Acq. Date | Theor. Conc. | Theor. Conc. Unit | Conc. ISTD | Conc. Unit | Conc. ISTD | Conc. Unit | RT Target Cmpd (s) | RT Target Cmpd (min) | Area Target Cmpd | Calc. Conc. | Calc. Conc. Unit | Berücksichtigung des Anreicherungs-faktors, der Nachweis- und Bestimmungsgrenze |
|-------------|------------------|---------------------|--------------|-------------------|------------|------------|------------|------------|--------------------|----------------------|------------------|---------------|------------------|---|
| 10V3 | 1 | 16/06/2017 06:59:30 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0,00 | 0 | 2,1077 µg/L | µg/L | <NG |
| 148V3 | 29 | 16/06/2017 21:38:14 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0,00 | 0 | 2,1077 µg/L | µg/L | <NG |
| 148V4 | 30 | 16/06/2017 22:09:36 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0,00 | 0 | 2,1077 µg/L | µg/L | <NG |
| 148V4 | 31 | 16/06/2017 22:40:59 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0,00 | 0 | 2,1077 µg/L | µg/L | <NG |
| 10V1 SMX | 32 | 16/06/2017 23:12:22 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0,00 | 0 | 2,1077 µg/L | µg/L | <NG |
| 148V1 SMX | 33 | 16/06/2017 23:43:45 | 0 | 0 | 0 | 689,16096 | 11,49 | 689,16096 | 689,16096 | 11,49 | 9.446,126 | 232,5965 µg/L | µg/L | 0,2326 |
| 10V2 SMX | 34 | 17/06/2017 00:15:07 | 0 | 0 | 0 | 691,362944 | 11,52 | 691,362944 | 691,362944 | 11,52 | 9.368,815 | 231,0622 µg/L | µg/L | 0,2311 |
| 148V2 SMX | 35 | 17/06/2017 00:46:30 | 0 | 0 | 0 | 690,827968 | 11,51 | 690,827968 | 690,827968 | 11,51 | 9.201,754 | 227,7467 µg/L | µg/L | 0,2277 |
| 196V1 SMX | 36 | 17/06/2017 01:17:52 | 0 | 0 | 0 | 690,986944 | 11,52 | 690,986944 | 690,986944 | 11,52 | 9.152,561 | 226,7704 µg/L | µg/L | 0,2268 |
| 196V2 SMX | 37 | 17/06/2017 01:49:14 | 0 | 0 | 0 | 688,957952 | 11,48 | 688,957952 | 688,957952 | 11,48 | 9.283,234 | 229,3638 µg/L | µg/L | 0,2294 |
| 196V3 | 38 | 17/06/2017 02:20:36 | 0 | 0 | 0 | 692,785984 | 11,55 | 692,785984 | 692,785984 | 11,55 | 8.910,003 | 221,9566 µg/L | µg/L | 0,2220 |
| 196V4 | 41 | 17/06/2017 03:54:46 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0,00 | 0 | 2,1077 µg/L | µg/L | <NG |
| Neg7617f | 42 | 17/06/2017 04:26:13 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0,00 | 0 | 2,1077 µg/L | µg/L | <NG |
| Neg7617s | 43 | 17/06/2017 04:57:35 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0,00 | 0 | 2,1077 µg/L | µg/L | <NG |
| | 44 | 17/06/2017 05:28:57 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0,00 | 0 | 2,1077 µg/L | µg/L | <NG |

Anhang K: Messwerte der Wasseranalyse

Messwerte der LKA 1

| NO ₃ -N-Messung | | | | | | |
