



**Hochschule Offenburg**  
University of Applied Sciences



AbwasserZweckVerband  
Kinzig- und  
Harmersbachtal

## **Master-Thesis**

**SS 2015**

**Topic of the Master-Thesis**

**Optimization of Nitrogen- and Bio-P-Elimination  
of a Municipal Wastewater Treatment Plant  
by adding External Carbon Sources**

GK 16/11/15 M

<b>Name:</b>	Dennis Herter
<b>Closing date:</b>	30.11.2015
<b>Supervisor:</b>	Prof. Dr. rer. nat. Günter Kunz <i>Hochschule Offenburg</i>
	Dipl.-Ing. Almut Henninger <i>Hochschule Offenburg</i>
	Aldrin Mattes <i>Verbandskläranlage Biberach</i>

## Inhaltsverzeichnis

Inhaltsverzeichnis .....	II
Abkürzungs- und Symbolverzeichnis .....	V
Zusammenfassung .....	VI
Abstract .....	VII
1. Einleitung .....	8
2. Stand des Wissens .....	9
2.1 Kläranlagen.....	9
2.1.1 Mechanische Vorreinigung .....	9
2.1.2 Biologische Stufe .....	10
2.1.3 Faulturm .....	12
2.2 Stickstoffeliminierung .....	12
2.2.1 Die Nitrifikation .....	12
2.2.2 Die Denitrifikation .....	13
2.3 Phosphoreliminierung.....	13
2.3.1 Chemische Phosphorelimination.....	14
2.3.2 Biologische Phosphorelimination .....	14
3. Motivation .....	17
4. Material und Methoden .....	18
4.1 Laborversuch zur Ermittlung der Effektivität der C-Quellen bezogen auf die Denitrifikation .....	18
4.1.1 C-Quellen .....	18
4.1.2 Methode zur Ermittlung der Effektivität der C-Quellen bezogen auf die Denitrifikation .....	19
4.2 Laborversuch zur Ermittlung der Effektivität der C-Quellen bezogen auf die biologische Phosphoreliminierung.....	20
4.2.1 Geräte .....	20

4.2.2	Methode zur Ermittlung der Effektivität der C-Quellen bezogen auf die biologische Phosphoreliminierung .....	22
4.3	Erhöhung der Fällmittelmenge bezogen auf neuen Zielwert von $P_{ges} \leq 0,5 \text{ mg/l}$ .....	22
4.4	Verifizierung der Dosierstelle für die Zugabe der C-Quellen in die biologische Stufe .....	23
4.4.1	Methode zur Verifizierung der Dosierstelle für die Zugabe der C-Quellen in die biologische Stufe .....	23
4.5	Anwendung auf den Klärbetrieb.....	25
4.5.1	Geräte .....	25
4.5.2	Methode zur Anwendung der C-Quellen auf den Klärbetrieb .....	25
5.	Ergebnisse .....	27
5.1	Laborversuch zur Ermittlung der Effektivität der C-Quellen bezogen auf die Denitrifikation .....	27
5.2	Laborversuch zur Ermittlung der Effektivität der C-Quellen bezogen auf die biologische Phosphoreliminierung.....	31
5.3	Erhöhung der Fällmittelmenge bezogen auf neuen Zielwert von $P_{ges} \leq 0,5 \text{ mg/l}$ .....	33
5.4	Verifizierung der Dosierstelle für die Zugabe der C-Quellen in die biologische Stufe .....	34
5.5	Anwendung auf den Klärbetrieb.....	35
6.	Diskussion .....	42
6.1	Laborversuch zur Ermittlung der Effektivität der C-Quellen bezogen auf die Denitrifikation .....	42
6.2	Laborversuch zur Ermittlung der Effektivität der C-Quellen bezogen auf die biologische Phosphoreliminierung.....	44
6.3	Erhöhung der Fällmittelmenge bezogen auf neuen Zielwert von $P_{ges} \leq 0,5 \text{ mg/l}$ .....	45
6.4	Verifizierung der Dosierstelle für die Zugabe der C-Quellen in die biologische Stufe .....	45
6.5	Anwendung auf den Klärbetrieb.....	45
7.	Ausblick .....	49

---

8.	Literaturverzeichnis.....	50
9.	Tabellenverzeichnis.....	52
10.	Abbildungsverzeichnis .....	53
11.	Eidesstattliche Erklärung.....	54
12.	Anhang .....	55

## Abkürzungs- und Symbolverzeichnis

C	Kohlenstoff
N	Stickstoff
P	Phosphor
O	Sauerstoff
H	Wasserstoff
WRRL	Wasserrahmenrichtlinie
EU	Europäische Union
EG	Europäische Gemeinschaft
CSB	Chemischer Sauerstoffbedarf
BSB <sub>5</sub>	Biochemischer Sauerstoffbedarf nach fünf Tagen
Q	Volumenstrom
PAO	Phosphatakkumulierende Mikroorganismen
PHA	Polyhydroxyfettsäuren
B <sub>F</sub>	Fällmittelbedarf [kg/L]
P <sub>F</sub>	Zu fällende Phosphatfracht [kg/d]
M <sub>F</sub>	Molare Masse-Fällmittel
M <sub>P</sub>	Molare Masse-Phosphat
Q	Durchfluss

## Zusammenfassung

Ziel der Arbeit ist es, durch externe C-Quellen die Nitrat- und Phosphorelimination in der biologischen Stufe der Verbandskläranlage Biberach (Baden) zu verbessern. Grund hierfür ist die bis zum 31.12.2016 auslaufende wasserrechtliche Erlaubnis. Voraussichtlich wird der Grenzwert für  $N_{\text{anorg}}$  von  $\leq 18$  mg/L auf  $\leq 13$  mg/L herabgesetzt. Der Grenzwert für  $P_{\text{ges}}$  wird von  $\leq 2$  mg/L auf  $\leq 1,0$  mg/L herabgesetzt. Laut Eigenkontrollverordnung wird ein Zielwert von 0,5 mg/L für  $P_{\text{ges}}$  angestrebt. Es werden die vier C-Quellen Acetol-25, Acetol-30, Acetol-80 und Acetol-380 von der Firma Nova Umwelttechnik GmbH untersucht. Zusätzlich wird die Verwendbarkeit von Brennschlempe als C-Quelle analysiert. Bei der Brennschlempe handelt es sich um Rückstände aus umliegenden Schnapsbrennereien, die täglich angeliefert werden.

Die Arbeit unterteilt sich in drei Abschnitte. Zuerst wurden im Labormaßstab die Effektivität der einzelnen C-Quellen zur Verbesserung der Stickstoff- und Phosphorelimination untersucht. Das 78 %ige Essigsäuregemisch Acetol 80 hat vom wirtschaftlichen Aspekt die besten Ergebnisse erzielt. Bei der Zugabe laut Dosierempfehlung konnte im Vergleich zur Blindprobe innerhalb von zwei Stunden über 80 % mehr Nitrat abgebaut werden. Bei der biologischen Phosphorelimination konnte vorerst keine Verbesserung beobachtet werden.

Im zweiten Abschnitt wurde eine geeignete Dosierstelle auf der Kläranlage gesucht. Dabei haben Messungen ergeben, dass das Anaerobbecken in Wahrheit anoxische Bedingungen vorweist. Grund hierfür ist die hohe Nitratfracht aus dem Rücklaufschlamm. Dies spiegelt auch die Laborergebnisse wieder, die gezeigt haben, dass der Abbau von Nitrat zu lange dauert um anaerobe Bedingungen zu erreichen. Schließlich wurde das Gerinne am Ende des Anaerobbeckens als Dosierstelle gewählt.

Damit der Grenzwert von  $\leq 13$  mg $N_{\text{anorg}}$ /L eingehalten werden kann, sind verschiedene Modifikationen nötig. So muss die Rezirkulation auf 320 % erhöht werden. Zudem wird das Zentrat zu Beginn der Nitrifikation hinzugegeben. Um ein besseres Regelverhalten zu erlangen, muss zusätzlich die Nitratsonde von der zweiten in die dritte Kaskade des Denitrifikationsbeckens verlegt werden. Um eine Bio-P-Eliminierung zu erreichen, ist es unerlässlich die Rezirkulation in die zweite Kaskade zu pumpen.

Im Verlauf dieser Arbeit kann die Zielstellung zur Verbesserung der Stickstoff- und Phosphoreliminierung durch Zugabe von externen Kohlenstoffquellen bestätigt werden.

## Abstract

The aim of this study is the enhancement of the nitrate- and phosphorus removal of the wastewater treatment plant in Biberach (Baden) by adding external carbon sources. This is due to the water law until 31.12.2016 expiring permission. Presumably the limit for  $N_{\text{anorg}}$  of  $\leq 18$  mg/l to  $\leq 13$  mg/l is reduced and the limit for  $P_{\text{ges}}$  is reduced from  $\leq 2$  mg/l to  $\leq 1$  mg/l. According to self-control regulation a target of 0.5 mg/l is desirable for  $P_{\text{ges}}$ . Therefore four different carbon sources from the company Nova Umwelttechnik GmbH are examined. Additionally the potential of distillery residues will be also considered which are delivered daily by surrounding distilleries.

The work is divided into three sections. First of all, the effectiveness of the individual carbon sources have been studied in the laboratory scale to improve the elimination of nitrogen and phosphorus. The 78% acetic acid mixture Acetol 80 scored the best results from the economic aspect. In addition, according to dosing recommendation more than 80 % nitrate was reduced compared to the blank sample within two hours. For the biological phosphorus removal no improvement was observed considering the large scale retention time. In the second section, a suitable dosing spot was sought. It has been found that the anaerobic tank contains anoxic conditions. The reason for this is the high nitrate load from the return sludge. This also reflects the lab results which have shown that the decomposition of nitrate takes too long to achieve anaerobic conditions. Finally, the end of the anaerobic tank was selected as a suitable dosage spot.

Thus, various modifications are needed to adhere the threshold of  $\leq 13$  mg $N_{\text{anorg}}$ /L. Therefore the recirculation must be increased to 320 %. In addition, the centrate has to be added to the inlet of the nitrification tank. To gain a better control behavior, the nitrate probe must be moved from the second to the third cascade of the denitrification tank. Furthermore, the recirculation has to be pumped into the second cascade of the denitrification tank when Bio-P-Elimination is desired.

In the course of this work, the goal of improving the nitrogen and phosphorus elimination can be confirmed by adding external carbon sources.

## 1. Einleitung

Am 22. Dezember 2000 ist die EU-Wasserrahmenrichtlinie (WRRL) in Kraft getreten. Die EU Wasserrahmenrichtlinie 2000/60/EG verfolgt einen ganzheitlichen Ansatz zum Schutz aller Gewässer. Ziel ist dabei die Erreichung eines guten chemischen, biologischen und ökologischen Zustandes, welcher in Deutschland nur für knapp 10 % der Gewässer gegeben ist. Dadurch wurde die Bedeutung des ganzheitlichen Gewässerschutzes europaweit stärker in den Mittelpunkt gerückt. Neben der Verminderung des Nährstoffeintrags aus der Landwirtschaft und der Verbesserung der Hydromorphologie, soll die Schadstoffbelastung aus Punktquellen reduziert werden. Davon sind sowohl industrielle als auch kommunale Kläranlagen betroffen.

Um eine Verbesserung der Denitrifikation und der Bio-P-Eliminierung zu erreichen, kann es sinnvoll sein, zusätzlich externe Kohlenstoffquellen hinzuzugeben. So fanden mehrere Studien heraus, dass ein COD/N Verhältnis von 4-15 g/g für eine ausreichende Denitrifikation benötigt wird. So erreichten Peng et al. (2006) einen deutlich verbesserten Nitrat-Verbrauch bei Zugabe von Methanol, Ethanol und Acetat während eines Batch-Versuches.<sup>1</sup>

Konkret verfolgt diese Arbeit folgende Ziele:

1. Bestimmung einer geeigneten externen Kohlenstoffquelle für die kommunale Kläranlage in Biberach (Baden).
2. Auswahl einer geeigneten Dosierstelle.
3. Integration der externen Kohlenstoffquelle in den Klärbetrieb, um so eine Verbesserung der Stickstoff- und Phosphatelimination zu erreichen.

---

<sup>1</sup> (Peng, et al., 2006)

## 2. Stand des Wissens

### 2.1 Kläranlagen

Weltweit stellt die Abwasser-Entsorgung eines der größten Probleme für Mensch und Umwelt dar. Im 19. Jahrhundert forderten mehrere Typhus- und Cholera-Epidemien hunderttausende Tote. Dies war die Folge katastrophaler hygienischer Verhältnisse in den bewohnten Gebieten. So wurden Fäkalien und Essensreste direkt in die Straßenrinnen geleitet.

Um das Zusammenleben in Städten und Gemeinden zu ermöglichen, müssen die anfallenden Wasser- und Abwasserarten gesammelt und abgeleitet werden. Das Abwasser wird heutzutage über Kläranlagen wiederaufbereitet. In Deutschland wurde die erste Kläranlage im Jahr 1883 in Frankfurt am Main in Betrieb genommen. Zu Beginn bestand diese Anlage aus einem Sandfang und einer Rechenanlage. Hinzu kam ein Becken, in dem Tonerde und Kalk beigemischt wurden, um ein schnelleres Absetzverhalten zu erreichen.<sup>2</sup>

Zu Beginn des 20. Jahrhunderts wurde dann das Belebungsverfahren empirisch entwickelt. Zunächst hat man beobachtet, dass durch die Belüftung einer Abwasserprobe Schlammflocken gebildet wurden, die sich nach Ende der Belüftung am Boden abgesetzt haben. Durch Separieren des Belebtschlammes und wiederauffüllen mit neuem Rohwasser, haben sich weitere Schlammflocken gebildet. Zudem wurde die Belüftungszeit bei gleichbleibender Reinigungsleistung immer kürzer. Durch Einführung eines Nachklärbeckens wurde der diskontinuierliche Betrieb in einen kontinuierlichen Betrieb umgesetzt.<sup>3</sup>

Die kommunale Klärung von Abwasser kann heutzutage in zwei Bereiche aufgeteilt werden: die mechanische Reinigung und die biologische Stufe. Des Weiteren besitzen viele Kläranlagen Fällmittel-Stationen, um den Reinigungsprozess durch eine chemische Behandlung zu erweitern. Zudem wird vielerorts der anfallende Schlamm anaerob in einem Faulturm behandelt. Die einzelnen Stufen werden im Folgenden genauer erklärt.

#### 2.1.1 Mechanische Vorreinigung

Die mechanische Vorreinigung ist unumgänglich, da sie die Rückhaltung von festen Stoffen wie Äste, tote Tiere, Lebensmittelreste, Zellulosereste sowie andere grobdisperse Schwemm- und Schwebstoffen gewährleistet. Durch die mechanische Vorreinigung werden die nachfolgenden Klärprozesse entlastet.<sup>4</sup>

---

<sup>2</sup> (Stadtentwässerung)

<sup>3</sup> (Mudrack, et al., 2003) S.74

<sup>4</sup> (Blitz, et al., 1988) S.477 ff.

Zuerst durchfließt das Abwasser einen Rechen. Dieser hat eine Spaltenbreite von 6 mm. Danach kommt ein Sand- und Fettfang. Dieses längs durchströmte Becken, mit abgeschrägter Sohle und Sandrinne am Boden, erzeugt eine Strömung, die mineralische Inhaltsstoffe am Boden absetzt und Öle, Fette und Schwimmstoffe an der Oberfläche ansammeln lässt. Sowohl der Sand als auch die Fette und Öle können einer weiteren Verarbeitung zugeführt werden.<sup>5</sup>

Im darauf folgenden Vorklärbecken wird durch eine Vergrößerung des Querschnitts eine laminare Strömung erreicht. Hierbei werden durch die Schwerkraft ungelöste Abwasserinhaltsstoffe sedimentiert. Dieser sogenannte Primärschlamm kann daraufhin der anaeroben Behandlung im Faulturn zugeführt werden.<sup>6</sup>

### 2.1.2 Biologische Stufe

Die biologische Stufe kann als die technische Umsetzung der natürlich ablaufenden Selbstreinigungsprozesse in Gewässern verstanden werden. Da die Konzentration der Nährstoffe niedrig ist und in manchen Fällen die Sauerstoffkonzentration im Wasser nicht ausreicht, brauchen Gewässer lange um diese Selbstreinigungsprozesse abzuschließen. Wenn die Reinigungsleistung erhöht werden soll, um die Reinigungsprozesse in kürzerer Zeit und in kleinerem Reaktor-Volumen ablaufen zu lassen, so sind Veränderungen gegenüber dem Vorfluter notwendig. Zusätzlich darf die Konzentration an Schmutzstoffen, welche als Nahrung für die Mikroorganismen dienen, nicht zu niedrig sein. Des Weiteren muss für eine ausreichende Sauerstoffzufuhr und Durchmischung durch Gebläse und Rührwerke gesorgt werden.<sup>7</sup>

Die drei Hauptkomponenten, die hauptsächlich aus dem Wasser entfernt werden sollen, sind die organischen Verbindungen Stickstoff, Kohlenstoff und Phosphor. Um die Konzentration der oxidierbaren Stoffe anzugeben, wird der Chemische Sauerstoffbedarf (CSB) herangezogen. In der Abwassertechnik ist es aber üblicher, den biochemischen Sauerstoffbedarf (BSB<sub>5</sub>) zu verwenden. Dieser gibt an wieviel Sauerstoff benötigt wird, um innerhalb von fünf Tagen die biologisch abbaubaren organischen Stoffe zu oxidieren.

Bei der Stickstoffelimination geht es darum, das vorhandene Ammonium im Zulauf über die Nitrifikation und Denitrifikation in elementares N<sub>2</sub> umzuwandeln, welches in die Atmosphäre entlassen wird. Der Schritt der Stickstoffelimination wird ausführlich in 2.2 erläutert.

---

<sup>5</sup> (Abwasserzweckverband, 2014)

<sup>6</sup> (Blitz, et al., 1988) S.478 f.

<sup>7</sup> (Bever, et al., 2002) S.35

Der größte Teil an Phosphor im Abwasser besteht aus anorganischen Ortho-Phosphaten und kondensierten Polyphosphaten. Nur ein kleiner Teil des im Abwasser enthaltenen Phosphors besteht aus kolloidal gelösten organischen Phosphorverbindungen. Darum ist es notwendig bei der Analytik zwischen Ortho-Phosphat und Gesamtphosphat zu unterscheiden. Auf die Phosphatelimination wird in 2.3 näher eingegangen.

Da organische Verbindungen benötigt werden, um die Stickstoffelimination umzusetzen, kann davon ausgegangen werden, dass mit funktionierender Stickstoffelimination ein fast vollständiger Abbau des BSB<sub>5</sub> einhergeht. Bei der Bauweise der biologischen Stufen gibt es viele unterschiedliche Möglichkeiten. Eine in der Praxis gängige Methode ist die vorgeschaltete Denitrifikation (siehe Abbildung 1). Dieses Modell wird auch an der Kläranlage Biberach angewandt.