|-------------------------------------|-------------------|------------------------------------|------------------------------------|------------------------------------|--|--|
| Zeit | Verdünnungsfaktor | 1. Messwert in mg/l ¹ | 2. Messwert in mg/l ¹ | 3. Messwert in mg/l ¹ | Stabw. | Mittelwert der Konzentration im Ablauf mg/l ¹ |
| 28.04.2017 | 2 | 2,90 | 2,80 | 2,90 | 0,12 | 5,73 |
| 02.05.2017 | 2 | 3,50 | 3,50 | 2,30 | 1,39 | 6,20 |
| 05.05.2017 | 2 | 2,90 | 2,90 | 3,60 | 0,81 | 6,27 |
| 09.05.2017 | 2 | 2,80 | 2,80 | 3,10 | 0,35 | 5,80 |
| 12.05.2017 | 2 | 1,40 | 1,40 | 1,70 | 0,35 | 3,00 |
| 16.05.2017 | 2 | 3,50 | 2,80 | 3,50 | 0,81 | 6,53 |
| 19.05.2017 | 2 | 3,80 | 3,60 | 3,70 | 0,20 | 7,40 |
| 23.05.2017 | 2 | 1,30 | 1,20 | 1,00 | 0,31 | 2,33 |
| 26.05.2017 | 2 | 4,00 | 4,30 | 4,20 | 0,31 | 8,33 |
| 29.05.2017 | 2 | 6,00 | 6,20 | 6,20 | 0,23 | 12,27 |
| 01.06.2017 | 2 | 6,60 | 7,10 | | 0,71 | 13,70 |
| NO ₂ -N-Messung | | | | | | |
| Zeit | Verdünnungsfaktor | 1. Messwert in mg/l ¹ | 2. Messwert in mg/l ¹ | 3. Messwert in mg/l ¹ | Stabw. | Mittelwert der Konzentration im Ablauf mg/l ¹ |
| 28.04.2017 | 5 | 0,14 | >0,15 | 0,15 | 0,01 | 0,73 |
| 02.05.2017 | 5 | 0,11 | 0,11 | 0,11 | 0,00 | 0,55 |
| 05.05.2017 | 5 | 0,05 | 0,05 | 0,05 | 0,00 | 0,25 |
| 09.05.2017 | 5 | 0,04 | 0,04 | 0,04 | 0,00 | 0,20 |
| 12.05.2017 | 5 | 0,02 | 0,02 | 0,02 | 0,00 | 0,10 |
| 16.05.2017 | 5 | 0,02 | 0,02 | 0,02 | 0,00 | 0,10 |
| 19.05.2017 | 5 | 0,01 | 0,01 | 0,01 | 0,00 | 0,05 |
| 23.05.2017 | 5 | 0,07 | 0,06 | 0,06 | 0,01 | 0,32 |
| 26.05.2017 | 5 | 0,03 | 0,03 | 0,03 | 0,00 | 0,15 |
| 29.05.2017 | 5 | 0,03 | 0,03 | 0,03 | 0,00 | 0,15 |
| 01.06.2017 | 5 | 0,06 | 0,06 | | 0,00 | 0,30 |
| NH ₄ -N-Messung | | | | | | |
| Zeit | | 1. Messwert in mg/l ¹ | 2. Messwert in mg/l ¹ | 3. Messwert in mg/l ¹ | Stabw. | Mittelwert der Konzentration im Ablauf mg/l ¹ |
| 28. Apr | 1 | 1,10 | 1,10 | 1,10 | 0,00 | 1,10 |
| 02. Mai | 1 | 1,10 | 1,10 | 1,10 | 0,00 | 1,10 |
| 05. Mai | 1 | <0,1 | <0,1 | <0,1 | 0,00 | 0,10 |
| 09. Mai | 1 | 0,10 | <0,1 | 0,10 | 0,00 | 0,10 |
| 12. Mai | 1 | 1,30 | 1,30 | 1,30 | 0,00 | 1,30 |
| 16. Mai | 1 | 0,20 | 0,20 | 0,20 | 0,00 | 0,20 |
| 19. Mai | 1 | <0,1 | <0,1 | <0,1 | 0,00 | 0,10 |
| 23. Mai | 20 | 1,30 | 1,20 | 1,10 | 2,00 | 24,00 |
| 26. Mai | 1 | <0,1 | <0,1 | <0,1 | 0,00 | 0,10 |
| 29. Mai | 1 | 0,20 | 0,20 | 0,20 | 0,00 | 0,20 |
| 01. Jun | 1 | 0,40 | 0,40 | | 0,00 | 0,40 |
| Messung der Alkalinität m-Wert | | | | | | |
| Zeit | Verdünnungsfaktor | 1. Messwert in mmol H ⁺ | 2. Messwert in mmol H ⁺ | 3. Messwert in mmol H ⁺ | Stabw. | Mittelwert der Konzentration im Ablauf in mmol |
| 28. Apr | 5 | 0,92 | 1,31 | 1,08 | 0,98 | 5,52 |
| 02. Mai | 5 | 1,63 | 1,53 | 1,48 | 0,38 | 7,73 |
| 05. Mai | 5 | 2,56 | 2,59 | 2,52 | 0,18 | 12,78 |
| 09. Mai | 5 | 2,55 | 2,78 | 2,65 | 0,58 | 13,30 |
| 12. Mai | 5 | <0,1 | 0,22 | 0,21 | 0,04 | 1,08 |
| 16. Mai | 5 | 0,52 | <0,1 | 0,50 | 0,07 | 2,55 |
| 19. Mai | 5 | 0,63 | 0,73 | 0,57 | 0,40 | 3,22 |
| 23. Mai | 5 | 0,81 | 0,86 | 0,84 | 0,13 | 4,18 |
| 26. Mai | 5 | 2,10 | 0,67 | 0,91 | 3,83 | 6,13 |
| 29. Mai | 5 | 0,43 | 0,42 | 0,42 | 0,03 | 2,12 |
| 01. Jun | 5 | 0,74 | 0,66 | 0,42 | 0,83 | 3,03 |
| Messung des Gesamt-Phosphatgehaltes | | | | | | |
| Zeit | Verdünnungsfaktor | 1. Messwert in mg/l ¹ | 2. Messwert in mg/l ¹ | Stabw. | Mittelwert der Konzentration im Ablauf mg/l ¹ | |
| 28. Apr | 5 | 0,05 | 0,06 | 0,04 | 0,28 | |
| 02. Mai | 5 | 0,39 | 0,40 | 0,04 | 1,98 | |
| 05. Mai | 5 | 0,22 | 0,22 | 0,00 | 1,10 | |
| 09. Mai | 5 | 0,43 | 0,41 | 0,07 | 2,10 | |
| 12. Mai | 5 | 0,76 | 0,64 | 0,42 | 3,50 | |
| 16. Mai | 5 | 0,53 | 0,53 | 0,00 | 2,65 | |
| 19. Mai | 5 | 0,45 | 0,42 | 0,11 | 2,18 | |
| 23. Mai | 5 | 1,38 | 1,36 | 0,07 | 6,85 | |
| 26. Mai | 5 | 0,85 | 0,86 | 0,04 | 4,28 | |
| 29. Mai | 5 | 0,83 | 0,83 | 0,00 | 4,15 | |
| 01. Jun | 5 | 0,58 | | #DIV/0! | 2,90 | |
| CSB-Gehalt Ablauf | | | | | | |
| Zeit | Verdünnungsfaktor | 1. Messwert in mg/l ¹ | 2. Messwert in mg/l ¹ | Stabw. | Mittelwert der Konzentration im Ablauf mg/l ¹ | |
| 28.04.2017 | 1 | <15 | <15 | 0,00 | 15,00 | |
| 02.05.2017 | 1 | <15 | <15 | 0,00 | 15,00 | |
| 05.05.2017 | 1 | <15 | <15 | 0,00 | 15,00 | |
| 09.05.2017 | 1 | <15 | <15 | 0,00 | 15,00 | |
| 12.05.2017 | - | - | - | - | - | |
| 16.05.2017 | 1 | <15 | <15 | 0,00 | 15,00 | |
| 19.05.2017 | 1 | <15 | <15 | 0,00 | 15,00 | |
| 23.05.2017 | 1 | 61,00 | 55,00 | 4,24 | 58,00 | |
| 26.05.2017 | 1 | <15 | <15 | 0,00 | 15,00 | |
| 29.05.2017 | 1 | 14,00 | 14,00 | 0,00 | 14,00 | |
| 01.06.2017 | 1 | 26,00 | 25,00 | 0,71 | 25,50 | |
| CSB-Gehalt Zulauf | | | | | | |
| Zeit | Verdünnungsfaktor | 1. Messwert in mg/l ¹ | 2. Messwert in mg/l ¹ | Stabw. | Mittelwert der Konzentration im Zulauf mg/l ¹ | |
| 28. Apr | 4 | 68,00 | 70,00 | 5,66 | 276,00 | |
| 02. Mai | 4 | 76,00 | 75,00 | 2,83 | 302,00 | |
| 05. Mai | 4 | 80,00 | 79,00 | 2,83 | 318,00 | |
| 09. Mai | 4 | 65,00 | 67,00 | 5,66 | 264,00 | |
| 12. Mai | - | - | - | - | - | |
| 16. Mai | 8 | 57,00 | 52,00 | 28,28 | 436,00 | |
| 19. Mai | 8 | 78,00 | 75,00 | 16,97 | 612,00 | |
| 23. Mai | 8 | 70,00 | 71,00 | 5,66 | 564,00 | |
| 26. Mai | 8 | 75,00 | 76,00 | 5,66 | 604,00 | |
| 29. Mai | - | - | - | - | - | |
| 30. Mai | 8 | 81,00 | 80,00 | 5,66 | 644,00 | |

Rot gekennzeichnete Messwerte wurden nicht in die Mittelwertbildung einbezogen!