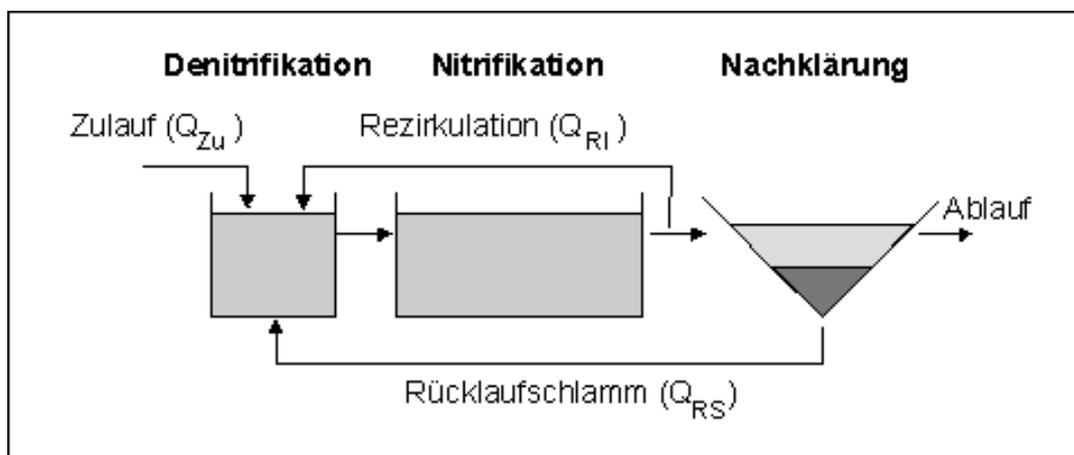


Abbildung 1: Vorgeschaltete Denitrifikation mit Kreislaufführung beim kontinuierlichen Belebungsverfahren<sup>8</sup>

Bei der vorgeschalteten Denitrifikation wird der Zulaufstrom mit dem Rücklaufschlamm und dem Rezirkulationsstrom im Denitrifikationsbecken ohne Sauerstoffeintrag vermischt. Die nitrathaltigen Rücklaufströme sorgen für anoxische Bedingungen. Ein großer Vorteil liegt darin, dass bereits im Denitrifikationsbecken die Oxidationswirkung des Nitrat-Stickstoffs zu einem biologischen Abbau von organischen Kohlenstoffquellen führt. Zusätzlich sinkt der Sauerstoffbedarf für das nachfolgende Nitrifikationsbecken, da der BSB-Wert in der Denitrifikationsstufe schon reduziert wurde.<sup>9</sup>

Wird eine hohe Eliminationsleistung gewünscht, so kommt diese Bauweise an ihre Grenzen. Durch eine erhöhte Rücklauftrate wird nicht nur mehr Nitrat reduziert, sondern auch der

<sup>8</sup> (Stania, et al., 1997)

<sup>9</sup> (Wessolowski)

Gesamtvolumenstrom erhöht. Daraus resultiert eine geringere Kontaktzeit. Die Rücklauftrate wird aber primär durch den Eintrag von Sauerstoff aus der Nitrifikationsstufe begrenzt.<sup>10</sup>

### 2.1.3 Faulturm

Der anfallende Primärschlamm aus der Vorklärung sowie der Überschussschlamm aus der Nachklärung können anaerob in einem Faulturm behandelt werden. Der Primärschlamm kann direkt in den Faulturm gegeben werden. Wohingegen der Überschussschlamm davor noch mit Hilfe der Schlammentwässerungsanlage entwässert werden muss.

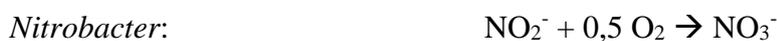
Der anaerobe Faulprozess im Faulturm kann in drei Stufen unterteilt werden. In der ersten Stufe werden die hochmolekularen organischen Stoffe durch fakultativ anaerobe Bakterien zu Fettsäuren, Aminosäuren, Alkoholen, Wasserstoff und Kohlendioxid umgesetzt. Acetogene Bakterien wandeln die Produkte aus dem ersten Schritt in Actetate und Essigsäure um. Diese werden in der dritten Stufe durch Methanbakterien zu Methan und Kohlendioxid weiterverarbeitet. Das anfallende Biogas kann mit Hilfe von Gasmotoren verbrannt und der erzeugte Strom in das Netz eingespeist werden. Die Rückstände aus dem Faulturm werden in dafür vorgesehenen Anlagen verbrannt.<sup>11</sup>

## 2.2 Stickstoffeliminierung

### 2.2.1 Die Nitrifikation

Bei der Nitrifikation handelt es sich um eine Oxidation von Ammonium zu Nitrat. Dabei sind zwei Bakteriengruppen beteiligt: Die Ammoniumoxidierer (z.B. *Nitrosomonas*) und die Nitritoxidierer (z.B. *Nitrobacter*). Es ist kein Bakterium bekannt, das Ammonium direkt in Nitrat überführt.<sup>12</sup>

Die beiden Reaktionsschritte im Überblick:



Aus den Reaktionen ist ersichtlich, dass bei der Oxidation von Ammonium zu Nitrat,  $\text{H}^+$ -Ionen entstehen, die zu einer Absenkung des pH-Wertes führen. Zudem ist die Gesamtreaktion durch einen hohen Sauerstoffbedarf gekennzeichnet. Die Energie, die die Nitrifikanten aus den

<sup>10</sup> (Bever, et al., 2002) S.118 f.

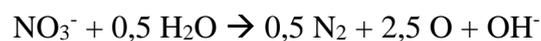
<sup>11</sup> (Mudrack, et al., 2003) S.162 f.

<sup>12</sup> (Schlegel, 1985) S.348 ff.

anorganischen Stoffen gewinnen können, ist dabei sehr gering. Dies hat eine langsame Wachstumsgeschwindigkeit zur Folge. So muss das autotrophe Bakterium *Nitrosomonas* zur Bildung von 1 g Zell-Trockenmasse 30 g NH<sub>3</sub> umsetzen. Im Vergleich dazu benötigt das heterotrophe Bakterium *Escherichia coli* nur 2 g Glukose um 1 g Zell-Trockenmasse herzustellen.<sup>13</sup>

### 2.2.2 Die Denitrifikation

Bei der Denitrifikation werden oxidierte Stickstoffverbindungen unter Abwesenheit von gelöstem Sauerstoff reduziert. Dabei wird Nitrat und Nitrit von den Bakterien als Wasserstoffakzeptor benutzt. Hierbei entstehen verschiedene Reaktionsprodukte wie Nitrit (NO<sub>2</sub><sup>-</sup>), Distickstoffoxid (N<sub>2</sub>O) oder gasförmiger Stickstoff (N<sub>2</sub>). Während der biologischen Abwasserreinigung läuft die Denitrifikation gewöhnlich nach folgender Reaktionsgleichung bis zum gasförmigen Stickstoff ab:



Aus der Reaktionsgleichung der Denitrifikation geht hervor, dass ein beachtlicher Anteil des Sauerstoffs der während der Nitrifikation verbraucht wurde, wieder gewonnen wird. Zusätzlich wird die Hälfte der bei der Nitrifikation erzeugten Säure wieder verbraucht, da die Denitrifikation von 1 Mol NO<sub>3</sub>-N 1 Mol H<sup>+</sup> benötigt.<sup>14</sup>

### 2.3 Phosphoreliminierung

Phosphor gelangt vor allem durch Fäkalien in das Abwasser. Eine weitere Phosphorquelle sind Waschmittel. Phosphor erscheint im Abwasser vor allem anorganisch als gelöstes Orthophosphat. Daneben liegt ein geringer Teil des Phosphors organisch in gelöster und nicht gelöster Form vor. Phosphor spielt in der Ökologie eine sehr wichtige Rolle, da es als essentieller Nährstoff gilt. Mit dem Abwasser und Abschwemmungen landwirtschaftlicher Flächen können allerdings große Mengen an Phosphor in die Gewässer gelangen und das Wachstum der Wasserpflanzen beschleunigen. Wenn Wasserkörper mit Nährstoffen wie Phosphor- und Stickstoffverbindungen überbelastet werden, spricht man von Eutrophierung (Überdüngung). Um einer Eutrophierung vorzubeugen, muss der Phosphorgehalt des Abwassers minimiert werden. Zwei der gängigsten Methoden sind die chemische- und die biologische Phosphoreliminierung.

<sup>13</sup> (Mudrack, et al., 2003) S.87 ff.

<sup>14</sup> (Bever, et al., 2002) S.113 f.

### 2.3.1 Chemische Phosphorelimination

Bei der chemischen Phosphorelimination werden unlösliche Verbindungen zwischen einem Fällmittel-Kation und einem Phosphat-Anion gebildet. Die Abtrennung erfolgt über Sedimentation, Flotation oder Filtration. Bei der Sedimentation wird das ungelöste Phosphat dann Bestandteil des Klärschlammes. Dieser gelangt entweder als Düngemittel in den Kreislauf zurück oder wird über die Klärschlammverbrennung entsorgt. Das Phosphat wird bei der Klärschlammverbrennung allerdings dem Naturkreislauf entzogen.

Nachfolgend sind mehrere Fällungsmittel aufgelistet, die in Kläranlagen verwendet werden können:

- Eisenchloridsulfat ( $\text{FeClSO}_4$ )
- Eisenchloride ( $\text{FeCl}_2$  oder  $\text{FeCl}_3$ )
- Grünsalz ( $\text{FeSO}_4$ )
- Kalkmilch ( $\text{Ca(OH)}_2$ )
- Aluminiumsulfat ( $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$ )
- Natriumaluminat ( $\text{NaAl(OH)}_4$ )

Letzteres wird in der Kläranlage Biberach verwendet. Je nach Dosierstelle wird zwischen Vorfällung, Simultanfällung und Nachfällung unterschieden. Bei der Vorfällung wird das Fällungsmittel im Vorklärbecken hinzugegeben. Dabei werden unter anderem organische Stoffe ausgeschieden und Frachtschwankungen gedämpft. Die Simultanfällung kommt vor allem bei Belebungsverfahren zur Anwendung. Das Fällmittel wird in das Belebungsbecken noch vor dem Nachklärbecken geleitet. Dabei ist zu beachten, dass sich der anorganische Anteil des Feststoffgehaltes im Belebungsbecken erhöht. Dies ist bei der Auslegung der Becken zu berücksichtigen betreffend Wirkungsgrad, Schlammbelastung und Schlammalter. Zudem kann bei bestimmten Fällmitteln eine Verschiebung des pH-Wertes auftreten. Bei der Nachfällung wird das Fällungsmittel nach dem Nachklärbecken in einem extra dafür gebauten Flockungsbecken hinzudosiert. Die Abscheidung der Flocken erfolgt über Sedimentation in einem Absetzbecken oder über Lamellenabscheider. Bei leichteren Flocken eignet sich die Flotation oder Filtration.<sup>15</sup>

### 2.3.2 Biologische Phosphorelimination

Bei der biologischen Phosphoreliminierung kommen phosphatakkumulierende Mikroorganismen (PAOs) zum Einsatz. Die PAOs haben eine strenge Anforderung an

---

<sup>15</sup> (Wessolowski)

zyklische anaerobe, anoxische und aerobe Bedingungen, folglich ist die Umsetzung der Bio-P-Entfernung deutlich komplexer im Vergleich zu Stickstoff und CSB Minderung.<sup>16</sup>

Dabei wird organischer Kohlenstoff unter anaeroben Bedingungen aus dem Abwasser entfernt und als intrazelluläre Polyhydroxyfettsäuren (PHAs) gespeichert, während intrazelluläres Glykogen und Poly-Phosphat abgebaut wird. Dabei erhöht sich die Ortho-Phosphatkonzentration im Abwasser. Unter aeroben Bedingungen nehmen die PAOs wiederum Ortho-Phosphat auf und speichern es als Poly-Phosphat. Währenddessen wird das als PHAs gespeicherte Glykogen oxidiert. Dieses Prinzip wird in Abbildung 2 dargestellt

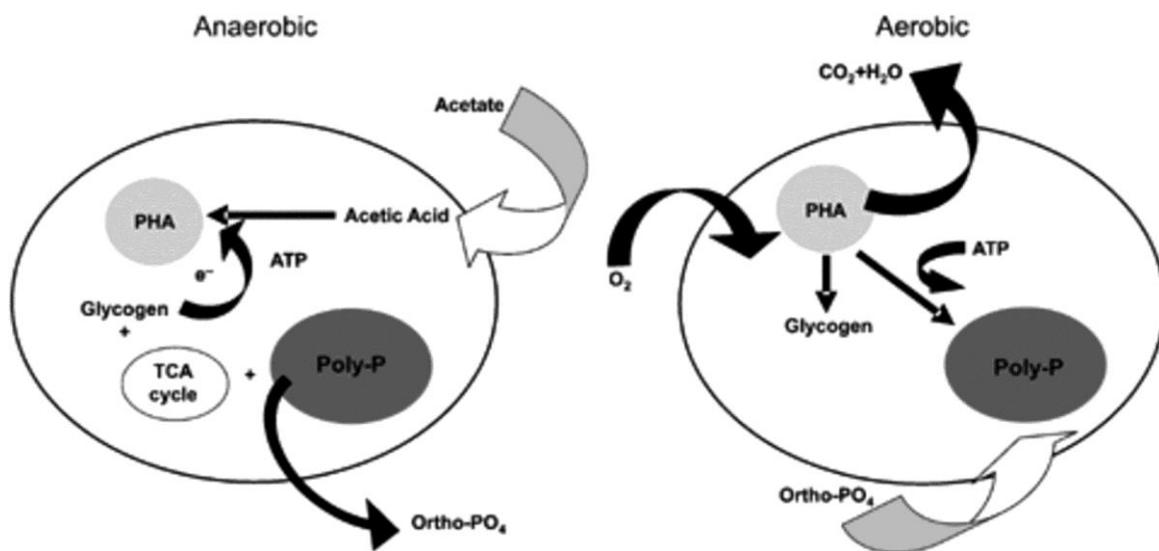


Abbildung 2: Schema der Stoffwechselvorgänge innerhalb der PAOs<sup>17</sup>

Da die aufgenommene Menge an Ortho-Phosphat innerhalb der aeroben Zone größer ist, als die rückgelöste Menge während der anaeroben Zone, kann ein Teil des Ortho-Phosphat aus dem Abwasser über den Überschussschlamm entfernt werden.<sup>18</sup>

Abbildung 3 zeigt den zeitlichen Verlauf der biologischen Phosphoreliminierung bezüglich der Konzentrationen von Kohlenstoff in Form von Acetat und Ortho-Phosphat.

<sup>16</sup> (Zuthi, et al., 2013)

<sup>17</sup> (Forbes, et al., 2009)

<sup>18</sup> (Mino, et al., 1998)

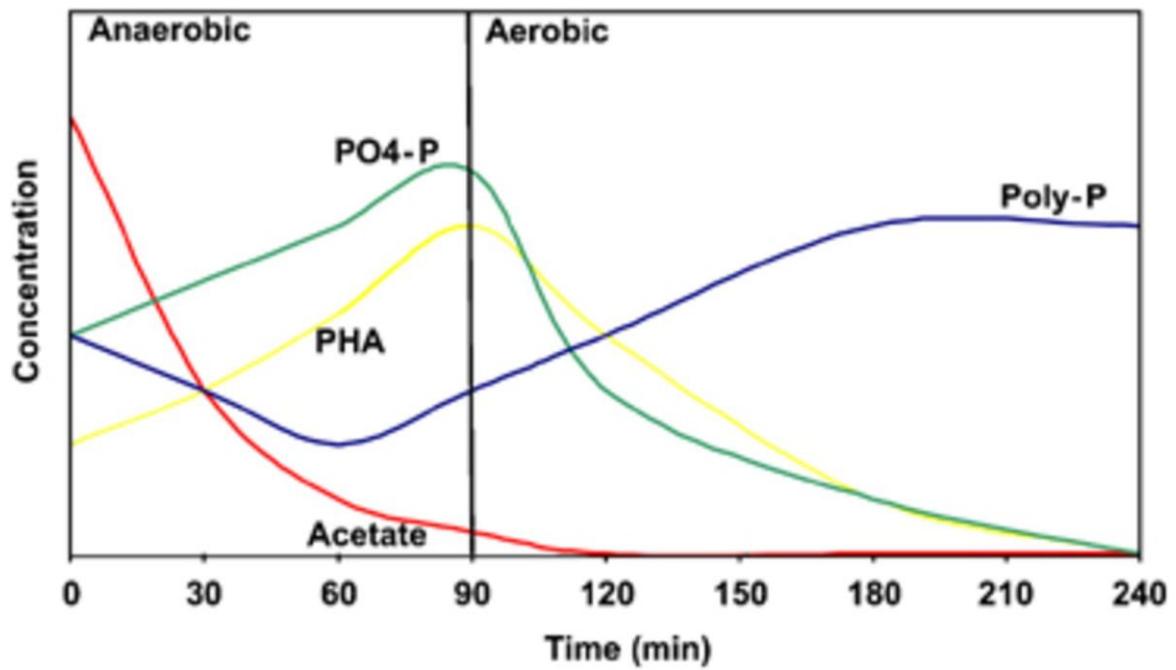


Abbildung 3: Zeitlicher Verlauf der Phosphat- und Kohlenstoffkonzentrationen während der biologischen Phosphoreliminierung<sup>19</sup>

<sup>19</sup> (Forbes, et al., 2009)

### 3. Motivation

Um eine gute Reinigungsleistung für Kläranlagen zu gewährleisten, sind zwei Fragen besonders wichtig in Bezug auf den Kohlenstoffanteil im Abwasser. Erstens muss genug Kohlenstoff im Abwasser vorhanden sein, um das entstandene Nitrat aus der Denitrifikation vollständig zu reduzieren. Dies bedeutet, dass ein Verhältnis von mindestens 4,2 g CSB/g N einschließlich der Assimilation nötig wäre, falls Glukose die Kohlenstoffquelle wäre. Da in der Praxis ein Teil des CSB bei einer kombinierten Nitrifikation/Denitrifikation oxidiert wird, liegt das optimale Verhältnis bei 5-10 g CSB/g N. Zudem muss beachtet werden, dass trotz hoher CSB Konzentrationen keine zufriedenstellende Stickstoffeliminierung auftreten kann. Die Denitrifikationsrate ist zusätzlich zur Temperatur sehr stark von der Zusammensetzung der Kohlenstoffquelle abhängig. Dabei können die höchsten Denitrifikationsraten mit leicht abbaubaren Formen erreicht werden.<sup>20</sup> So fanden Gerber et al. (1986) heraus, dass Acetat den besten Effekt erzielt, gefolgt von Methanol und Glukose.