Messwerte der LKA 2

| NO ₃ -N-Messung | | | | | | |
|-------------------------------------|-------------------|------------------------------------|------------------------------------|------------------------------------|---|---|
| Zeit | Verdünnungsfaktor | 1. Messwert in mg/l ⁻¹ | 2. Messwert in mg/l ⁻¹ | 3. Messwert in mg/l ⁻¹ | Stabw. | Mittelwert der Konzentration im Ablauf mg/l ⁻¹ |
| 28. Apr | 2 | 2,70 | 2,40 | 3,10 | 0,70 | 5,47 |
| 02. Mai | 1 | 1,80 | 1,80 | 1,80 | 0,00 | 1,80 |
| 05. Mai | 1 | 4,80 | 5,10 | 5,50 | 0,35 | 5,13 |
| 09. Mai | 2 | 2,00 | 2,20 | 2,20 | 0,23 | 4,27 |
| 12. Mai | 2 | 3,20 | 2,90 | 3,10 | 0,31 | 6,13 |
| 16. Mai | 2 | 2,70 | 3,30 | 2,80 | 0,64 | 5,87 |
| 19. Mai | 2 | 5,40 | 5,40 | 5,40 | 0,00 | 10,80 |
| 23. Mai | 2 | 3,80 | 4,10 | 4,20 | 0,42 | 8,07 |
| 26. Mai | 2 | 2,80 | 5,00 | 5,00 | 2,54 | 8,53 |
| 30. Mai | 2 | 4,80 | 4,00 | | 1,13 | 8,80 |
| 01. Jun | 2 | 5,00 | 5,40 | | 0,57 | 10,40 |
| NO ₂ -N-Messung | | | | | | |
| Zeit | Verdünnungsfaktor | 1. Messwert in mg/l ⁻¹ | 2. Messwert in mg/l ⁻¹ | 3. Messwert in mg/l ⁻¹ | Stabw. | Mittelwert der Konzentration im Ablauf mg/l ⁻¹ |
| 28. Apr | 5 | 0,05 | 0,05 | 0,05 | 0,00 | 0,25 |
| 02. Mai | 5 | 0,02 | 0,02 | 0,02 | 0,00 | 0,10 |
| 05. Mai | 5 | 0,03 | 0,03 | 0,02 | 0,03 | 0,13 |
| 09. Mai | 5 | 0,04 | 0,04 | 0,04 | 0,00 | 0,20 |
| 12. Mai | 5 | 0,01 | 0,01 | 0,01 | 0,00 | 0,05 |
| 16. Mai | 5 | 0,02 | 0,01 | 0,01 | 0,03 | 0,07 |
| 19. Mai | 5 | 0,02 | 0,02 | 0,02 | 0,00 | 0,10 |
| 23. Mai | 5 | 0,02 | 0,03 | 0,02 | 0,03 | 0,12 |
| 26. Mai | 5 | 0,02 | 0,02 | 0,02 | 0,00 | 0,10 |
| 30. Mai | 5 | 0,04 | 0,04 | | 0,00 | 0,20 |
| 01. Jun | 5 | 0,10 | 0,10 | | 0,00 | 0,50 |
| NH ₄ -N-Messung | | | | | | |
| Zeit | Verdünnungsfaktor | 1. Messwert in mg/l ⁻¹ | 2. Messwert in mg/l ⁻¹ | 3. Messwert in mg/l ⁻¹ | Stabw. | Mittelwert der Konzentration im Ablauf mg/l ⁻¹ |
| 28. Apr | 1 | 0,40 | 0,30 | 0,40 | 0,06 | 0,37 |
| 02. Mai | 1 | 0,40 | 0,40 | 0,40 | 0,00 | 0,40 |
| 05. Mai | 1 | <0,1 | <0,1 | <0,1 | 0,00 | 0,10 |
| 09. Mai | 1 | 0,70 | 0,70 | 0,70 | 0,00 | 0,70 |
| 12. Mai | 1 | 1,30 | 1,30 | 1,30 | 0,00 | 1,30 |
| 16. Mai | 1 | 0,30 | 0,30 | 0,30 | 0,00 | 0,30 |
| 19. Mai | 1 | <0,1 | <0,1 | <0,1 | 0,00 | 0,10 |
| 23. Mai | 1 | 0,70 | 0,20 | | 0,35 | 0,45 |
| 26. Mai | 1 | <0,1 | <0,1 | <0,1 | 0,00 | 0,10 |
| 30. Mai | 1 | <0,1 | 0,10 | | 0,00 | 0,10 |
| 01. Jun | 1 | 0,10 | 0,10 | | 0,00 | 0,10 |
| Messung der Alkalinität | | | | | | |
| Zeit | Verdünnungsfaktor | 1. Messwert in mmol H ⁺ | 2. Messwert in mmol H ⁺ | 3. Messwert in mmol H ⁺ | Stabw. | Mittelwert der Konzentration im Ablauf in mmol H ⁺ |