Während der anoxischen Zone geraten die Denitrifikanten in ständigen Wettstreit mit den Phosphorakkumulierenden Mikroorganismen um leicht abbaubares organisches Material. Dabei kann es zur Hemmung der Phosphatrücklösung durch einen zu hohen Anteil an Nitrat kommen. Ist der Anteil an leicht abbaubaren Kohlenstoff allerdings hoch genug, so kann gleichzeitig die Denitrifikation und eine Phosphatrücklösung stattfinden.<sup>21</sup>

Mit der kontrollierten Zugabe von externen organischen Stoffen kann somit ein Verfahren entwickelt werden, um in Perioden mit niedrigen Temperaturen oder hohen Stickstoffbelastungen für eine ausreichende Prozesssicherheit zu sorgen.<sup>22</sup>

---

<sup>20</sup> (Henze, 1990)

<sup>21</sup> (Shun-Hsing, et al., 1996)

<sup>22</sup> (Isaacs, et al., 1994)

## 4. Material und Methoden

### 4.1 Laborversuch zur Ermittlung der Effektivität der C-Quellen bezogen auf die Denitrifikation

#### 4.1.1 C-Quellen

In Tabelle 1 sind die verwendeten Kohlenstoffquellen aufgelistet. Diese stammen von der Firma Nova Umwelttechnik GmbH. Zudem kommt Brennschlempe zum Einsatz. Die Brennschlempe stammt von Schnapsbrennereien aus der Region und wird regelmäßig angeliefert.

Tabelle 1: Verwendete Kohlenstoffquellen

Name	Hersteller	Zusammensetzung
Acetol-25	Nova Umwelttechnik GmbH In der Weide 4 D-55411 Bingen-Sponsheim	50% 60%ige Essigsäure 50% Ethylenglykol
Acetol-30	Nova Umwelttechnik GmbH In der Weide 4 D-55411 Bingen-Sponsheim	25%ige Natriumacetatlösung
Acetol-80	Nova Umwelttechnik GmbH In der Weide 4 D-55411 Bingen-Sponsheim	78%ige Essigsäure
Acetol-380	Nova Umwelttechnik GmbH In der Weide 4 D-55411 Bingen-Sponsheim	50% 78%ige Essigsäure 50% Ethylenglykol
Brennschlempe	-	-

In Tabelle 2 sind die verwendeten Geräte zur Simulation der Denitrifikationsstufe gelistet.

Tabelle 2: Geräte zur Simulation der Denitrifikationsstufe

Geräte	Hersteller	Bemerkungen
Photometer	Hach Lange Willstätter Straße 11 D-40549 Düsseldorf	DR 3900
Küvettestests	Hach Lange Willstätter Straße 11 D-40549 Düsseldorf	CSB PO <sub>4</sub> -P NO <sub>3</sub> -N

pH-Elektrode	WTW Wissenschaftlich- Technische Werkstätten GmbH Dr.-Karl-Slevogt-Straße 1 D-82362 Weilheim	pH 340i
Magnetrührer	HANNA Instruments An der Alten Ziegelei 7 D-89269 Vöhringen	
Bechergläser	DURAN Group GmbH Hattenbergstraße 10 D-55122 Mainz	1 L
Pipetten	Sartorius AG Weender Landstr. 94-108 37075 Göttingen, Deutschland	
Papierfilter	Macherey Nagel GmbH & Co. KG Neumann Neander Str. 6-8 D-52355 Düren	MN 615 ¼ D 185 mm

#### 4.1.2 Methode zur Ermittlung der Effektivität der C-Quellen bezogen auf die Denitrifikation

Es werden mehr als fünf Liter Belebtschlamm aus der Denitrifikationsstufe entnommen. Der Belebtschlamm wird dann zu jeweils einem Liter auf fünf verschiedene Bechergläser aufgeteilt. Eine kleine Menge wird über Papierfilter abgefiltert, um dann die Nitratkonzentration zu Beginn des Versuchs photometrisch mit Hilfe von Küvettentests zu bestimmen. Zu vier der fünf Bechergläser werden die einzelnen C-Quellen hinzu pipettiert. Die Menge wird so gewählt, dass bei insgesamt drei Versuchsreihen die Konzentrationsabstufungen von 25 ppm, 50 ppm und 100 ppm für die Acetole erreicht werden. Magnetrührer sorgen nach der Zudosierung für eine gleichmäßige Durchmischung. Nun werden nach 5, 10, 15, 30, 60 und 120 min jeweils 8 ml entnommen. Diese werden dann wiederum über Papierfilter in Plastikbecher abfiltriert. Danach kann die Nitratkonzentration über Küvettentests photometrisch bestimmt werden. Nach zwei Stunden wird der Versuch abgebrochen. Die Nitratkonzentrationen werden grafisch über der Zeit aufgetragen.

Bei einer weiteren Messreihe werden die vom Hersteller empfohlenen Dosiermengen verwendet. Die Produkteigenschaften der C-Quellen sind in Tabelle 3 illustriert.

Tabelle 3: Produktdaten der verwendeten C-Quellen

	Acetol-25	Acetol-30	Acetol-80	Acetol-380
Spez. Gewicht (kg/l)	1,10	1,10	1,10	1,10
CSB-Wert (kg O <sub>2</sub> /l)	1,20	0,20	1,00	1,40
BSB <sub>1</sub> -Wert (kg O <sub>2</sub> /l)	1,00	0,20	0,80	1,20
BSB <sub>5</sub> -Wert (kg O <sub>2</sub> /l)	1,20	0,20	1,00	1,40
pH-Wert	2,00	12,00	1,00	1,40
Stockpunkt (°C)	-23,00		-10,00	-23,00
Dosierungsempfehlung (g/g <sub>N</sub> )	4,00	15,00	3,80	3,20
Anlieferungsmenge (t)	1,10	1,05	1,00	1,10
Preis (EUR)	1210,00	525,00	880,00	1265,00
Preis (EUR/t)	1100,00	500,00	880,00	1150,00

Da sich die Dosierungsempfehlung nach dem Stickstoffgehalt im Abwasser richtet, muss dieser zu Beginn des Versuchs ermittelt werden. Die Zugabe der C-Quellen wird dem Stickstoffgehalt dementsprechend angepasst. Ansonsten wird der Versuch wie bereits beschrieben durchgeführt.

Bei der anschließenden Versuchsreihe kommt Brennschlempe als Kohlenstoffquelle zum Einsatz. Die Bedingungen gleichen den beiden vorangegangenen Versuchsreihen. Allerdings werden zu 1 L Schlamm 0,1 ml, 0,3 ml, 0,5 ml und 0,8 ml Brennschlempe gegeben. Das fünfte Becherglas dient wieder als Blindprobe. Währenddessen wird der CSB-Gehalt mit Hilfe eines Küvettentests bestimmt.

## 4.2 Laborversuch zur Ermittlung der Effektivität der C-Quellen bezogen auf die biologische Phosphoreliminierung

### 4.2.1 Geräte

In Tabelle 4 sind die verwendeten Geräte für die Simulation der biologischen Phosphorelimination aufgelistet.

Tabelle 4: Geräte zur Simulation der biologischen Phosphoreliminierung

Geräte	Hersteller	Bemerkungen
Photometer	Hach Lange Willstätter Straße 11 D-40549 Düsseldorf	DR 3900
Küvettentests	Hach Lange Willstätter Straße 11 D-40549 Düsseldorf	CSB PO <sub>4</sub> -P NO <sub>3</sub> -N
pH-Elektrode	WTW Wissenschaftlich- Technische Werkstätten GmbH Dr.-Karl-Slevogt-Straße 1 D-82362 Weilheim	pH 340i
Magnetrührer	HANNA Instruments An der Alten Ziegelei 7 D-89269 Vöhringen	
Bechergläser	DURAN Group GmbH Hattenbergstraße 10 D-55122 Mainz	1 L
Pipetten	Sartorius AG Weender Landstr. 94-108 37075 Göttingen, Deutschland	
Aquarienpumpe	Hagen Deutschland GmbH & Co. KG Lehmweg 99-105 25488 Holm	Maxima Membranpumpe
Papierfilter	Macherey Nagel GmbH & Co. KG Neumann Neander Str. 6-8 D-52355 Düren	MN 615 ¼ D 185 mm

#### 4.2.2 Methode zur Ermittlung der Effektivität der C-Quellen bezogen auf die biologische Phosphoreliminierung

Um die biologische Phosphoreliminierung simulieren zu können, werden zunächst vier Liter aus dem Rücklaufschlamm und vier Liter aus der Vorklärung in einem Eimer gemischt. Dieses Mischungsverhältnis entspricht auch der Zusammensetzung des Abwassers, welches in die Anaerobzone fließt. Ein Magnetrührer sorgt dafür, dass die Feststoffanteile kontinuierlich in Schwebe gehalten werden. Ab dem Zeitpunkt der Vermischung werden nun immer im Abstand von 30 Minuten die Ortho-Phosphat-Konzentrationen photometrisch bestimmt. Um den Zeitraum bestimmen zu können, der benötigt wird, um das restliche Nitrat aus dem Rücklaufschlamm zu entfernen, wird zusätzlich zu den Ortho-Phosphat-Messungen auch noch die Nitratkonzentration photometrisch ermittelt. Nachdem das Nitrat vollständig abgebaut wurde, ist mit einer Rücklösung und somit einer Erhöhung der Ortho-Phosphat-Konzentration in der Probe zu rechnen. Hat diese dann ihr Maximum erreicht, wird die Probe zu jeweils einem Liter in sechs verschiedene Bechergläser gegeben. Dann werden von den vier Acetolen jeweils 0,1 ml hinzu pipettiert. Dies entspricht einer Konzentration von 100 ppm. Ein Becherglas dient als Blindprobe und erhält dadurch keine zusätzliche C-Quelle. Dem sechsten Becherglas werden 0,5 ml Brennschlempe hinzugefügt. Zeitgleich werden alle sechs Bechergläser nun mit einer Aquarienpumpe belüftet. Der Versuch wird beendet, wenn eine Stagnation der Orthophosphat-Reduktion auftritt oder die Versuchszeit die Aufenthaltszeiten des Abwassers im Anaerobbecken und der Belebung übersteigt. Die Konzentration von Nitrat und Orthophosphat wird nach dem Versuch grafisch über der Zeit aufgetragen.

#### 4.3 Erhöhung der Fällmittelmenge bezogen auf neuen Zielwert von $P_{ges} \leq 0,5 \text{ mg/l}$

Um eine Aussage über die anfallenden Kosten treffen zu können, die nötig wären um den neuen  $P_{ges}$  Zielwert von  $\leq 0,5 \text{ mg/l}$  nur mit Hilfe des Fällmittels zu erreichen, werden über einen Zeitraum von zehn Tagen die Grenzwerte an der Dosierstation geändert. Bei der Phosphatfällung handelt es sich um eine Simultanfällung. Die Belebung besteht aus zwei Straßen und somit sind zwei Dosierstellen notwendig. Diese liegen aber auf gleicher Höhe und sind somit identisch was die Einleitbedingungen angeht. Als Fällmittel kommt aluminathaltige Natronlauge zum Einsatz. Dieses wird von der Firma Nova Umwelttechnik GmbH geliefert. Die Produktdaten sind in Tabelle 5 aufgelistet.

Tabelle 5: Produktdaten Fällmittel zur Phosphoreliminierung

Name	Alumin-8
Spez. Gewicht (t/m <sup>3</sup> )	ca. 1,4
Preis (€/t)	185
Al-Gehalt	ca. 8,0 % bzw. 15,3 % Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>
Na <sub>2</sub> O-Gehalt	Ca. 19 %

Die Dosierung des Fällmittels wird über die Ortho-Phosphat-Sonde in der Belebung geregelt. Da es sich beim Zielwert aber um Gesamtposphat handelt, basieren die neu eingestellten Grenzwerte auf Erfahrungswerte. Der untere Grenzwert wurde von 0,7 auf 0,1 mg/L PO<sub>4</sub>-P verändert. Dies entspricht einem Volumen von 3 L pro Stunde und Straße. Der obere Grenzwert wurde von 1,1 auf 0,4 mg/L PO<sub>4</sub>-P abgeändert. Dabei werden maximal 28 L pro Stunde und Straße Fällmittel dosiert. Die Dosierung verläuft zwischen den beiden Grenzwerten linear.

#### 4.4 Verifizierung der Dosierstelle für die Zugabe der C-Quellen in die biologische Stufe

Eine geeignete Dosierstelle zeichnet sich dadurch aus, dass eine schnelle Durchmischung der zudosierten C-Quelle gewährleistet ist. Zusätzlich muss die C-Quelle genau da eingesetzt werden, wo sie auch benötigt wird, um keine anderen Prozesse in der Kläranlage negativ zu beeinflussen.

##### 4.4.1 Methode zur Verifizierung der Dosierstelle für die Zugabe der C-Quellen in die biologische Stufe

Um zu den in 4.4 erwähnten Bedingungen eine Aussage treffen zu können, wird eine Bestandsaufnahme der Kläranlage durchgeführt. Dazu werden punktuell Proben von der Kläranlage entnommen. Die Probenentnahmestellen werden in Abbildung 4 als rote Punkte dargestellt.

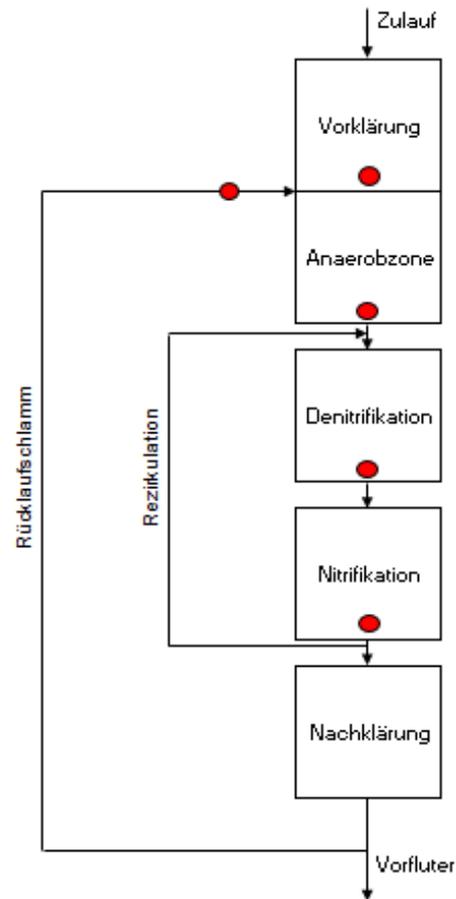


Abbildung 4: Probenentnahme zur Bestandsaufnahme der Kläranlage

Besonderer Fokus liegt dabei auf den Nitratkonzentrationen. Diese werden mit Hilfe von Küvettentests photometrisch bestimmt. So kann ermittelt werden, ob und wieviel Nitrat über den Rücklaufschlamm und die Rezirkulation zurückgeführt wird.

## 4.5 Anwendung auf den Klärbetrieb

### 4.5.1 Geräte

Tabelle 6: Geräte zur großtechnischen Umsetzung

Geräte	Hersteller	Bemerkungen
Kolben-Membran-Pumpe	Grundfos Alldos Reetzstraße 85 D-76327 Pfinztal (Söllingen)	D81/R01/A02/V05
Container	Nova Umwelttechnik GmbH In der Weide 4 D-55411 Bingen-Sponsheim	1000 L
Prozessleitsystem „Iltis“	IST Engineering AG Wynenfeld 10 CH-5034 Suhr	
Photometer	Hach Lange Willstätter Straße 11 D-40549 Düsseldorf	DR 3900
Papierfilter	Macherey Nagel GmbH & Co. KG Neumann Neander Str. 6-8 D-52355 Düren	MN 615 ¼ D 185 mm
Pipetten	Sartorius AG Weender Landstr. 94-108 37075 Göttingen, Deutschland	

### 4.5.2 Methode zur Anwendung der C-Quellen auf den Klärbetrieb

Sobald eine passende Dosierstelle gefunden ist, wird der Container mit der C-Quelle mit einer Kolben-Membran-Pumpe versehen und an den dafür vorgesehenen Platz gebracht. Die Kolben-Membran-Pumpe wird über das verbundene Leitwartensystem geregelt. Somit kann auch die zudosierte Menge protokolliert werden.

Besonderer Fokus liegt auf den Nitratkonzentrationen am Ende der Nitrifikationsstufe. Aussagen über die Bio-P Elimination können über den Fällmittelverbrauch oder den  $\beta$ -Wert

gemacht werden. Der  $\beta$ -Wert gibt das Verhältnis des Fällmittelbedarfs zur Phosphatfracht, die gefällt werden muss, an. Der  $\beta$ -Wert berechnet sich wie folgt:

$$\beta = \frac{B_F}{P_F} \cdot \frac{M_P}{M_F} \quad (1)$$

Mögliche Veränderungen sind unter anderem die Veränderung der Rücklaufverhältnisse und die Einleitbedingungen für die Kohlenstoffquelle.

## 5. Ergebnisse

### 5.1 Laborversuch zur Ermittlung der Effektivität der C-Quellen bezogen auf die Denitrifikation

Abbildung 5 zeigt den Verlauf der Abnahme der Nitratkonzentrationen bei Zugabe von vier unterschiedlichen C-Quellen. Der Belebtschlamm stammt aus dem Zulauf der Denitrifikationsstufe. Die hellblaue Linie steht für die Abnahme der Nitratkonzentration in der Blindprobe. Die Angabe ppm bezieht sich in den folgenden Versuchen ausschließlich auf das Volumen. So wurden bei der Angabe von 100 ppm lediglich 0,1 ml eines Acetols zu 1000 ml des Belebtschlammes hinzugegeben. Die molare Masse wird dabei nicht berücksichtigt.