| 28. Apr | 5 | 1,04 | 1,13 | 1,29 | 0,63 | 5,77 |
| 02. Mai | 5 | 1,63 | 1,60 | 1,71 | 0,28 | 8,23 |
| 05. Mai | 5 | 2,39 | 2,50 | 2,54 | 0,39 | 12,38 |
| 09. Mai | 5 | 2,77 | 2,60 | 2,62 | 0,46 | 13,32 |
| 12. Mai | 5 | 0,44 | 0,50 | 0,52 | 0,21 | 2,43 |
| 16. Mai | 5 | 0,46 | 0,28 | 0,36 | 0,45 | 1,83 |
| 19. Mai | 5 | 0,48 | 0,68 | 0,58 | 0,50 | 2,90 |
| 23. Mai | 5 | 0,27 | 0,29 | 0,18 | 0,29 | 1,23 |
| 26. Mai | 5 | 0,80 | 0,67 | 0,53 | 0,68 | 3,33 |
| 30. Mai | 5 | 0,13 | 0,20 | | 0,25 | 0,83 |
| 01. Jun | 5 | 0,41 | 0,42 | | 0,04 | 2,08 |
| Messung des Gesamt-Phosphatgehaltes | | | | | | |
| Zeit | Verdünnungsfaktor | 1. Messwert in mg/l ⁻¹ | 2. Messwert in mg/l ⁻¹ | Stabw. | Mittelwert der Konzentration im Ablauf mg/l ⁻¹ | |
| 28. Apr | 5 | 0,40 | 0,39 | 0,04 | 1,98 | |
| 02. Mai | 5 | 1,23 | 1,26 | 0,11 | 6,23 | |
| 05. Mai | 5 | 0,46 | 0,46 | 0,00 | 2,30 | |
| 09. Mai | 5 | 0,33 | 0,33 | 0,00 | 1,65 | |
| 12. Mai | 5 | 0,53 | 0,52 | 0,04 | 2,63 | |
| 16. Mai | 5 | 0,54 | 0,55 | 0,04 | 2,73 | |
| 19. Mai | 5 | 0,73 | 0,73 | 0,00 | 3,65 | |
| 23. Mai | 5 | 0,54 | 0,54 | 0,00 | 2,70 | |
| 26. Mai | 5 | 1,17 | 1,17 | 0,00 | 5,85 | |
| 30. Mai | 5 | 0,87 | 0,87 | 0,00 | 4,35 | |
| 01. Jun | 5 | 0,73 | - | #DIV/0! | 3,65 | |
| 07.06.2017 | 5 | 0,18 | 0,20 | 0,07 | 0,95 | |
| CSB-Gehalt Ablauf | | | | | | |
| Zeit | Verdünnungsfaktor | 1. Messwert in mg/l ⁻¹ | 2. Messwert in mg/l ⁻¹ | Stabw. | Mittelwert der Konzentration im Ablauf mg/l ⁻¹ | |
| 28.04.2017 | 1 | <15 | <15 | 0,00 | 15,00 | |
| 02.05.2017 | 1 | 46,00 | 42,00 | 2,83 | 44,00 | |
| 05.05.2017 | 1 | <15 | <15 | 0,00 | 15,00 | |
| 09.05.2017 | 1 | <15 | <15 | 0,00 | 15,00 | |
| 16.05.2017 | 1 | <15 | <15 | 0,00 | 15,00 | |
| 19.05.2017 | 1 | <15 | <15 | 0,00 | 15,00 | |
| 23.05.2017 | 1 | <15 | <15 | 0,00 | 15,00 | |
| 26.05.2017 | 1 | <15 | <15 | 0,00 | 15,00 | |
| 30.05.2017 | 1 | 20,00 | 20,00 | 0,00 | 20,00 | |
| 01.06.2017 | 1 | 16,00 | 22,00 | 4,24 | 19,00 | |
| CSB-Gehalt Zulauf | | | | | | |
| Zeit | Verdünnungsfaktor | 1. Messwert in mg/l ⁻¹ | 2. Messwert in mg/l ⁻¹ | Stabw. | Mittelwert der Konzentration im Zulauf mg/l ⁻¹ | |
| 28.04.2017 | 4 | 70,00 | 68,00 | 5,66 | 276,00 | |
| 02. Mai | 4 | 76,00 | 74,00 | 5,66 | 300,00 | |
| 05. Mai | 4 | 77,00 | 76,00 | 2,83 | 306,00 | |
| 09. Mai | 4 | 76,00 | 74,00 | 5,66 | 300,00 | |
| 16. Mai | 8 | 59,00 | 62,00 | 16,97 | 484,00 | |
| 19. Mai | 8 | 79,00 | 75,00 | 22,63 | 616,00 | |
| 23. Mai | 8 | 70,00 | 70,00 | 0,00 | 560,00 | |
| 26. Mai | 8 | 76,00 | 77,00 | 5,66 | 612,00 | |
| 30. Mai | 8 | 73,00 | 72,00 | 5,66 | 580,00 | |

Rot gekennzeichnete Messwerte wurden nicht in die Mittelwertbildung einbezogen!

Anhang L: Wasseranalysen zu Versuch 1 bis 4

| Versuch | Bezeichnung | Datum | Uhrzeit | Stunden in h | IST-Temperatur in °C | pH-Wert | Sauerstoff in ppm | Verdünnung 2 | | | Verdünnung 5 | | | Verdünnung 1 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
|---|-------------------|------------|---------|--------------|---|--------------|-------------------|--------------|--------------|--------|--------------|-------|--------|--------------|-------|--------|---------|-------------|---------|---------|--------------|---|--------------|--|--|--------------|--|--|----|----|--------|----|----|--------|----|-----------------|------------|-------|------|------|------|------|------|------|------|------|-------|-------|-------|------|------|------|------|------|------|-------|-------|-------|-------|------|------|------|------|------|------|------|-------|-------|-------|------|----|------------------|------------|-------|------|------|------|------|------|------|------|------|-------|-------|-------|------|------|------|------|------|------|------|------|-------|-------|-------|------|------|------|------|------|------|------|-------|-------|-------|------|----|------------------|------------|-------|------|------|------|------|------|------|------|------|-------|-------|-------|------|------|------|------|------|------|------|-------|-------|-------|------|------|------|------|------|------|------|-------|-------|-------|------|----|-------------------|------------|-------|------|------|------|------|------|------|------|------|-------|-------|-------|------|------|------|------|------|------|------|-------|-------|-------|------|------|------|------|------|------|------|-------|-------|-------|------|
| | | | | | | | | 1. | 2. | Stabw. | 1. | 2. | Stabw. | 1. | 2. | Stabw. | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 1. | mit SMX bei 4°C | 29.05.2017 | 12:30 | 0,00 | 22,70 | 8,30 | 5,73 | 12,00 | 12,40 | 12,20 | 0,28 | 0,15 | 0,15 | 0,20 | 0,10 | 0,15 | 0,07 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| | | | | | | | | 12,40 | 6,35 | 12,40 | 9,35 | 4,31 | 0,15 | 0,15 | 0,30 | 0,20 | 0,20 | 0,20 | 0,00 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| | | | | | | | | 11,20 | 9,55 | 11,20 | 11,20 | 0,00 | 0,10 | 0,15 | 0,13 | 0,10 | 0,10 | 0,10 | 0,00 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 2. | mit SMX bei 25°C | 31.05.2017 | 12:30 | 0,00 | 22,70 | 8,30 | 5,73 | 12,00 | 12,40 | 12,20 | 0,28 | 0,15 | 0,15 | 0,20 | 0,10 | 0,15 | 0,07 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| | | | | | | | | 12,40 | 5,42 | 15,80 | 15,50 | 0,42 | 0,15 | 0,15 | 0,15 | 0,00 | <0,10 | <0,10 | #DIV/0! | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| | | | | | | | | 13,00 | 5,40 | 16,20 | 14,60 | 2,26 | 0,20 | 0,20 | 0,20 | 0,00 | <0,10 | <0,10 | #DIV/0! | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 3. | ohne SMX bei 4°C | 29.05.2017 | 07:00 | 0,00 | 22,00 | 8,10 | 5,60 | 14,40 | 12,40 | 13,40 | 1,41 | 0,15 | 0,15 | 0,20 | 0,20 | 0,20 | 0,00 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| | | | | | | | | 13,60 | 8,80 | 11,20 | 12,40 | 1,70 | 0,15 | 0,15 | 0,15 | 0,00 | 0,10 | 0,10 | 0,10 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| | | | | | | | | 9,00 | 9,38 | 10,60 | 9,80 | 1,13 | 0,15 | 0,20 | 0,18 | 0,04 | 0,10 | 0,10 | 0,10 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 4. | ohne SMX bei 25°C | 31.05.2017 | 07:00 | 0,00 | 22,00 | 