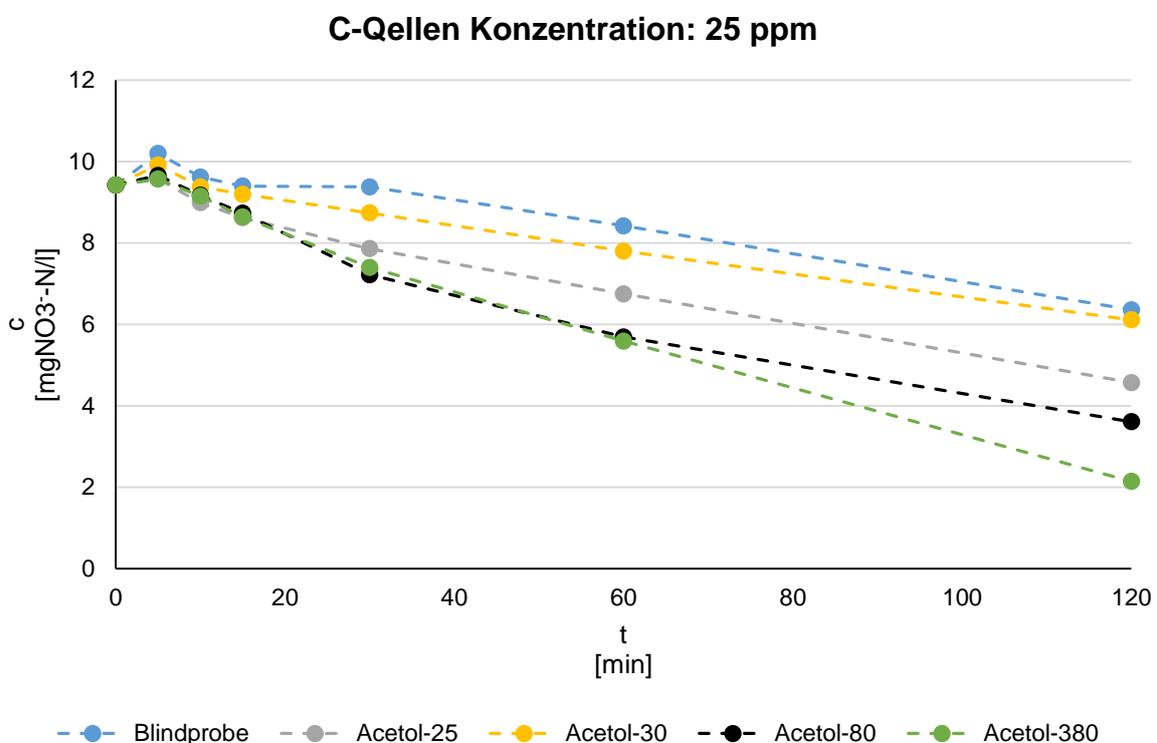


Abbildung 5: Simulation der Denitrifikation mit einer Konzentration der C-Quellen von jeweils 25 ppm

Die Konzentrationen der C-Quellen zu Beginn des Versuchs liegen bei 25 ppm. Der Anfangsgehalt der Nitratkonzentration beläuft sich auf 9,42 mg NO<sub>3</sub>-N/L. Dieser hohe Anfangswert wird durch die Erhöhung der Rezirkulation auf 300% zwei bis drei Stunden vor Versuchsbeginn erreicht. Alle fünf Bechergläser zeigen nach fünf Minuten einen Anstieg auf bis zu 10,20 mg NO<sub>3</sub>-N/L. Ab Minute 15 kann eine kontinuierliche Abnahme beobachtet werden. Die höchsten Abbauraten zeigen Acetol-380 und Acetol-80. Nach zwei Stunden liegt die Nitratkonzentration im Becherglas mit Acetol-380 nur noch bei 2,14 mg NO<sub>3</sub>-N/L und mit Acetol-80 bei 3,61 mg NO<sub>3</sub>-N/L. Die Nitratkonzentration im Becherglas mit Acetol-25 beträgt

nach zwei Stunden 4,57 mg NO<sub>3</sub>-N/L. Im Becherglas mit Acetol-30 kann gegenüber der Blindprobe keine signifikante Verbesserung beobachtet werden. Mit Acetol-30 liegt die Nitratkonzentration von 6,11 mg NO<sub>3</sub>-N/L nur knapp unter dem Wert der Blindprobe mit 6,36 mg NO<sub>3</sub>-N/L.

In Abbildung 6 wird der Verlauf der Abnahme der Nitratkonzentration in fünf verschiedenen Bechergläsern dargestellt. Die Voraussetzungen des Versuchs gleichen denen in Abbildung 5 mit dem Unterschied, dass die Konzentrationen der C-Quellen zu Beginn des Versuchs bei 50 ppm liegen.

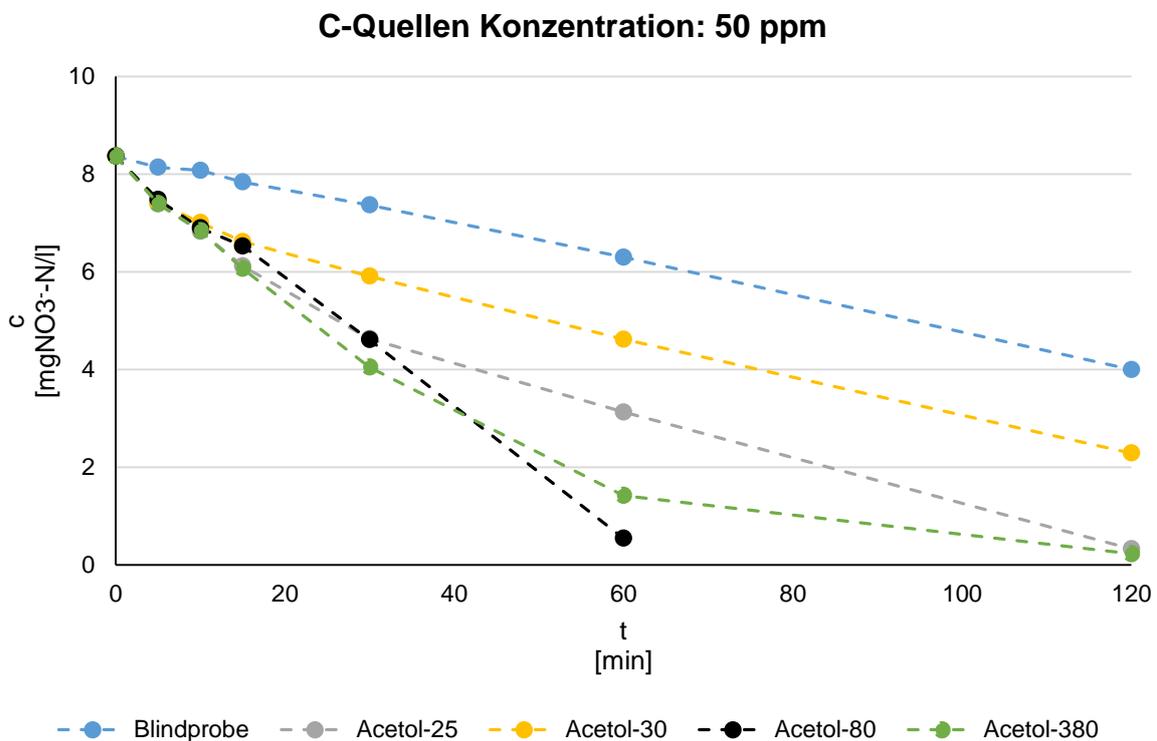


Abbildung 6: Simulation der Denitrifikation mit einer Konzentration der C-Quellen von jeweils 50 ppm

Zu Beginn des Versuchs sind in jedem Becherglas 8,37 mg NO<sub>3</sub>-N/L. Es ist klar zu erkennen, dass in jedem Becherglas die Konzentration von NO<sub>3</sub>-N sofort abnimmt. In dem Becherglas mit Acetol-30 ist nun eine Verbesserung des Nitratabbaus gegenüber der Blindprobe sichtbar. Zum Ende des Versuchs sind hier nur noch 2,29 mg NO<sub>3</sub>-N/L nachzuweisen. Der Wert für die Blindprobe beläuft sich nach zwei Stunden auf 4,00 mg NO<sub>3</sub>-N/L. Die effektivsten C-Quellen sind in diesem Fall Acetol-380, Acetol-80 und Acetol-25. So musste nach nur 60 Minuten und einer Nitratkonzentration von 0,55 mg NO<sub>3</sub>-N/L die Messungen in dem Becherglas mit Acetol-80 abgebrochen werden, weil bereits ein kompletter Nitratabbau zu verzeichnen war. Mit 0,33 mg NO<sub>3</sub>-N/L und 0,23 mg NO<sub>3</sub>-N/L kann ein nahezu kompletter Nitratabbau mit Acetol-

25 und Acetol-380 registriert werden. Wobei die Kurve von Acetol-380 in den ersten 60 Minuten deutlich steiler verläuft.

Wie sich der Nitratabbau bei einer C-Quellen Konzentration von 100 ppm zu Beginn des Versuchs verhält, wird in Abbildung 7 illustriert.

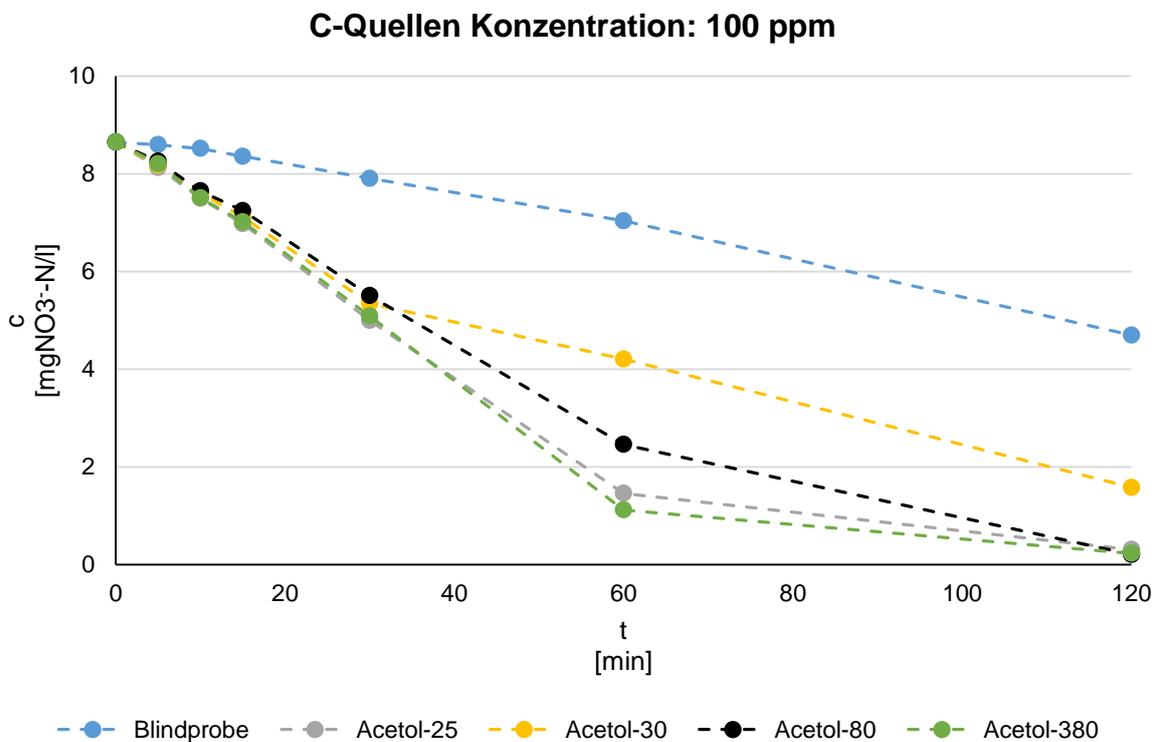


Abbildung 7: Simulation der Denitrifikation mit einer Konzentration der C-Quellen von jeweils 100 ppm

Mit einer Konzentration von 8,65 mg NO<sub>3</sub>-N/L zu Beginn, wird eine ähnliche Größenordnung wie in den vorangegangenen zwei Versuchen erreicht. Damit können später die Ergebnisse besser verglichen werden. Nun werden allerdings die C-Quellen so zudosiert, dass eine Konzentration von 100 ppm vorliegt. Nach zwei Stunden hat die Blindprobe einen Wert von 4,70 mg NO<sub>3</sub>-N/L erreicht. In den Bechergläsern mit Acetol-380, Acetol-25 und Acetol-80 wurde bereits nach 60 Minuten einen Großteil des Nitrats abgebaut. Bis zum Ende des Versuchs ändert sich der Wert kaum noch. Mit 0,23 mg NO<sub>3</sub>-N/L, 0,31 mg NO<sub>3</sub>-N/L und 0,21 mg NO<sub>3</sub>-N/L sind die Werte zum Ende nahezu identisch. Auch Acetol-30 zeigt eine deutliche Verbesserung mit einem Endwert von 1,58 mg NO<sub>3</sub>-N/L.

Die Rahmenbedingungen für den Verlauf in Abbildung 8 sind identisch mit den drei vorangegangenen Versuchen. Nun werden aber die Dosierempfehlungen des Herstellers berücksichtigt. Diese sind in Tabelle 3 dargelegt. Demnach richtet sich die Dosierung nach der Anfangskonzentration von 8,24 mg NO<sub>3</sub>-N/L.

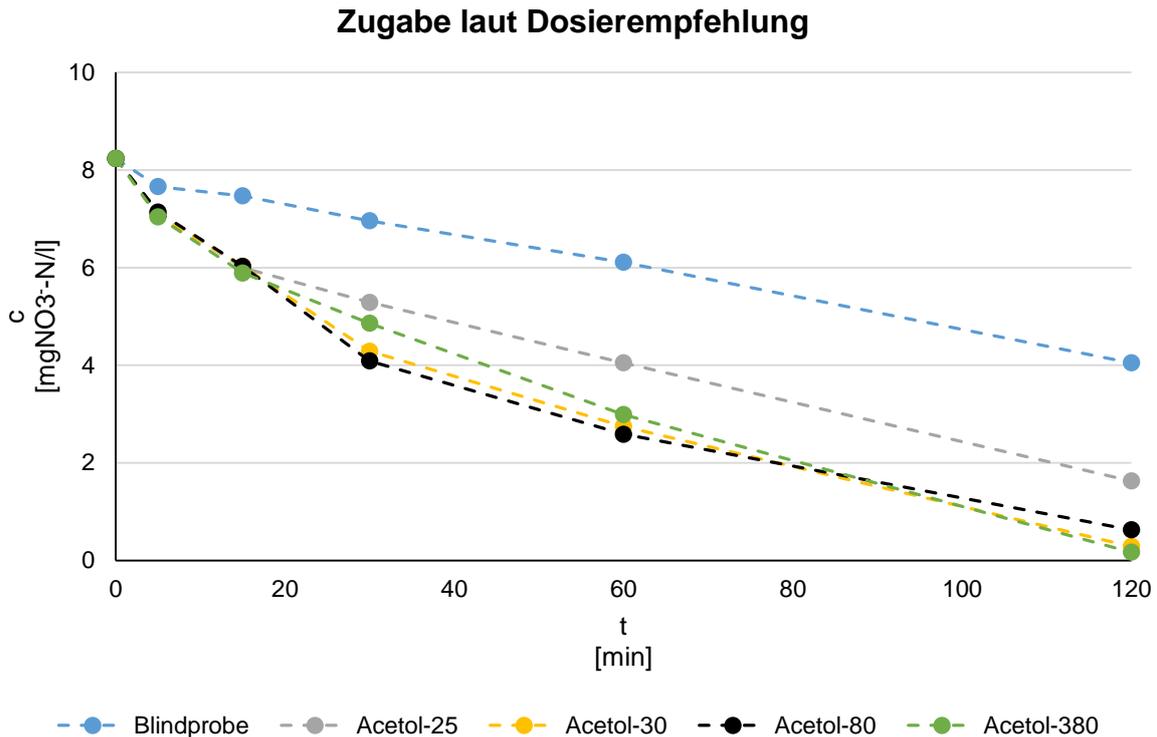


Abbildung 8: Simulation der Denitrifikation mit einer C-Quellen Konzentration entsprechend der Herstellerempfehlung aus Tabelle 3

So werden von Acetol-25 32 mg benötigt. Unter Berücksichtigung der Dichte von 1,1 mg/ $\mu$ L ergibt das 29  $\mu$ L Acetol-25. Dies entspricht einer Konzentration von 29 ppm bei einem Gesamtvolumen von 1 L. Die Konzentrationen für Acetol-30, Acetol-80 und Acetol-380 sind der Reihe nach 112 ppm, 28 ppm und 24 ppm. Alle vier Bechergläser zeigen vom Start bis zu Minute 15 einen nahezu identischen Verlauf. Ab Minute 15 gibt es leichte Unterschiede. So zeigt das Becherglas mit Acetol-25 die schlechteste Abbaurrate verglichen mit den drei anderen. Dabei stellt sich nach zwei Stunden ein Wert von 1,63 mg  $\text{NO}_3\text{-N/L}$  ein. Im Vergleich dazu liegt der Wert der Blindprobe nach zwei Stunden bei 4,05 mg  $\text{NO}_3\text{-N/L}$ . Die Nitratkonzentrationen nach zwei Stunden für Acetol-30, Acetol-80 und Acetol-380 sind der Reihe nach. 0,29 mg  $\text{NO}_3\text{-N/L}$ , 0,63 mg  $\text{NO}_3\text{-N/L}$  und 0,17 mg  $\text{NO}_3\text{-N/L}$ .

Ob sich die Brennschlempe dazu eignet als externe C-Quelle zu dienen, soll Abbildung 9 klären. Wieder werden 1 L Belebtschlamm aus dem Zulauf des Denitrifikationsbeckens jeweils auf fünf verschiedene Bechergläser aufgeteilt. Die Konzentration des Nitrats liegt zu Beginn bei 8,1 mg  $\text{NO}_3\text{-N/L}$ . Abgesehen von der Blindprobe werden jeweils 0,1 ml, 0,3 ml, 0,5 ml oder 0,8 ml Brennschlempe hinzugegeben. Der CSB-Gehalt der Brennschlempe wird mit Hilfe eines Küvettentests bestimmt und hat einen Wert von 48700 mg  $\text{O}_2\text{/L}$ .

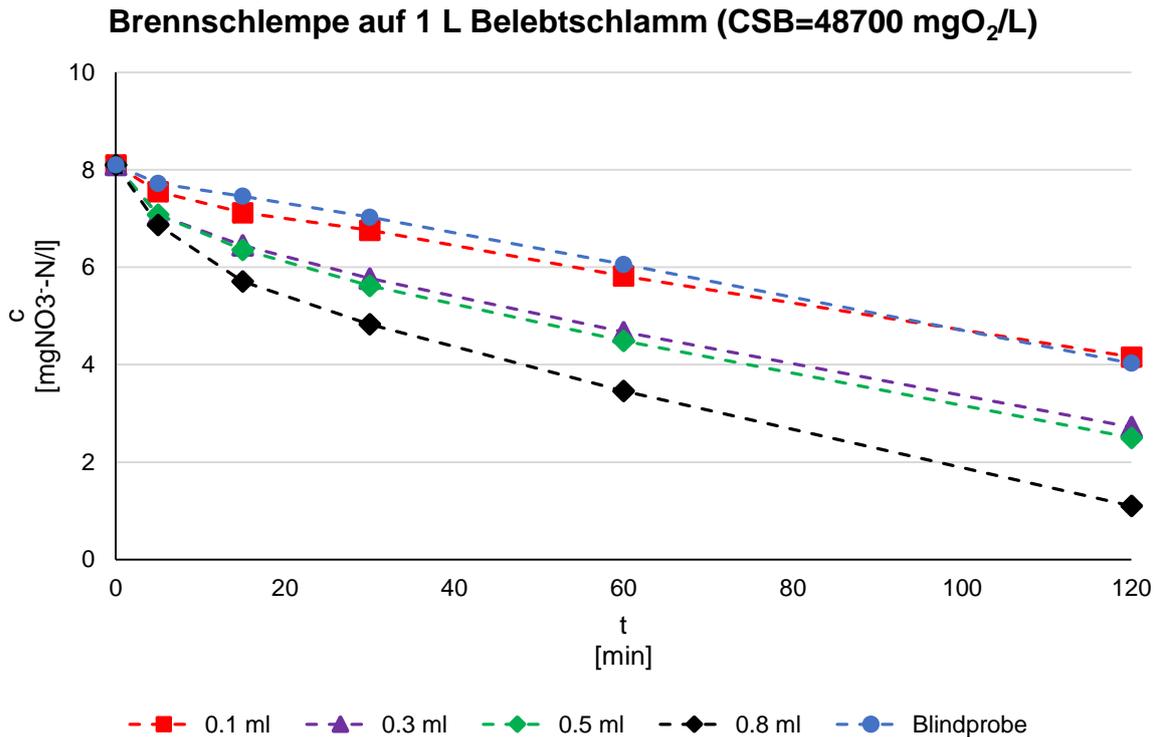


Abbildung 9: Brennschlempe als C-Quelle während der Denitrifikation

Die Zugabe von 0,1 ml Brennschlempe zeigt keine Verbesserung des Nitratabbaus. So liegt nach zwei Stunden der Wert mit 4,16 mg NO<sub>3</sub>-N/L sogar minimal über der Konzentration der Blindprobe mit 4,03 mg NO<sub>3</sub>-N/L. Nach zwei Stunden erreicht das Becherglas mit 0,3 ml Brennschlempe eine Konzentration von 2,72 mg NO<sub>3</sub>-N/L und das Becherglas mit 0,5 ml Brennschlempe 2,50 mg NO<sub>3</sub>-N/L. Erst ab einer Zugabe von 0,8 ml Brennschlempe kann von einem vollständigen Abbau innerhalb der zwei Stunden gesprochen werden. Dieser Wert beläuft sich auf 1,10 mg NO<sub>3</sub>-N/L.

## 5.2 Laborversuch zur Ermittlung der Effektivität der C-Quellen bezogen auf die biologische Phosphoreliminierung

Ob mit den externen C-Quellen eine Verbesserung der Bio-P Eliminierung zu erreichen ist, soll Abbildung 10 zeigen. Beim Versuch wurde der Zyklus aus anoxischen, anaeroben und aeroben Bedingungen nachgestellt. Während des Versuchs werden in regelmäßigen Abständen die Konzentrationen des Ortho-Phosphats mit Hilfe eines Küvettentests bestimmt. Zusätzlich wird bis zum vollständigen Abbaus die Nitratkonzentration ermittelt.

## 0,1 ml Acetole und 0,5 ml Schlempe auf 1 L Belebtschlamm

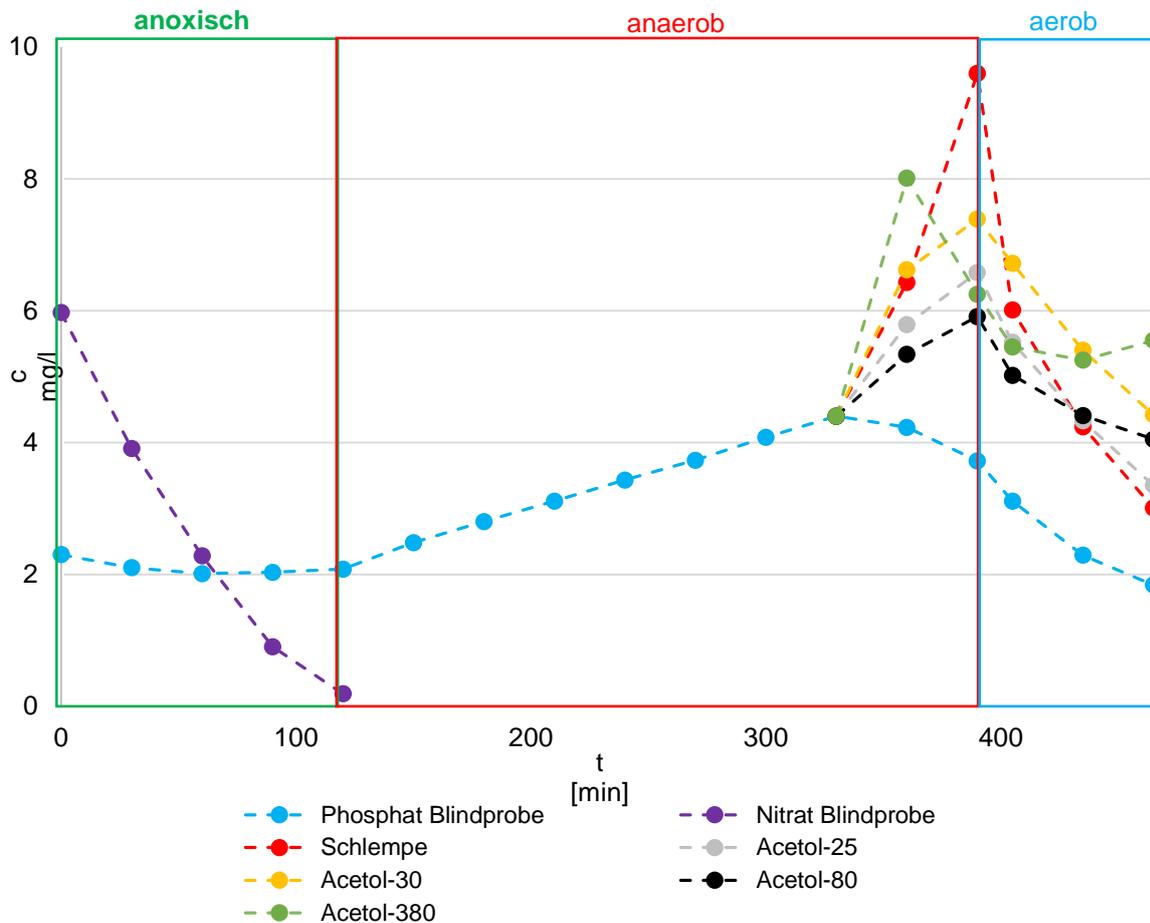


Abbildung 10: Simulation der zyklischen Bio-P-Eliminierung mit dem Zusatz von C-Quellen

Die Konzentration von Nitrat liegt zu Beginn bei 5,97 mg  $\text{NO}_3\text{-N/L}$  und die Konzentration des Ortho-Phosphats bei 2,30 mg  $\text{PO}_4\text{-P/L}$ . Es dauert 120 Minuten bis das Nitrat mit 0,19 mg  $\text{NO}_3\text{-N/L}$  komplett abgebaut ist. Bis dahin verändert sich der Wert des Ortho-Phosphats nicht signifikant. Ab 120 Minuten kann ein stetiger Anstieg festgestellt werden. Der Höchstwert befindet sich bei 330 Minuten und erreicht 4,40 mg  $\text{PO}_4\text{-P/L}$ . Ab diesem Zeitpunkt wird der Schlamm auf sechs verschiedene Bechergläser aufgeteilt. Eines dient der Bestimmung der Blindprobe. In ein weiteres Becherglas werden 0,5 ml Brennschlempe gegeben. In die restlichen vier Bechergläser werden jeweils 0,1 ml eines Acetols hinzudosiert. Dabei ist eine zusätzliche Rücklösung des Ortho-Phosphats zu beobachten, während in dem Becherglas der Blindprobe schon ein Abbau zu verzeichnen ist. Eine besonders hohe Rücklösung ist bei Acetol-380 zu beobachten. Hier wird ein Wert von 8,01 mg  $\text{PO}_4\text{-P/L}$  erreicht. Den höchsten Wert kann das Becherglas mit der Brennschlempe verzeichnen. Dieser Wert liegt bei 9,60 mg  $\text{PO}_4\text{-P/L}$ . Allerdings ist dieser Wert separat zu behandeln, da bezogen auf das Volumen das fünfache hinzugegeben wurde. Den niedrigsten Wert erreicht Acetol-80 mit 5,91 mg  $\text{PO}_4\text{-P/L}$ .

P/L. Nach 390 min wird die Belüftung eingeschaltet um aerobe Bedingungen zu gewährleisten. Nach 465 Minuten wurde der Versuch abgebrochen, da die Aufenthaltszeit in den dementsprechenden Becken auf der Kläranlage bei weitem übersteigt. Zum Ende des Versuches hat allein die Blindprobe eine Netto-Aufnahme des Ortho-Phosphats zu verzeichnen.

In Abbildung 11 wird Acetol-80 schon zu Beginn des Versuchs hinzugegeben, um die anoxischen Verhältnisse so kurz wie möglich zu gestalten.

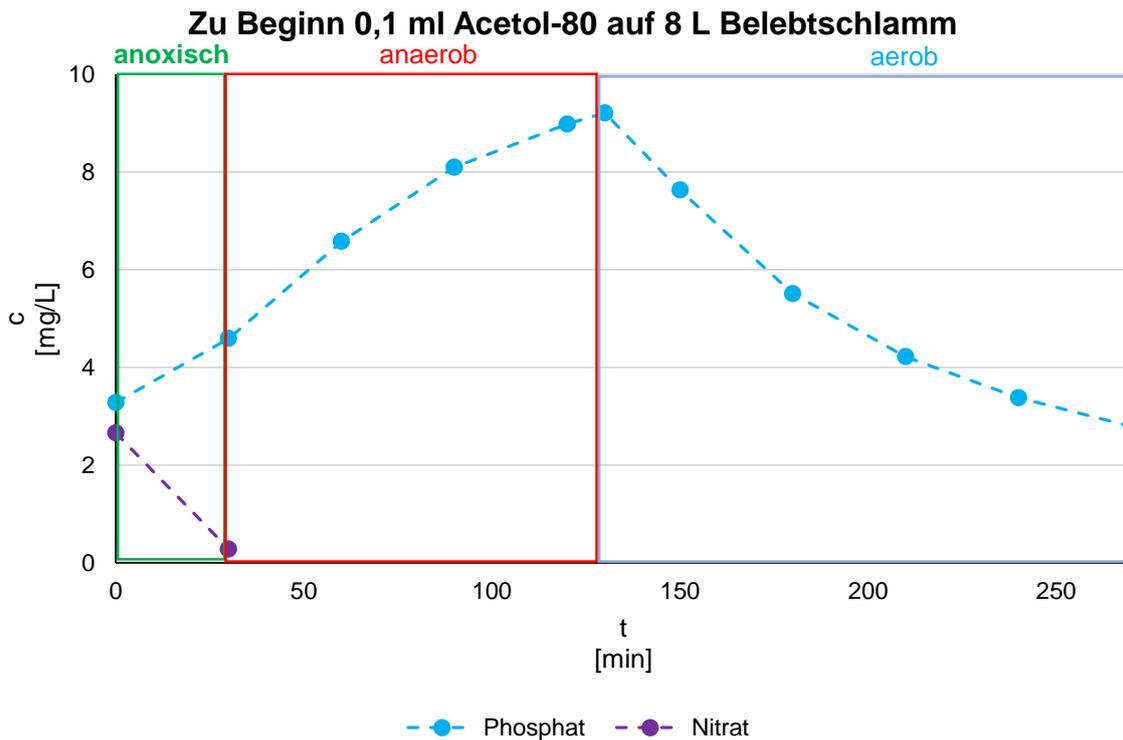


Abbildung 11: Simulation der Bio-P-Eliminierung mit 0,1 ml Acetol-80 auf 8 L Belebtschlamm

Schon bei der ersten Messung nach 30 Minuten ist der Nitrat-Wert von 2,66 mg NO<sub>3</sub>-N/L auf 0,28 mg NO<sub>3</sub>-N/L gefallen. Der Ortho-Phosphat-Wert steigt innerhalb von 130 Minuten von 3,28 mg PO<sub>4</sub>-P/L auf 9,21 mg PO<sub>4</sub>-P/L. Ab 130 Minuten herrschen aerobe Bedingungen. Dies führt dazu, dass nach 270 Minuten die Konzentration auf 2,79 mg PO<sub>4</sub>-P/L fällt. Dabei wurden demnach knapp 0,5 mg PO<sub>4</sub>-P/L über Bio-P eliminiert.

### 5.3 Erhöhung der Fällmittelmenge bezogen auf neuen Zielwert von $P_{ges} \leq 0,5 \text{ mg/l}$

Um später die Kosten vergleichen zu können, wurde innerhalb von 10 Tagen die Zudosierung des Fällmittels so eingestellt, dass der neue Zielwert von  $P_{ges} \leq 0,5 \text{ mg/l}$  eingehalten wird. Als Regelglied wird dabei der Ortho-Phosphat-Analyser in der Belebung genutzt. Die Grenzwerte können in 224.3 nachgelesen werden.

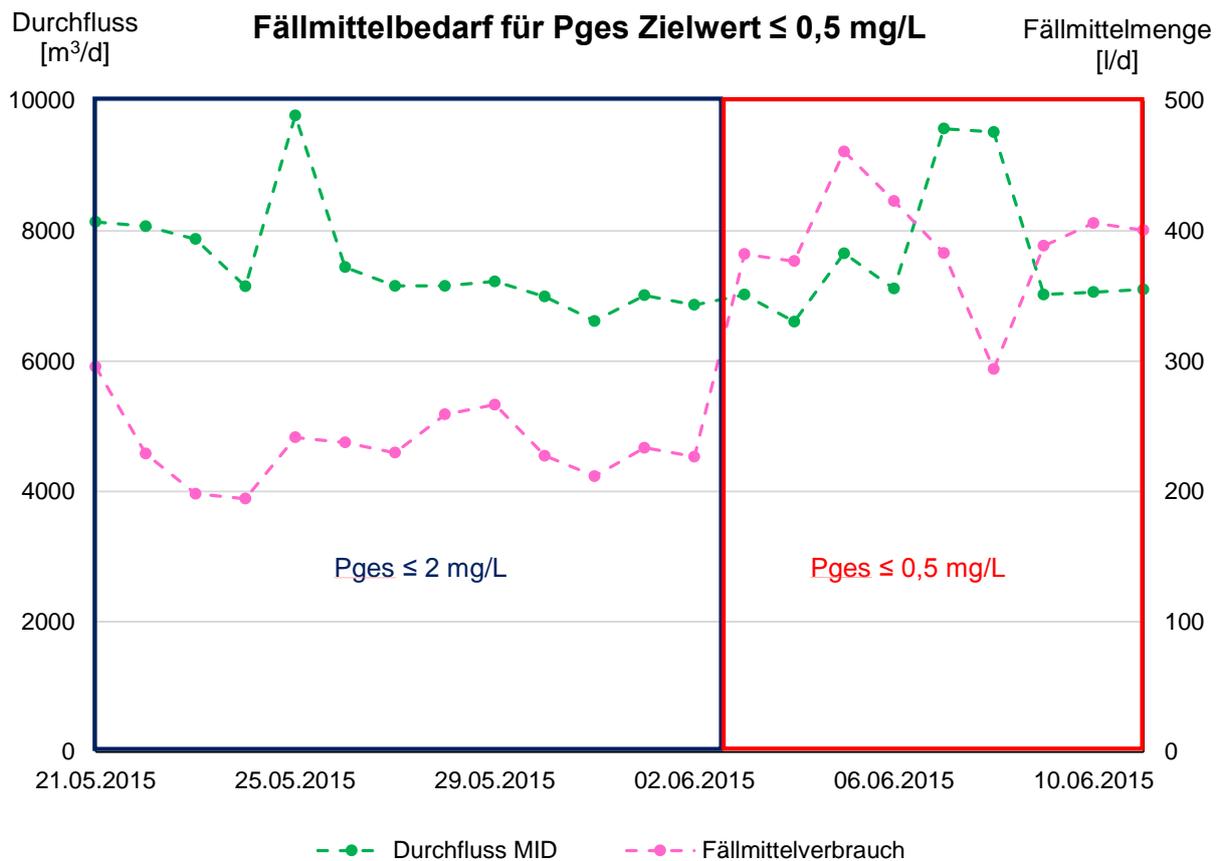


Abbildung 12: Veränderung des Fällmittelbedarfs bei Einstellung des Pges Zielwertes von  $\leq 0,5$  mg/L

Abbildung 12 zeigt den Übergang des Fällmittelbedarfs bei einem Zielwert für  $P_{ges}$  von  $\leq 2$  mg/L auf  $\leq 0,5$  mg/L. Zusätzlich wird die Durchflussmenge, welche die Kläranlage durchströmt, dargestellt. Es wird fast doppelt so viel Fällmittel benötigt wie davor. Am 08.06.2015 ist zudem zu erkennen, dass bei steigendem Zulauf der Fällmittelbedarf abnimmt.

#### 5.4 Verifizierung der Dosierstelle für die Zugabe der C-Quellen in die biologische Stufe

Aus Abbildung 4 kann entnommen werden, wo die Nitratkonzentrationen gemessen wurden. Dies soll Aufschluss geben über eine geeignete Dosierstelle für die externe Kohlenstoffquelle. Die Ergebnisse werden in Tabelle 7 dargestellt. Der Zeitpunkt wurde so gewählt, dass die Belastungsspitze am Mittag berücksichtigt wird.

Tabelle 7: Ergebnisse der Bestandsaufnahme der Nitratkonzentrationen während einer Belastungsspitze am Mittag

Alle Angaben in mg NO <sub>3</sub> -N pro Liter	
Vorklärung	2,82
Rücklaufschlamm	15,70
Ende Anaerobzone	2,28
Rezirkulation	14,20
Ende Denitrifikation	2,79

Die Ergebnisse zeigen, dass zu diesem Zeitpunkt 15,70 mg NO<sub>3</sub>-N/L über den Rücklaufschlamm zurückgefördert wurden. In der Vorklärung liegt der Wert bei 2,82 mg NO<sub>3</sub>-N/L. Am Ende der Anaerobzone sind immer noch 2,28 mg NO<sub>3</sub>-N/L vorhanden. Dazu kommen aus der Rezirkulation 14,20 mg NO<sub>3</sub>-N/L. Der Nitrat-Wert am Ende der 2. Kaskade der Denitrifikationszone beträgt 2,79 mg NO<sub>3</sub>-N/L.

### 5.5 Anwendung auf den Klärbetrieb

Zur Anwendung auf der Kläranlage wurde Acetol-80 gewählt. Die Auswahlkriterien werden in 6.2 erläutert. In Abbildung 13 werden die Konzentrationen der Nitratsonde aus der 2. Kaskade des Denitrifikationsbeckens und der Nitratsonde am Ende der Belebung aufgetragen. Zudem zeigt die graue Linie die Dosiermenge von Acetol-80 an. Das Acetol-80 wird in die Überlauftrinne am Ende des Anaerobbeckens hinzu gegeben.

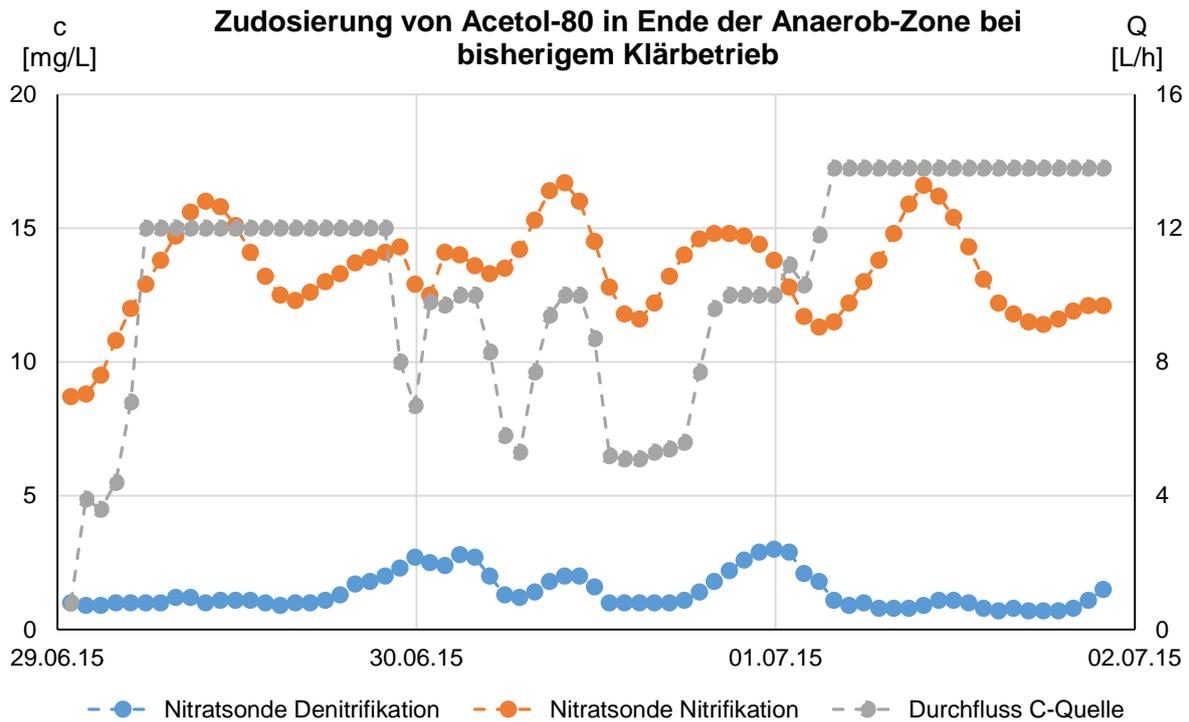


Abbildung 13: Verlauf der Nitratkonzentrationen bei Zudosierung von Acetol-80 in bisherigem Klärbetrieb

Der erste Testlauf dauert vier Tage an. Ziel war es, erste Erkenntnisse zur Steuerung zu sammeln. Am ersten Tag wurde die Pumpe auf eine maximale Förderleistung von 12 L/h eingestellt. Am zweiten Tag wurde über die Nitratsonde im Denitrifikationsbecken geregelt. Da im Gegensatz zum herkömmlichen Klärbetrieb keine signifikanten Veränderungen zu beobachten waren, wurde die Förderleistung am dritten Tag für die C-Quellen Dosierung konstant auf einen maximal verfügbaren Wert von 14 L/h eingestellt. Zusätzlich wurde die Rezirkulation konstant auf 300 % gesetzt. Den Verlauf der Nitratkonzentrationen am darauffolgenden Tag kann aus Abbildung 14 entnommen werden.

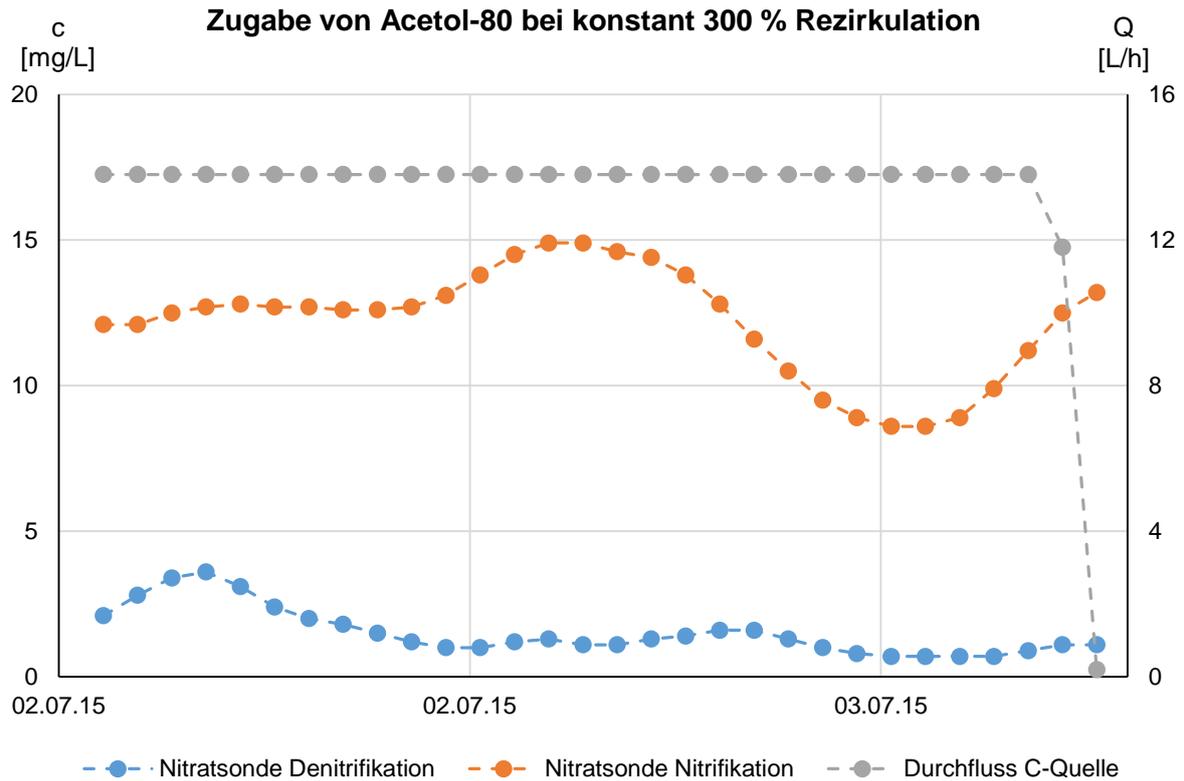


Abbildung 14: Verlauf der Nitratkonzentration bei Zudosierung von Acetol-80 während einer Rezirkulation von 300%

Der Tageshöchstwert für  $\text{NO}_3\text{-N/L}$  lag dabei bei knapp 15 mg/L. In den darauffolgenden Tagen wurde eine provisorische Leitung vom Zentralspeicher direkt zum Überlaufkopf vor dem Nitrifikationsbecken verlegt. Zudem wurde die Nitratsonde aus dem Denitrifikationsbecken von der zweiten in die dritte Kaskade verlegt. Wie sich das auf die Abbauleistung des Nitrats auswirkt zeigt Abbildung 15.

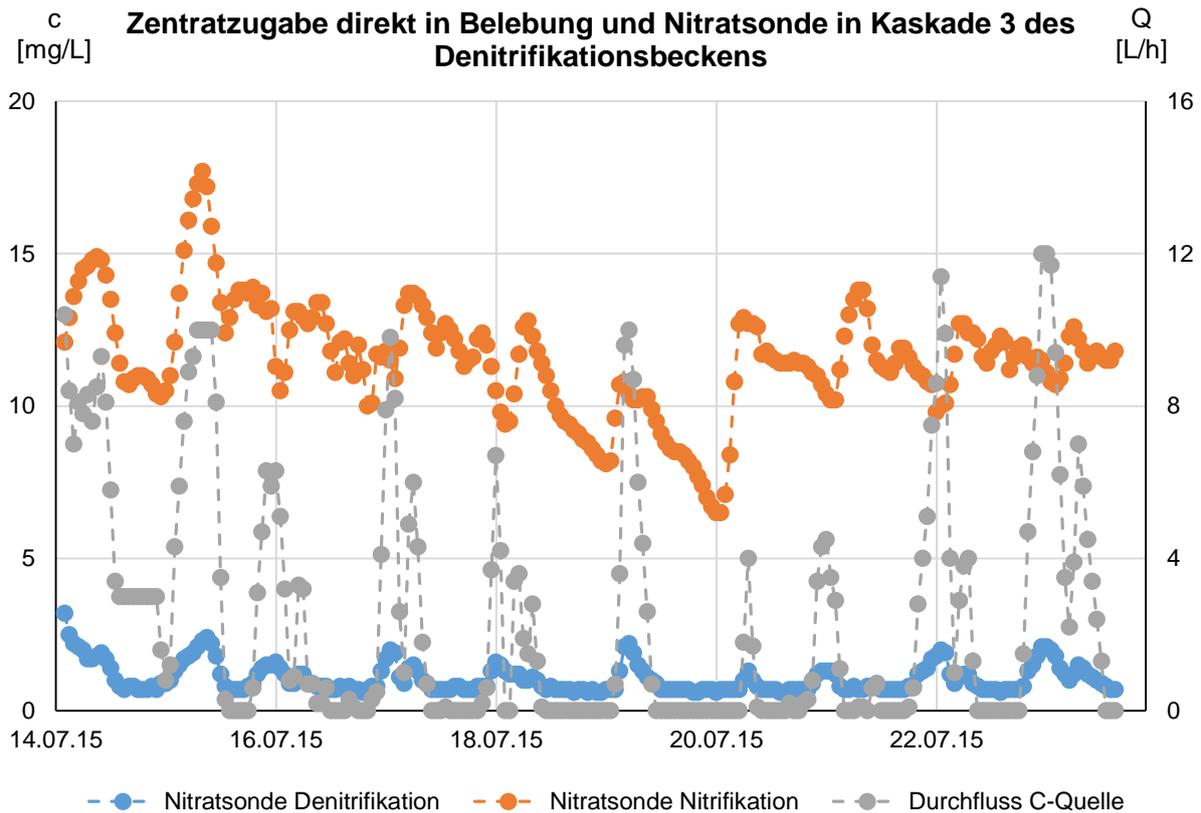


Abbildung 15: Verlauf der Nitratkonzentration bei einer Zentratzugabe direkt in den Überlaufkopf vor der Nitrifikationsstufe

Geregelt wird wieder über die Nitratsonde aus der Denitrifikation. Die maximale Förderleistung der Kolben-Membran-Pumpe für die Dosierung der C-Quelle liegt bei 12 L/h. Eingeschaltet wird die Pumpe bei 0,8 mg  $\text{NO}_3\text{-N/L}$  im Ablauf der Denitrifikation. Die maximale Förderleistung wird bei 2,0 mg  $\text{NO}_3\text{-N/L}$  erreicht. Falls der Wert des Nitrats im Ablauf der Nitrifikation 10 mg  $\text{NO}_3\text{-N/L}$  unterschreitet wird die Pumpe ausgeschaltet. Nach den ersten zwei Tagen ist eine deutliche Verbesserung der Abbaurrate zu erkennen. Nur noch vereinzelt steigen die Werte knapp über den Grenzwert von 13 mg  $\text{NO}_3\text{-N/L}$ .

Um zusätzlich eine Bio-P-Elimination zu erreichen, wurde die Rezirkulation in die zweite Kaskade des Denitrifikationsbeckens geleitet. Durch die Optimierung eines Frequenzumrichters für eine der zwei Rezirkulationspumpen, konnte nun eine Rezirkulationsleistung von 320 % erreicht werden. Wie sich dies auf die Reinigungsleistung ausgewirkt hat, wird in Abbildung 16 illustriert.

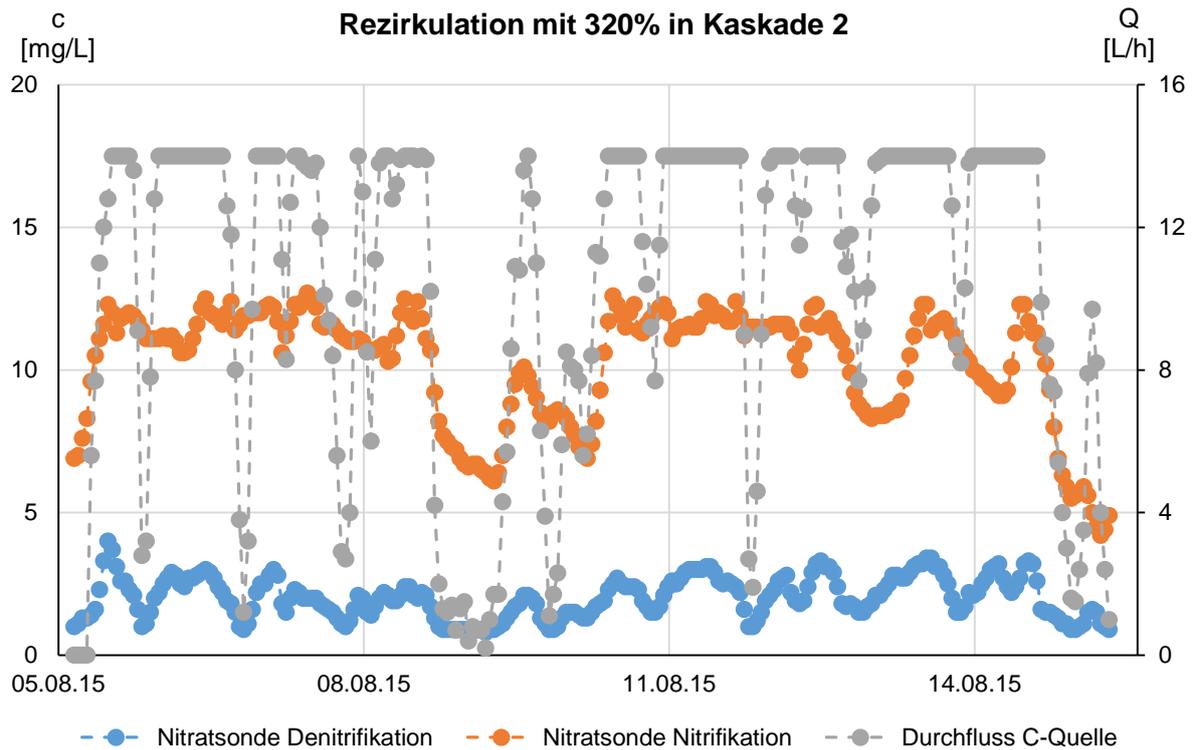


Abbildung 16: Verlauf der Nitratkonzentration bei einer Rezirkulation von 320% in Kaskade 2 der Denitrifikationsstufe

Zu sehen ist ein deutlicher Anstieg des C-Quellen-Verbrauchs. Die maximalen Nitratkonzentrationen am Ende der Nitrifikation sind aber konstant unter dem Grenzwert von 13 mg  $\text{NO}_3\text{-N/L}$ . Ob eine Bio-P-Elimination stattfindet, kann zum einen über die Beta-Werte und zum anderen über den Verlauf der Fällmittelkurve ermittelt werden. Abbildung 17 zeigt vereinzelte Beta-Tageswerte. Dabei werden nur Beta-Werte gekennzeichnet bei denen drei Tage am Stück Trockenwetterverhältnisse geherrscht haben.

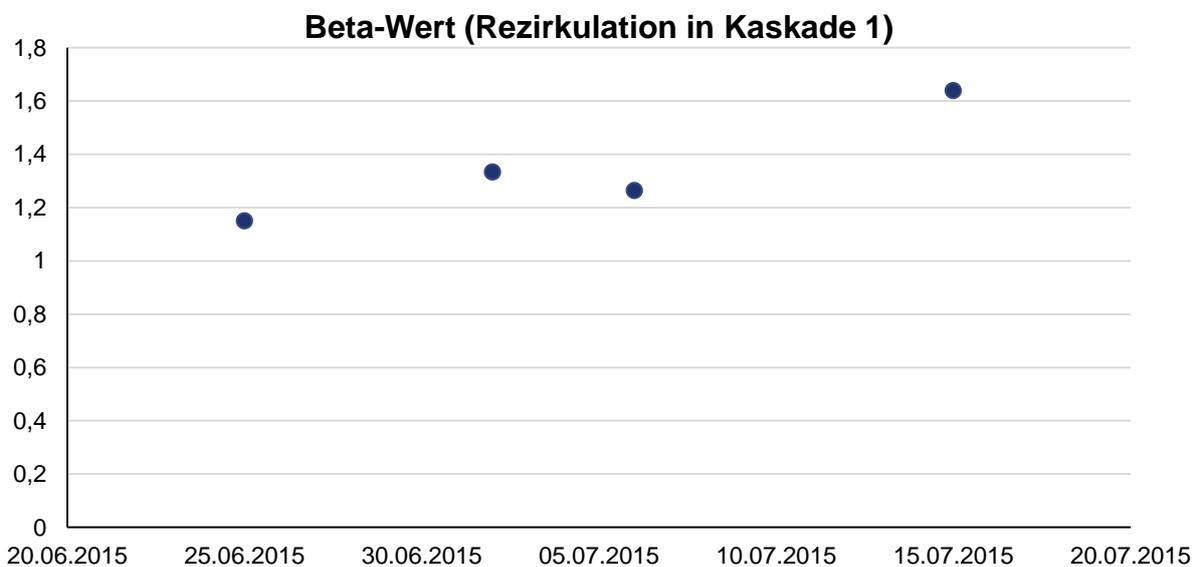


Abbildung 17: Beta-Werte bei Rezirkulation in Kaskade 1

Die Werte zeigen, dass konstant überstöchiometrisch gefällt wird, wenn die Rezirkulation in die erste Kaskade des Denitrifikationsbeckens geleitet wird. Abbildung 18 stellt die Beta-Tageswerte nach Umstellung der Rezirkulation in Kaskade zwei dar. Dabei ist zu erkennen, dass an vier Tagen unterstöchiometrisch gefällt wird. Zudem liegt der Maximalwert unter 1,4.

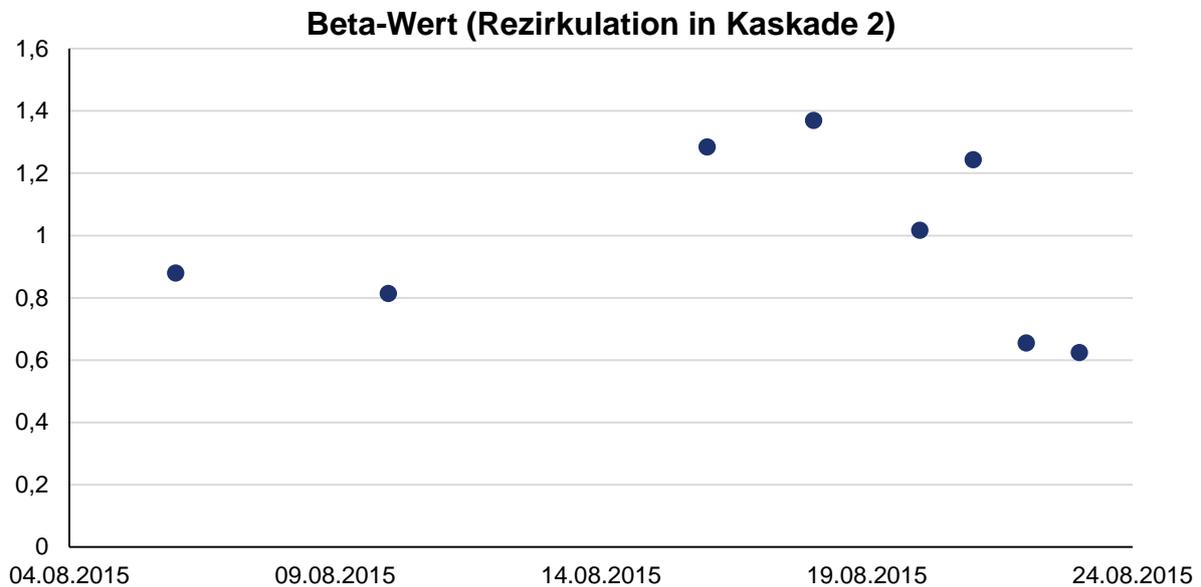


Abbildung 18: Beta-Werte bei Rezirkulation in Kaskade 2

Die zweite Möglichkeit die Bio-P-Elimination nachzuweisen, ist der Fällmittelverbrauch. Dieser wird in Abbildung 19 auf die Zeit aufgetragen. Die dunkelblaue Umrandung zeigt den Zeitraum in dem die Rezirkulation in Kaskade eins geleitet wurde. Die rote Umrandung markiert den Zeitraum ab dem die Rezirkulation in Kaskade zwei gepumpt wird. Schon nach einem Tag ist eine Abnahme des Fällmittelbedarfs zu erkennen. Sechs Tage nach der Umstellung wird zeitweise gar kein Fällmittel mehr benötigt.

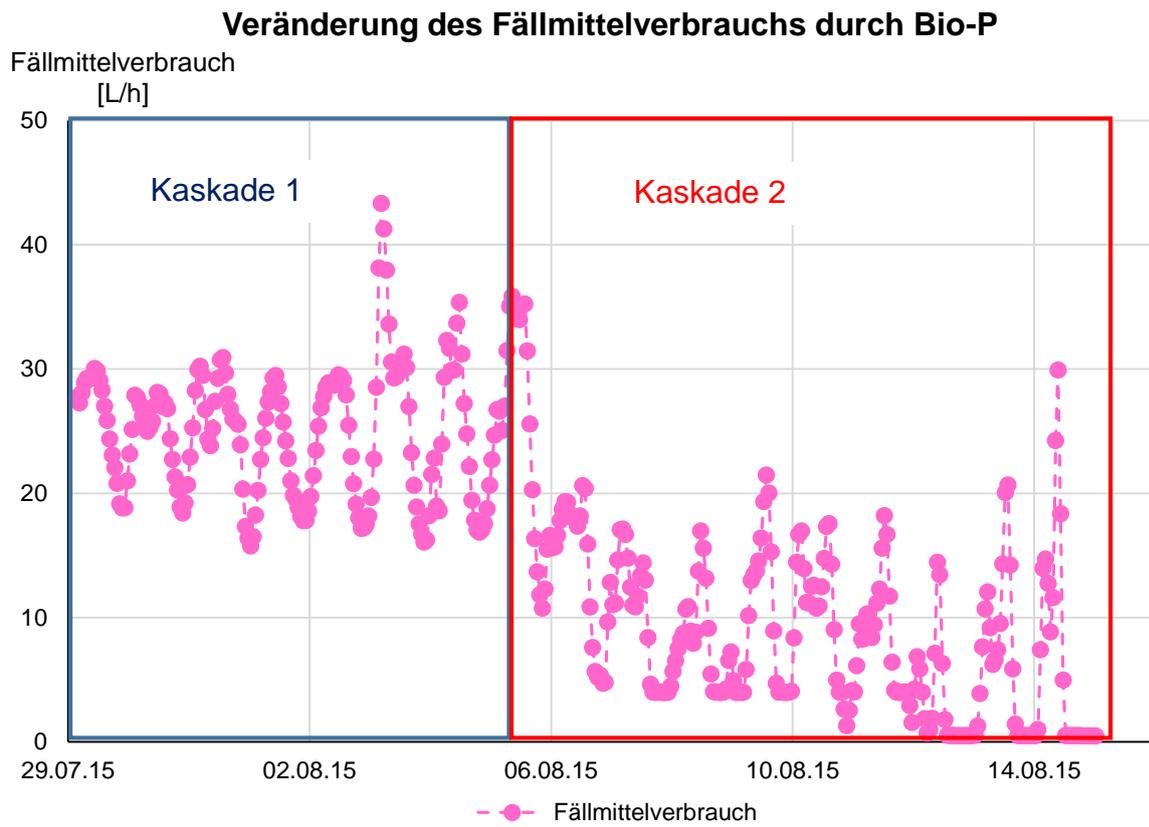


Abbildung 19: Veränderung des Fällmittelverbrauches bei Umstellung der Rezirkulation in Kaskade 2

## 6. Diskussion

### 6.1 Laborversuch zur Ermittlung der Effektivität der C-Quellen bezogen auf die Denitrifikation

Die Ergebnisse zur Verbesserung der Denitrifikationsleistung durch externe C-Quellen werden in 5.1 dargestellt. Vor Beginn des Versuchs wird die Rezirkulationsmenge auf 300 % gesetzt um eine Erhöhung des Nitratwertes im Denitrifikationsbecken zu erreichen. Somit kann die Versuchsdauer den Gegebenheiten im Denitrifikationsbecken angepasst werden. Bei allen fünf Versuchsreihen wird dabei eine Anfangskonzentration des Nitrats von 8-10 mg NO<sub>3</sub>-N/L erreicht. Die Versuchsdauer von zwei Stunden ist gleich der Aufenthaltszeit des Abwassers im Denitrifikationsbecken bei einem Rücklaufschlammverhältnis von 100 % und einer Rezirkulationsrate von 300 %. Die Aufenthaltszeit von zwei Stunden beruht dabei auf Trockenwetterverhältnisse mit einem täglichen Zulauf von ca. 7000 m<sup>3</sup>. Die drei Kaskaden des Denitrifikationsbeckens ergeben zusammen ein Volumen von 3000 m<sup>3</sup>.

Die ersten drei Versuchsreihen sollen Aufschluss darüber geben, ob die externen C-Quellen in hohen als auch in niedrigen Konzentrationen zu einer Verbesserung der Denitrifikationsrate führen.

Die Nitratkonzentrationen in Abbildung 5 haben nach fünf Minuten einen höheren Wert wie zu Beginn des Versuchs. Abbildung 6 und Abbildung 7 weisen darauf hin, dass es sich dabei um einen Messfehler handeln muss. Dabei geht der Ausgangspunkt zu Beginn von einer einzelnen Messung der Blindprobe aus. Der Messfehler kann durch Verschmutzung der Geräte oder durch Verunreinigung der Probe zustande gekommen sein. Acetol-25, Acetol-80 und Acetol-380 haben eine deutliche Verbesserung der Denitrifikation zur Folge schon ab einer geringen Konzentration von 25 ppm. Acetol-30 wirkt sich bei einer Konzentration von 25 ppm noch nicht positiv aus. Ab einer Konzentration von 50 ppm kommt es bei Acetol-25, Acetol-80 und Acetol-380 nach zwei Stunden schon zu einem nahezu kompletten Abbau von Nitrat. Acetol-80 erreicht einen Wert unter 1 mg NO<sub>3</sub>-N/L sogar schon nach einer Stunde. Vergleicht man diesen Verlauf mit dem aus Abbildung 7 so kommt man zu dem Schluss, dass die Ergebnisse der Inhomogenität des Abwassers unterliegen. So ist zu erwarten, dass bei einer Verdopplung der C-Quellen-Zugabe eine Steigerung des Nitratverbrauchs zu beobachten ist. Wie Abbildung 7 zeigt ist dem aber nicht so. Nichtsdestotrotz weisen Acetol-25, Acetol-80 und Acetol-380 auch bei einer Konzentration von 100 ppm einen vollständigen Verbrauch von Nitrat innerhalb von zwei Stunden auf. Acetol-30 hat bei 50 ppm mit über 2 mg NO<sub>3</sub>-N/L nach zwei Stunden zwar eine Verbesserung gegenüber der Blindprobe zur Folge, kann aber mit der Effektivität der

anderen drei C-Quellen nicht mithalten. Einer der Gründe kann auf die Zusammensetzung von Acetol-30 zurückzuführen sein (siehe Tabelle 1). Demnach ist Acetol-30 eine 25 %ige Natriumacetatlösung und eignet sich mit seinem hohen pH-Wert (Tabelle 3) vor allem für Abwässer, die eine geringe Säurekapazität aufweisen.

Die Dosierempfehlungen in Abbildung 8 richten sich nach den Herstellerangaben in Tabelle 3. Bei einer Fracht von 8,24 mg NO<sub>3</sub>-N sind 29 ppm Acetol-25 nötig. Von Acetol-30 sind es 112 ppm. Acetol-80 liegt bei 28 ppm und von Acetol-380 wird 24 ppm empfohlen. Wie zu erwarten war, verlaufen die einzelnen Kurven nahezu parallel zueinander. Mit dem großen Unterschied, dass nun Acetol-25 die schlechteste Abbaurate aufweist. Selbst Acetol-30 hat nach zwei Stunden das Nitrat komplett abgebaut. Allerdings sei erwähnt, dass dazu auch mehr als das Vierfache an Volumen gegenüber Acetol-380 nötig war um die gleichen Abbauraten zu erreichen. Bezogen auf die Denitrifikationsrate kristallisieren sich klar Acetol-80 und Acetol-380 heraus. Das bedeutet, dass der Belebtschlamm eine deutliche Verbesserung der Denitrifikationsrate bei Zugabe von Essigsäure zeigt. Ein ähnliches Ergebnis erzielten auch Peng et al. (2006). Dabei wurden bei einem Batch-Test die Nitrat-Verwertungs-Raten bei Zugabe von Methanol, Ethanol und Acetat verglichen. Acetat hat dabei mit einer Nitrat-Verwertungs-Rate von 12 mgN/gVSS·h die besten Ergebnisse erzielt. Bei Versuchen mit einem Biofilm-Reaktor im Labormaßstab, kamen Ethanol, Methanol, Glukose und Acetat als Kohlenstoffquellen zum Einsatz. Hier zeigen Actat und Glukose einen nahezu 100%igen Abbau von Nitrat. Allerdings wird bei Glukose ein bedeutender Anteil an NH<sub>3</sub>-N und NO<sub>2</sub>-N gebildet.<sup>23</sup>

In Abbildung 9 ist auf den ersten Blick ersichtlich, dass auch eine Zugabe von Brennschlempe zu einer Verbesserung der Denitrifikation führen kann. Vergleicht man die Kurve mit einer Zugabe von 0,8 ml Brennschlempe mit dem Verlauf von Acetol-80 aus Abbildung 8 wird schnell klar, dass eine deutlich größere Menge Brennschlempe erforderlich ist, bei gleicher Reinigungsleistung. Beide Anfangskonzentrationen liegen bei knapp über 8 mg NO<sub>3</sub>-N/L und nach zwei Stunden kann bei beiden eine nahezu vollständige Stickstoffeliminierung vermerkt werden. Somit wäre der Bedarf an Brennschlempe in diesem Fall um über 28 mal höher gegenüber dem Bedarf an Acetol-80. Der CSB-Wert der Brennschlempe lag bei 48700 mg O<sub>2</sub>/L. Die Vergangenheit hat gezeigt dass die CSB-Werte der Brennschlempe zwischen 40000 und 50000 mg O<sub>2</sub>/L schwanken. Somit kann auch nicht mit bedeutend besseren Denitrifikationsraten gerechnet werden. Zusätzlich hat ein Probelauf mit der Kolben-

---

<sup>23</sup> (Srinandan, et al., 2012)

Membran-Pumpe gezeigt, dass durch die grobe Zusammensetzung der Schlempe die Gefahr besteht die Pumpe zu verstopfen.

## 6.2 Laborversuch zur Ermittlung der Effektivität der C-Quellen bezogen auf die biologische Phosphoreliminierung

Ob die Zugabe von externen C-Quellen auch zu einer Verbesserung der Bio-P-Elimination führt, kann aus den Ergebnissen in 5.2 entnommen werden. Abbildung 10 zeigt klare Parallelen zu den Erkenntnissen von Shun-Hsing et al. (1996). Demnach hemmt Nitrat die Bio-P-Elimination, wenn zu wenig abbaubarer organischer Kohlenstoff vorhanden ist.

So kann erst nach 2 Stunden von anaeroben Bedingungen gesprochen werden. Erst ab diesem Zeitpunkt kommt es zu einer Rücklösung des Ortho-Phosphats. Nachdem die Rücklösung ihr Plateau erreicht hat, wird der Schlamm auf sechs verschiedene Bechergläser aufgeteilt, damit die C-Quellen hinzugegeben werden können. Es kommt in den Bechergläsern mit den C-Quellen zwar zu einem starken Anstieg, allerdings kann nach der Belüftungszeit von 70 Minuten einzig die Blindprobe eine Netto Ortho-Phosphat-Reduktion aufweisen.

Ist der Anteil an leicht abbaubarem Kohlenstoff in der anoxischen Zone hoch genug, kann es auch zu einer zeitgleichen Denitrifikation und einer Ortho-Phosphat-Rücklösung kommen. Dies belegt Abbildung 11 eindrucksvoll. In diesem Fall wurde Acetol-80 gleich zu Beginn des Versuchs hinzugegeben. Dabei steigt nicht nur der Anteil an Ortho-Phosphat an, sondern führt auch zu einer schnelleren Abbaurate des Nitrats.

Die Aufenthaltszeit im Anaerobbecken liegt bei einem Rücklaufschlammverhältnis von 100 % bei knapp einer Stunde. Tabelle 7 zeigt, dass diese Zeit gerade reicht um das Nitrat aus der Vorklärung und dem Rücklaufschlamm zu denitrifizieren. Somit ist das „Anaerobbecken“ in Wahrheit ein Becken in dem anoxische Bedingungen vorherrschen und durch einen zu geringen Anteil an CSB aus der Vorklärung eine Bio-P-Eliminierung unmöglich macht.

Die Kriterien bei der Auswahl einer geeigneten C-Quelle beziehen sich dadurch vorerst nur auf die Verbesserung der Denitrifikation. Die Nitratfracht die mit Hilfe der C-Quelle behandelt werden kann, ergibt sich aus der Differenz von der Nitratfracht zum Ende der Belebung zu der Nitratfracht zum Ende der Denitrifikation. Da bei der Abbaurate von Nitrat Acetol-80 und Acetol-380 die besten Ergebnisse erzielt haben, soll nun der Kostenfaktor ausschlaggebend sein. Bei einer Fracht von 1 kg NO<sub>3</sub>-N werden 3,8 kg Acetol-80 und 3,2 kg Acetol-380 benötigt. Der Preis pro Kilogramm liegt bei 0,88 € für Acetol-80 bzw. 1,15 € für Acetol-380. Mit 3,34 €/kgNO<sub>3</sub>-N ist Acetol-80 wirtschaftlicher als Acetol-380 mit 3,68 €/kgNO<sub>3</sub>-N.

### 6.3 Erhöhung der Fällmittelmenge bezogen auf neuen Zielwert von $P_{\text{ges}} \leq 0,5 \text{ mg/l}$

Abbildung 12 zeigt, dass fast doppelt so viel Fällmittel nötig wäre wie bisher, um den neuen Zielwert von  $P_{\text{ges}} \leq 0,5 \text{ mg/l}$  einzuhalten. Zudem ist am 08.06.2015 zu erkennen, dass die Durchflussmenge in der Kläranlage den Fällmittelbedarf stark beeinflusst. Je höher die Zulaufmenge desto niedriger der Fällmittelbedarf. Dies liegt an der Verdünnungswirkung. Die Grenzwerte sind in Konzentrationen vorgegeben und nicht als Frachten. Dazu sei gesagt, dass während des Sommers 2015 in dem die Versuche durchgeführt wurden, der trockenste Sommer seit 2003 herrschte. Während der zehn Tage in denen die Fällmitteldosierung erhöht wurde, kam es zu starkem Flockenabtrieb im Nachklärbecken. Eine Laboruntersuchung des Schwarzwald-Wasser-Labors in Bühl ergab eine Aluminiumkonzentration von  $0,25 \text{ mg/L}$  im Nachklärbecken. Somit würden jeden Tag  $2,5 \text{ kg}$  Aluminium in den Vorfluter entlassen. Es wird vermutet, dass Aluminium unter anderem eine Form von Demenz verursachen kann. So kam es bei Dialysepatienten bei denen Aluminiumsalze eingesetzt wurden, zu Hirnschäden die bis zur schweren Demenz reichten. Die plausibelste Erklärung dafür könnte die Störung des Kalziumhaushaltes sein. Beweisen konnte man das bis heute nicht, allerdings enthalten Dialyseflüssigkeiten heutzutage keine Aluminiumsalze mehr.<sup>24</sup>

### 6.4 Verifizierung der Dosierstelle für die Zugabe der C-Quellen in die biologische Stufe

Da nach den Laborergebnissen die Bio-P-Elimination vorerst außer Acht gelassen wird, konnte das Überlauf-Gerinne am Ende der Anaerobzone als geeignete Dosierstelle ausgemacht werden. Hier wird eine schnelle Durchmischung gewährleistet. Zudem wird das Acetol-80 genau an der Stelle zudosiert, wo es auch seine Verwendung finden soll. Von dort fließt es direkt in die erste Kaskade der Denitrifikation, wo es wiederum mit der hohen Nitratfracht aus der Rezirkulation vermischt wird. Tabelle 7 zeigt, dass der CSB-Anteil in der Vorklärung benötigt wird, um den hohen Anteil an Nitrat aus dem Rücklaufschlamm zu denitrifizieren. Das Acetol-80 wird demnach nur für die Fracht aus der Rezirkulation benötigt.

### 6.5 Anwendung auf den Klärbetrieb

Abbildung 13 zeigt einen ersten Probelauf über drei Tage. Obwohl die maximale Förderleistung der Kolben-Membran-Pumpe zeitweise von  $12$  auf  $14 \text{ L Acetol-80/h}$  erhöht wurde, konnte keine Veränderung der Nitratkonzentration am Ablauf der Nitrifikation beobachtet werden. Daraufhin wurde die Rezirkulation auf konstant  $300 \%$  eingestellt, da das Nitrat erst in der Nitrifikation entsteht und somit zuerst wieder rückgeführt werden muss. In Abbildung 14 ist zu

---

<sup>24</sup> (Fischer, 2014)

erkennen, dass innerhalb von zwei Tagen die Konzentration von  $15 \text{ NO}_3^- \text{-N/L}$  nicht überschritten wird. Nun wurde die Zentratzugabe von der Vorklärung in den Überlaufkopf zu Beginn der Nitrifikation gegeben. Zusätzlich wurde die Nitratsonde der Denitrifikation in die dritte Kaskade verlegt. Beide Veränderungen sollen ein sensibleres Ansprechverhalten bei der Steuerung der Dosierung ermöglichen. So muss das Zentrat, welches eine Ammoniumkonzentration von bis zu  $1000 \text{ mg/L}$  besitzt, nicht erst durch drei verschiedene Becken geführt werden, bevor es in der Nitrifikation oxidiert wird. Da die Zudosierung von Acetol-80 unter anderem über die Nitratsonde geregelt wird, macht es Sinn diese am Ende der Denitrifikation anzubringen, da auch in der dritten Kaskade der Nitratgehalt weiter sinkt. Die Steuerung der C-Quellen-Dosierung ist in 5.5 nachzulesen. Abbildung 15 zeigt nach zwei Tagen eine deutliche Verbesserung der Nitratkonzentration im Ablauf der Nitrifikation. Zum Ende des Versuchs überschreitet die Nitratkonzentration immer seltener den Grenzwert von  $13 \text{ mg NO}_3 \text{-N/L}$ .

Um doch noch eine Bio-P-Eliminierung durchzuführen, wurde die Rezirkulation über mehrere Tage erst in die zweite Kaskade des Denitrifikationsbeckens geleitet. Dadurch ergab sich eine neue Anordnung der Bedingungen in den einzelnen Becken. Das frühere „Anaerobbecken“ hat nun anoxische Bedingungen, da der CSB aus der Vorklärung die komplette Aufenthaltszeit benötigt um das Nitrat aus dem Rücklaufschlamm zu denitrifizieren. Danach herrschen anaerobe Bedingungen. Hier erhofft man sich eine Ortho-Phosphat-Rücklösung. In diesem Bereich werden die Phosphatakkumulierenden Mikroorganismen nicht mehr von den denitrifizierenden Bakterien gestört. Dies kommt den deutlich langsameren Wachstumsraten der PAO gegenüber den denitrifizierenden Organismen zugute. Erst in der zweiten Kaskade kommt nun die hohe Nitratfracht. Über die Optimierung des Frequenzumrichters einer Pumpe ist nun eine Rezirkulation von 320 % möglich. In Abbildung 16 ist über den Zeitraum von zehn Tagen zu erkennen, dass der Grenzwert von  $13 \text{ mg NO}_3 \text{-N/L}$  kontinuierlich eingehalten wird. Besonders signifikant ist die Erhöhung des Verbrauchs an Acetol-80. Ein so deutlicher Anstieg lässt erahnen, dass nicht nur die leicht erhöhte Rezirkulation mehr Acetol-80 fordert, sondern auch die PAOs.

Der Vergleich der  $\beta$ -Werte aus Abbildung 17 und Abbildung 18 lassen den Schluss zu, dass der erhöhte Acetol-80 Bedarf der zusätzlichen Bio-P-Elimination geschuldet ist. Die  $\beta$ -Werte zeigen, dass es jetzt auch möglich ist, an bestimmten Tagen unterstöchiometrisch zu fällen. Zusätzlich sind die Spitzenwerte deutlich niedriger als zu der Zeit, in der die Rezirkulation in die erste Kaskade gepumpt wurde.

In Abbildung 19 ist zu sehen, dass nach nur einem Tag eine starke Verringerung des Fällmittelverbrauchs zustande kommt. Am sechsten Tag nach der Umstellung kommt es sogar zeitweise vor, dass gar kein Fällmittel benötigt wird.

Um eine Übersicht zu erhalten, werden die Kosten für die verschiedenen Randbedingungen in Tabelle 8 illustriert. Die Kosten werden als € pro Woche dargestellt. Bei der Berechnung wurde darauf geachtet, dass nur Zeiträume gewählt wurden, in denen ähnliche Witterungsbedingungen bzw. Zulaufmengen vorlagen und somit ein Vergleich möglich gemacht wird. Die Standardbedingungen geben die Kosten für den Fällmittelverbrauch an, die bei einem bisherigen Grenzwert von  $P_{\text{ges}} \leq 2 \text{ mg/L}$  anfallen. Um den Zielwert von  $\leq 0,5 \text{ mg PO}_4\text{-P/L}$  nur mit Hilfe des Fällmittels einzuhalten, steigen die Kosten um 66 %. Während der Zeit in der ein Grenzwert von  $\leq 13 \text{ mg NO}_3\text{-N/L}$  eingehalten und zusätzlich Bio-P betrieben wurde, entstanden Kosten von insgesamt 2096,00 €/Woche.

Tabelle 8: Kostenvergleich des Fällmittel- und Acetol-80 Bedarfs bei unterschiedlichen Randbedingungen

Kosten [€/Woche]	Fällmittel Natriumaluminat	C-Quelle Acetol-80	Gesamt
Standartbedingungen	860,00	00,00	860,00
Zielwert $\leq 0,5 \text{ mgPO}_4\text{-P/L}$	1427,00	00,00	1427,00
Grenzwert $\leq 13 \text{ mgNO}_3\text{-N/L}$	1087,00	762,00	1849,00
Bio-P +			
Grenzwert $\leq 13 \text{ mgNO}_3\text{-N/L}$	340,00	1756,00	2096,00

## 7. Ausblick

Die Arbeit wurde mit dem Ziel angefertigt, eine Steigerung der Stickstoff- und Bio-P-Elimination an der Kläranlage Biberach (Baden) mit Hilfe von externen Kohlenstoffquellen zu erreichen. Die 78 %ige Essigsäurelösung Acetol-80 hat dabei nicht nur gute Denitrifikationseigenschaften im Labor gezeigt, sondern war auch insgesamt das günstigste aller untersuchten C-Quellen.

Für weitere Projekte kann die Bio-P-Elimination noch weiter untersucht werden. Unter diesem Aspekt könnte auch eine Dosierstelle im Rücklaufschlamm positioniert werden. Dabei kann untersucht werden, ob die Nitratfracht aus dem Rücklaufschlamm schneller abgebaut wird und somit doch noch eine Bio-P-Elimination unter den bisherigen Umständen möglich ist.

Zusätzlich können mögliche Investitionskosten in Betracht gezogen werden. Falls in Zukunft auf ein saures Fällmittel zur Verwendung kommt. Wäre eine zweite Fällmittelstation zur Vorfällung womöglich sinnvoll. Zusätzlich müsste man mit Kalk den pH-Wert puffern. Eine weitere Überlegung wäre, eine zweite Nitratsonde für die Denitrifikation zu besorgen, da bei erhöhter Ammoniumkonzentration die dritte Kaskade belüftet werden kann. Somit könnte die Regelung der C-Quellen-Dosierung flexibler eingesetzt werden.

Ein weiteres großes Projekt wäre zum einen die Vergrößerung der Rezirkulationsleitungen und zum anderen die Beschaffung leistungsstärkerer Pumpen für die Rezirkulation. Zusätzlich müssten unterirdisch Leitungen zur Dosierstelle verlegt werden.

## 8. Literaturverzeichnis

**Abwasserzweckverband. 2014.** Broschüre "Eine saubere Sache". Biberach/Baden : Abwasserzweckverband Kinzig- und Harmersbachtal, 2014.

**Bever, J., Stein, A. und Teichmann, H. 2002.** *Weitergehende Abwasserreinigung*. München : Oldenburg Industrieverlag , 2002.

**Blitz, E. und Czysz, W. 1988.** *Abwassertechnologie*. Berlin : Springer-Verlag, 1988.

**Fischer, Lars. 2014.** Spektrum. [Online] 14. Juli 2014. [Zitat vom: 10. Oktober 2015.] <http://www.spektrum.de/wissen/wie-gefaehrlich-ist-aluminium-5-fakten/1300812>.

**Forbes, Christina M., et al. 2009.** FEMS Microbiology Ecology. *The contribution of "omic"-based approaches to the study of enhanced biological phosphorus removal microbiology*. s.l. : Oxford Journal, 2009. 1574-6941.2009.00698.x.

**Gerber, A., et al. 1986.** The effect of acetate and other short-chain carbon compounds on the kinetics of biological nutrient removal. *Water Research South Africa*. 1986, 12.

**Henze, M. 1990.** Capabilities of biological nitrogen removal processes from wastewater. *Water Science & Technology*. 1990, Vol 23.

**Isaacs, S.H. und Henze, M. 1994.** Controlled Carbon Source addition to an alternating nitrification-denitrification wastewater treatment process including biological P removal. *Water Research*. 1994, Vol 29.

**Mino, T., van Loosdrecht, M.C.M. und Heijnen, J.J. 1998.** *Water Research. Microbiology and biochemistry of the enhanced biological phosphate removal process*. s.l. : Elsevier, 1998. Bd. 32, 11. 31-3207.

**Mudrack, Klaus und Kunst, Sabine. 2003.** *Biologie der Abwasserreinigung*. Hannover : Spektrum Akademischer Verlag, 2003.

**Peng, Yong-zhen, Ma, Yong und Wang, Shu-ying. 2006.** Denitrification potential enhancement by addition of external carbon sources in a pre-denitrification process. *Journal of Environmental Sciences*. 284-289, 2006, 19.

**Schlegel, Hans G. 1985.** *Allgemeine Mikrobiologie*. Stuttgart : Georg Thieme Verlag, 1985.

—. 1985. *Allgemeine Mikrobiologie*. Göttingen : Thieme, 1985.

**Shun-Hsing, Chuang, Chiao-Fuei, Ouyang und Yeuh-Bin, Wang. 1996.** Kinetic competition between phosphorus release and denitrification on sludge under anoxic condition. *Water Research*. 1996, Vol 30.

**Srinandan, C.S., et al. 2012.** Carbon sources influence the nitrate removal activity, community structure and biofilm architecture. *Bioresource Technology*. 117, 2012, Bde. S.292-299.

**Stadtentwässerung.** Broschüre "Die alte Klärbeckenanlage". *Erste Schritte zur Abwasserreinigung in Frankfurt am Main*. Frankfurt am Main : s.n.

**Stania, K., Lehner, L. und Haberl, R. 1997.** Denitrifikation in intermittierend betriebenen Belebungsanlagen (SBR). *Korrespondenz Abwasser*. 1997, Bd. Nr.1, S. 61-65.

**Wessolowski, Dr. Holger.** Wasser-Wissen. [Online] Universität Bremen. [Zitat vom: 8. Juli 2015.] <http://www.wasser-wissen.de/abwasserlexikon/d/denitrifikation.htm#vorgeschaltete>.

**Zuthi, M.F.R., et al. 2013.** *Bioresource Technology. Enhanced biological phosphorus removal and its modeling for the activated sludge and membrane bioreactor processes*. Sydney : Elsevier, 2013. 139. 363-374.

## 9. Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Verwendete Kohlenstoffquellen.....	18
Tabelle 2: Geräte zur Simulation der Denitrifikationsstufe .....	18
Tabelle 3: Produktdaten der verwendeten C-Quellen .....	20
Tabelle 4: Geräte zur Simulation der biologischen Phosphoreliminierung .....	21
Tabelle 5: Produktdaten Fällmittel zur Phosphoreliminierung .....	23
Tabelle 6: Geräte zur großtechnischen Umsetzung.....	25
Tabelle 7: Ergebnisse der Bestandsaufnahme der Nitratkonzentrationen während einer Belastungsspitze am Mittag .....	35
Tabelle 8: Kostenvergleich des Fällmittel- und Acetol-80 Bedarfs bei unterschiedlichen Randbedingungen.....	48

## 10. Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Vorgeschaltete Denitrifikation mit Kreislaufführung beim kontinuierlichen Belevungsverfahren .....	11
Abbildung 2: Schema der Stoffwechselfvorgänge innerhalb der PAOs .....	15
Abbildung 3: Zeitlicher Verlauf der Phosphat- und Kohlenstoffkonzentrationen während der biologischen Phosphoreliminierung.....	16
Abbildung 4: Probenentnahme zur Bestandsaufnahme der Kläranlage.....	24
Abbildung 5: Simulation der Denitrifikation mit einer Konzentration der C-Quellen von jeweils 25 ppm.....	27
Abbildung 6: Simulation der Denitrifikation mit einer Konzentration der C-Quellen von jeweils 50 ppm.....	28
Abbildung 7: Simulation der Denitrifikation mit einer Konzentration der C-Quellen von jeweils 100 ppm.....	29
Abbildung 8: Simulation der Denitrifikation mit einer C-Quellen Konzentration entsprechend der Herstellerempfehlung.....	30
Abbildung 9: Brennschlempe als C-Quelle während der Denitrifikation .....	31
Abbildung 10: Simulation der zyklischen Bio-P-Eliminierung mit dem Zusatz von C-Quellen .....	32
Abbildung 11: Simulation der Bio-P-Eliminierung mit 0,1 ml Acetol-80 auf 8 L Belebtschlamm .....	33
Abbildung 12: Veränderung des Fällmittelbedarfs bei Einstellung des Pges Zielwertes von $\leq 0,5$ mg/L .....	34
Abbildung 13: Verlauf der Nitratkonzentrationen bei Zudosierung von Acetol-80 in bisherigen Klärbetrieb .....	36
Abbildung 14: Verlauf der Nitratkonzentration bei Zudosierung von Acetol-80 während einer Rezirkulation von 300% .....	37
Abbildung 15: Verlauf der Nitratkonzentration bei einer Zentratzugabe direkt in den Überlaufkopf vor der Nitrifikationsstufe.....	38
Abbildung 16: Verlauf der Nitratkonzentration bei einer Rezirkulation von 320% in Kaskade 2 der Denitrifikationsstufe .....	39
Abbildung 17: Beta-Werte bei Rezirkulation in Kaskade 1.....	39
Abbildung 18: Beta-Werte bei Rezirkulation in Kaskade 2.....	40
Abbildung 19: Veränderung des Fällmittelverbrauches bei Umstellung der Rezirkulation in Kaskade 2.....	41

## 11. Eidesstattliche Erklärung

Hiermit versichere ich, dass die vorliegende Master-Thesis von mir selbstständig und ohne unerlaubte Hilfe angefertigt worden ist, insbesondere, dass ich Stellen, die wörtlich oder annähernd wörtlich aus Veröffentlichungen entnommen sind, durch Zitate kenntlich gemacht habe.

---

Ort, Datum

---

Herter, Dennis

## 12. Anhang

### Laborversuch zur Ermittlung der Effektivität der C-Quellen bezogen auf die Denitrifikation

25 ppm

Zeit [min]	Blindprobe [mgNO <sub>3</sub> -N/L]	Acetol-25 [mgNO <sub>3</sub> -N/L]	Acetol-30 [mgNO <sub>3</sub> -N/L]	Acetol-80 [mgNO <sub>3</sub> -N/L]	Acetol-380 [mgNO <sub>3</sub> -N/L]
0	9,42	9,42	9,42	9,42	9,42
5	10,20	9,58	9,92	9,66	9,57
10	9,62	8,99	9,38	9,17	9,15
15	9,40	8,62	9,20	8,73	8,64
30	9,38	7,86	8,74	7,22	7,40
60	8,42	6,75	7,80	5,69	5,59
120	6,36	4,57	6,11	3,61	2,14

pH- Wert	Blindprobe	Acetol-25	Acetol-30	Acetol-80	Acetol-380
Beginn	6,85	6,85	6,85	6,85	6,85
Ende	6,90	6,92	7,01	6,89	6,91

50 ppm

Zeit [min]	Blindprobe [mgNO <sub>3</sub> -N/L]	Acetol-25 [mgNO <sub>3</sub> -N/L]	Acetol-30 [mgNO <sub>3</sub> -N/L]	Acetol-80 [mgNO <sub>3</sub> -N/L]	Acetol-380 [mgNO <sub>3</sub> -N/L]
0	8,37	8,37	8,37	8,37	8,37
5	8,14	7,39	7,42	7,48	7,40
10	8,08	6,83	7,01	6,90	6,84
15	7,84	6,12	6,62	6,53	6,07
30	7,37	4,63	5,91	4,61	4,05
60	6,30	3,13	4,62	0,55	1,42
120	4,00	0,33	2,29		0,23

pH-Wert	Blindprobe	Acetol-25	Acetol-30	Acetol-80	Acetol-380
Beginn	6,86	6,86	6,86	6,86	6,86
Ende	6,96	6,94	7,00	6,93	6,92

*100 ppm*

Zeit [min]	Blindprobe [mgNO <sub>3</sub> -N/L]	Acetol-25 [mgNO <sub>3</sub> -N/L]	Acetol-30 [mgNO <sub>3</sub> -N/L]	Acetol-80 [mgNO <sub>3</sub> -N/L]	Acetol-380 [mgNO <sub>3</sub> -N/L]
0	8,65	8,65	8,65	8,65	8,65
5	8,60	8,13	8,18	8,26	8,21
10	8,52	7,50	7,61	7,65	7,51
15	8,36	6,98	7,12	7,25	7,02
30	7,91	5,00	5,35	5,51	5,09
60	7,04	1,46	4,21	2,46	1,12
120	4,70	0,31	1,58	0,21	0,23

pH-Wert	Blindprobe	Acetol-25	Acetol-30	Acetol-80	Acetol-380
Beginn	6,93	6,93	6,93	6,93	6,93
Ende	7,02	6,97	7,10	6,80	6,95

*Dosierempfehlung*

Zeit [min]	Blindprobe [mgNO <sub>3</sub> -N/L]	Acetol-25 [mgNO <sub>3</sub> -N/L]	Acetol-30 [mgNO <sub>3</sub> -N/L]	Acetol-80 [mgNO <sub>3</sub> -N/L]	Acetol-380 [mgNO <sub>3</sub> -N/L]
0	8,24	8,24	8,24	8,24	8,24
5	7,66	7,11	7,07	7,14	7,04
15	7,47	6,00	6,03	6,03	5,89
30	6,96	5,29	4,29	4,09	4,86
60	6,11	4,05	2,75	2,59	2,99
120	4,05	1,63	0,29	0,63	0,17

pH-Wert	Blindprobe	Acetol-25	Acetol-30	Acetol-80	Acetol-380
Beginn	6,86	6,86	6,86	6,86	6,86
Ende	6,95	6,94	7,09	6,97	6,95

*Brennschlempe*

Zeit [min]	Blindprobe [mgNO <sub>3</sub> -N/L]	0,1 ml [mgNO <sub>3</sub> -N/L]	0,3 ml [mgNO <sub>3</sub> -N/L]	0,5 ml [mgNO <sub>3</sub> -N/L]	0,8 ml [mgNO <sub>3</sub> -N/L]
0	8,10	8,10	8,10	8,10	8,10
5	7,72	7,55	7,07	7,08	6,87
15	7,46	7,12	6,45	6,36	5,71
30	7,03	6,76	5,77	5,62	4,83
60	6,06	5,82	4,67	4,49	3,46
120	4,03	4,16	2,72	2,50	1,10

pH-Wert	Blindprobe	0,1 ml	0,3 ml	0,5 ml	0,8 ml
Beginn	6,97	6,97	6,97	6,97	6,97
Ende	6,94	7,04	7,04	7,11	7,15

**Laborversuch zur Ermittlung der Effektivität der C-Quellen bezogen auf die biologische Phosphoreliminierung**

t [min]	PO <sub>4</sub> -P [mg/l]	NO <sub>3</sub> -N [mg/l]
0	2,30	5,97
30	2,10	3,91
60	2,01	2,28
90	2,03	0,90
120	2,08	0,19
150	2,48	-
180	2,80	-
210	3,11	-
240	3,43	-
270	3,73	-
300	4,08	-
330	4,40	-

Zeit [min]	Blindprobe [mgPO <sub>4</sub> - P/L]	Acetol-25 [mgPO <sub>4</sub> - P/L]	Acetol-30 [mgPO <sub>4</sub> - P/L]	Acetol-80 [mgPO <sub>4</sub> - P/L]	Acetol-380 [mgPO <sub>4</sub> - P/L]	Schlempe [mgPO <sub>4</sub> - P/L]
330	4,40	4,40	4,40	4,40	4,40	4,40
360	4,23	5,79	6,62	5,34	8,01	6,43
390	3,72	6,58	7,39	5,91	6,25	9,60
405	3,11	5,52	6,72	5,02	5,45	6,01
435	2,29	4,33	5,40	4,41	5,25	4,24
465	1,84	3,35	4,42	4,05	5,55	3,01

*0,1 ml Acetol-80 auf 8 L Belebtschlamm*

t [min]	PO <sub>4</sub> -P [mg/l]	NO <sub>3</sub> -N [mg/l]
0	3,28	2,66
30	4,59	0,28
60	6,58	-
90	8,10	-
120	8,98	-
130	9,21	-
150	7,63	-
180	5,51	-
210	4,22	-
240	3,38	-
270	2,79	-