8,10 | 5,60 | 14,40 | 12,40 | 13,40 | 1,41 | 0,15 | 0,15 | 0,20 | 0,20 | 0,20 | 0,00 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| | | | | | | | | 11,20 | 5,49 | 13,20 | 12,20 | 1,41 | 0,20 | 0,20 | 0,20 | 0,00 | <0,10 | <0,10 | #DIV/0! | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| | | | | | | | | 12,20 | 5,50 | 12,80 | 12,50 | 0,42 | 0,15 | 0,20 | 0,18 | 0,04 | <0,10 | <0,10 | #DIV/0! | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| <table border="1"> <thead> <tr> <th rowspan="2">Versuch</th> <th rowspan="2">Bezeichnung</th> <th rowspan="2">Datum</th> <th rowspan="2">Uhrzeit</th> <th rowspan="2">Stunden in h</th> <th rowspan="2">Alkalinität (CaCO₃) in mmol/H⁺</th> <th colspan="3">Verdünnung 5</th> <th colspan="3">Verdünnung 1</th> </tr> <tr> <th>1.</th> <th>2.</th> <th>Stabw.</th> <th>1.</th> <th>2.</th> <th>Stabw.</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td rowspan="3">1.</td> <td rowspan="3">mit SMX bei 4°C</td> <td rowspan="3">29.05.2017</td> <td rowspan="3">12:30</td> <td rowspan="3">0,00</td> <td rowspan="3">0,43</td> <td>0,35</td> <td>1,95</td> <td>0,28</td> <td>0,83</td> <td>0,81</td> <td>4,10</td> <td>14,00</td> <td>13,00</td> <td>13,50</td> <td>0,71</td> </tr> <tr> <td>0,32</td> <td>0,39</td> <td>1,78</td> <td>0,25</td> <td>0,81</td> <td><1,50</td> <td>12,00</td> <td>12,00</td> <td>12,00</td> <td>0,00</td> </tr> <tr> <td>0,25</td> <td>0,40</td> <td>1,63</td> <td>0,53</td> <td>0,78</td> <td>3,85</td> <td>12,00</td> <td>12,00</td> <td>12,00</td> <td>0,00</td> </tr> <tr> <td rowspan="3">2.</td> <td rowspan="3">mit SMX bei 25°C</td> <td rowspan="3">29.05.2017</td> <td rowspan="3">12:30</td> <td rowspan="3">0,00</td> <td rowspan="3">0,43</td> <td>0,35</td> <td>1,95</td> <td>0,28</td> <td>0,83</td> <td>0,81</td> <td>4,10</td> <td>14,00</td> <td>13,00</td> <td>13,50</td> <td>0,71</td> </tr> <tr> <td>0,31</td> <td>0,22</td> <td>1,33</td> <td>0,32</td> <td>0,82</td> <td>0,78</td> <td>4,00</td> <td>12,00</td> <td>13,00</td> <td>12,50</td> <td>0,71</td> </tr> <tr> <td>0,39</td> <td>0,39</td> <td>1,95</td> <td>0,00</td> <td>0,78</td> <td>3,88</td> <td>12,00</td> <td>12,00</td> <td>12,00</td> <td>0,00</td> </tr> <tr> <td rowspan="3">3.</td> <td rowspan="3">ohne SMX bei 4°C</td> <td rowspan="3">29.05.2017</td> <td rowspan="3">07:00</td> <td rowspan="3">0,00</td> <td rowspan="3">0,42</td> <td>0,42</td> <td>2,10</td> <td>0,00</td> <td>0,93</td> <td>0,93</td> <td>4,65</td> <td>14,00</td> <td>16,00</td> <td>15,00</td> <td>1,41</td> </tr> <tr> <td>0,57</td> <td>0,55</td> <td>2,80</td> <td>0,07</td> <td>0,93</td> <td>4,63</td> <td>13,00</td> <td>12,00</td> <td>13,50</td> <td>2,12</td> </tr> <tr> <td>0,55</td> <td>0,42</td> <td>2,43</td> <td>0,46</td> <td>0,90</td> <td>4,45</td> <td>13,00</td> <td>13,00</td> <td>13,00</td> <td>0,00</td> </tr> <tr> <td rowspan="3">4.</td> <td rowspan="3">ohne SMX bei 25°C</td> <td rowspan="3">29.05.2017</td> <td rowspan="3">07:00</td> <td rowspan="3">0,00</td> <td rowspan="3">0,42</td> <td>0,42</td> <td>2,10</td> <td>0,00</td> <td>0,93</td> <td>0,93</td> <td>4,65</td> <td>14,00</td> <td>16,00</td> <td>15,00</td> <td>1,41</td> </tr> <tr> <td>0,61</td> <td>0,53</td> <td>2,85</td> <td>0,28</td> <td>0,93</td> <td>4,63</td> <td>12,00</td> <td>12,00</td> <td>12,00</td> <td>0,00</td> </tr> <tr> <td>0,52</td> <td>0,51</td> <td>2,58</td> <td>0,04</td> <td>0,89</td> <td>4,45</td> <td>13,00</td> <td>13,00</td> <td>13,00</td> <td>0,00</td> </tr> </tbody> </table> | | | | | | | | | | | | | | | | | Versuch | Bezeichnung | Datum | Uhrzeit | Stunden in h | Alkalinität (CaCO ₃) in mmol/H ⁺ | Verdünnung 5 | | | Verdünnung 1 | | | 1. | 2. | Stabw. | 1. | 2. | Stabw. | 1. | mit SMX bei 4°C | 29.05.2017 | 12:30 | 0,00 | 0,43 | 0,35 | 1,95 | 0,28 | 0,83 | 0,81 | 4,10 | 14,00 | 13,00 | 13,50 | 0,71 | 0,32 | 0,39 | 1,78 | 0,25 | 0,81 | <1,50 | 12,00 | 12,00 | 12,00 | 0,00 | 0,25 | 0,40 | 1,63 | 0,53 | 0,78 | 3,85 | 12,00 | 12,00 | 12,00 | 0,00 | 2. | mit SMX bei 25°C | 29.05.2017 | 12:30 | 0,00 | 0,43 | 0,35 | 1,95 | 0,28 | 0,83 | 0,81 | 4,10 | 14,00 | 13,00 | 13,50 | 0,71 | 0,31 | 0,22 | 1,33 | 0,32 | 0,82 | 0,78 | 4,00 | 12,00 | 13,00 | 12,50 | 0,71 | 0,39 | 0,39 | 1,95 | 0,00 | 0,78 | 3,88 | 12,00 | 12,00 | 12,00 | 0,00 | 3. | ohne SMX bei 4°C | 29.05.2017 | 07:00 | 0,00 | 0,42 | 0,42 | 2,10 | 0,00 | 0,93 | 0,93 | 4,65 | 14,00 | 16,00 | 15,00 | 1,41 | 0,57 | 0,55 | 2,80 | 0,07 | 0,93 | 4,63 | 13,00 | 12,00 | 13,50 | 2,12 | 0,55 | 0,42 | 2,43 | 0,46 | 0,90 | 4,45 | 13,00 | 13,00 | 13,00 | 0,00 | 4. | ohne SMX bei 25°C | 29.05.2017 | 07:00 | 0,00 | 0,42 | 0,42 | 2,10 | 0,00 | 0,93 | 0,93 | 4,65 | 14,00 | 16,00 | 15,00 | 1,41 | 0,61 | 0,53 | 2,85 | 0,28 | 0,93 | 4,63 | 12,00 | 12,00 | 12,00 | 0,00 | 0,52 | 0,51 | 2,58 | 0,04 | 0,89 | 4,45 | 13,00 | 13,00 | 13,00 | 0,00 |
| Versuch | Bezeichnung | Datum | Uhrzeit | Stunden in h | Alkalinität (CaCO ₃) in mmol/H ⁺ | Verdünnung 5 | | | Verdünnung 1 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| | | | | | | 1. | 2. | Stabw. | 1. | 2. | Stabw. | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 1. | mit SMX bei 4°C | 29.05.2017 | 12:30 | 0,00 | 0,43 | 0,35 | 1,95 | 0,28 | 0,83 | 0,81 | 4,10 | 14,00 | 13,00 | 13,50 | 0,71 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| | | | | | | 0,32 | 0,39 | 1,78 | 0,25 | 0,81 | <1,50 | 12,00 | 12,00 | 12,00 | 0,00 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| | | | | | | 0,25 | 0,40 | 1,63 | 0,53 | 0,78 | 3,85 | 12,00 | 12,00 | 12,00 | 0,00 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 2. | mit SMX bei 25°C | 29.05.2017 | 12:30 | 0,00 | 0,43 | 0,35 | 1,95 | 0,28 | 0,83 | 0,81 | 4,10 | 14,00 | 13,00 | 13,50 | 0,71 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| | | | | | | 0,31 | 0,22 | 1,33 | 0,32 | 0,82 | 0,78 | 4,00 | 12,00 | 13,00 | 12,50 | 0,71 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| | | | | | | 0,39 | 0,39 | 1,95 | 0,00 | 0,78 | 3,88 | 12,00 | 12,00 | 12,00 | 0,00 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 3. | ohne SMX bei 4°C | 29.05.2017 | 07:00 | 0,00 | 0,42 | 0,42 | 2,10 | 0,00 | 0,93 | 0,93 | 4,65 | 14,00 | 16,00 | 15,00 | 1,41 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| | | | | | | 0,57 | 0,55 | 2,80 | 0,07 | 0,93 | 4,63 | 13,00 | 12,00 | 13,50 | 2,12 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| | | | | | | 0,55 | 0,42 | 2,43 | 0,46 | 0,90 | 4,45 | 13,00 | 13,00 | 13,00 | 0,00 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 4. | ohne SMX bei 25°C | 29.05.2017 | 07:00 | 0,00 | 0,42 | 0,42 | 2,10 | 0,00 | 0,93 | 0,93 | 4,65 | 14,00 | 16,00 | 15,00 | 1,41 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| | | | | | | 0,61 | 0,53 | 2,85 | 0,28 | 0,93 | 4,63 | 12,00 | 12,00 | 12,00 | 0,00 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| | | | | | | 0,52 | 0,51 | 2,58 | 0,04 | 0,89 | 4,45 | 13,00 | 13,00 | 13,00 | 0,00 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |