

Abschlussbericht zum Projekt

**Weiterentwicklung eines Schüttbettfilters zur Energieeinsparung  
industriell geprägter Kommunalabwässer durch Nutzung  
energetisch günstig belüfteter Systeme**

AZ 31443-23

gefördert durch die

DBU



Gröditz, im April 2017  
EvU Innovative Umwelttechnik

Dipl.-Ing. T. Koch

Aachen, im April 2017  
FiW an der RWTH Aachen

Dr.-Ing. F.-W. Bolle



## Projektbearbeitung

### Institution

Forschungsinstitut für Wasser- und Abfallwirtschaft  
an der RWTH Aachen (FiW) e.V.

Kackertstraße 15-17

52056 Aachen

EvU Innovative Umwelttechnik

Albert-Niethammerstr. 8

01609 Gröditz

### Bearbeiter

Dr.-Ing. H. Riße

Dipl.-Ing. T. Koch

Dipl.-Ing. J. Reiter



## Inhaltsverzeichnis

<b>1</b>	<b>Zusammenfassung .....</b>	<b>1</b>
<b>2</b>	<b>Veranlassung .....</b>	<b>3</b>
<b>3</b>	<b>Stand der Technik.....</b>	<b>4</b>
3.1	Natürlich belüftete aerobe Reaktoren .....	4
3.2	Prozesse in Tropfkörpern und ähnlichen Biofilmreaktoren.....	4
3.3	Weitere Biofilmreaktorkonzepte.....	5
3.4	Schüttbettfilter als neuer Lösungsansatz.....	8
<b>4</b>	<b>Untersuchungen.....</b>	<b>9</b>
4.1	Untersuchungsansatz.....	9
4.2	Untersuchungen am Standort der KA Obergartzem – Enzen: Schwachlastsystem	9
4.2.1	Versuchsaufbau .....	10
4.2.1.1	Referenzstraße Tropfkörper .....	11
4.2.1.2	Straße Schüttbettfilter.....	12
4.2.1.3	Besonderheiten Schüttbettfilter .....	13
4.2.1.4	Beschreibung des Trägermaterials.....	14
4.2.2	Inbetriebnahme, Besonderheiten und Probleme.....	15
4.2.2.1	Einarbeitungsphase.....	15
4.2.2.2	Aufbau und Untersuchung des Biofilms auf dem Trägermaterial .....	16
4.2.2.3	Besonderheiten und Probleme .....	19
4.2.3	Untersuchungsparameter und Probenahme .....	21
4.2.3.1	Beschreibung und Auswertung der durchgeführten Messungen.....	21
4.2.3.2	Abwasserrelevante Parameter .....	21
4.2.3.3	Probenentnahme.....	23
4.2.4	Ergebnisse und Diskussion Versuche KA Enzen (Schwachlastbereich)	24
4.2.4.1	Analyseergebnisse .....	24
4.2.5	Spezifische Abbauleistungen und Vergleich mit dem klassischen Tropfkörper .....	28
4.3	Ableitung von Bemessungsempfehlungen.....	33
4.4	Untersuchungen am Standort Papierfabrik (Hochlastbetrieb) .....	35
4.4.1	Untersuchungsstandort Hochlastphase .....	35
4.4.2	Inbetriebnahme und Besonderheiten.....	35
4.4.3	Ergebnisse und Diskussion Hochlastsystem .....	37
<b>5</b>	<b>Wirtschaftlichkeitsbetrachtung.....</b>	<b>40</b>
<b>6</b>	<b>Optimierungspotenziale und Schlussfolgerungen bzgl. Verfahrens-technik .....</b>	<b>41</b>
6.1	Betrieb als Nitrifikationsreaktor.....	41
6.2	Betrieb als Hochlastreaktor .....	41

<b>7</b>	<b>Literaturverzeichnis .....</b>	<b>42</b>
<b>8</b>	<b>Anhang Bilddokumentation .....</b>	<b>44</b>

## Anhang

### Verzeichnis der Bilder

Bild 3-1: Konzentrationsprofile über Höhe eines Tropfkörpers (Gujer 2007) .....	5
Bild 3-2: Stickstoffraumbelastung und Raumabbauleistung von Tropfkörpern mit Lava und Kunststoffaufwuchs-Trägermaterialien (Orth und Lange 2010, S. 35) .....	6
Bild 4-1: Blockfließbild der KA Obergartzen-Enzen.....	10
Bild 4-2: R+I-Fließschema der Versuchsanlage.....	11
Bild 4-3: Schüttbettfilter (links) mit Nachklärung (rechts) (eigene Aufnahmen).....	13
Bild 4-4: Zeichnung des verwendeten Aufwuchsträgermaterials EvU Pearl® ((EvU-Innovative Umwelttechnik) .....	15
Bild 4-5: Steigerung der Tagesabwassermenge im Zulauf zum Schüttbettfilter .....	16
Bild 4-6: Bewachsenes Trägermaterial (links); Messung Gewicht Trägermaterial (rechts) (Lerner 2016) .....	18
Bild 4-7: Entwicklung der Biomasse auf dem Trägermaterial über den Versuchszeitraum....	18
Bild 4-8: Moskitonetz .....	20
Bild 4-9: Siebkorb .....	20
Bild 4-10: Zulauf- und Ablaufkonzentrationen CSB im SBF .....	25
Bild 4-11: Zulauf- und Ablaufkonzentrationen NH <sub>4</sub> -N (Ammoniumstickstoff) im SBF.....	26
Bild 4-12: Ammoniumzulauf, Nitrat, Nitrit und Phosphor-Ablaufkonzentrationen im SBF .....	27
Bild 4-13: Ablaufkonzentrationen und Grenzwerte CSB, NH <sub>4</sub> -N im SBF .....	27
Bild 4-14: Vergleich der CSB-Raumbelastung im TK und im SBF .....	29
Bild 4-15: Vergleich der TNb- und NH <sub>4</sub> -N-Raumbelastung im TK und im SBF .....	29
Bild 4-16: Vergleich der CSB-Raumabbauleistung im SBF und TK.....	31
Bild 4-17: Vergleich der Ammonium-Raumabbauleistung im SBF und im TK .....	31
Bild 4-18: Vergleich der CSB-Flächenbelastung im SBF und im TK .....	32
Bild 4-19: Vergleich der NH <sub>4</sub> -N-Flächenbelastung im SBF und im TK.....	33
Bild 4-20: Volumenströme im Zulauf zum SBF (Hochlastphase).....	37
Bild 4-21: CSB <sub>fit</sub> -Konzentrationen im Zulauf und im Ablauf zum SBF (Hochlastphase) .....	38
Bild 4-22: O <sub>2</sub> -Konzentrationen im Ablauf des SBF (Hochlastphase) .....	38
Bild 4-23: CSB-Raumabbauleistung im SBF in Abhängigkeit von der Raumbelastung .....	39

**Verzeichnis der Tabellen**

Tabelle 4-1: Entwicklung des Biofilms auf dem Trägermaterial.....	19
Tabelle 4-2: Darstellung der Parameter mit Art und Ort der Messung.....	23
Tabelle 4-3: Belastungsphasen Versuche KA Enzen SBF Mittelwerte.....	24
Tabelle 4-4: Mittelwert Ablaufkonzentrationen Schüttbettfilter.....	28
Tabelle 4-5: Zusammenstellung der 85-Perzentilwerte der Zulaufkonzentrationen zur Versuchsanlage sowie der Belastungsparameter des SBF .....	33
Tabelle 4-6: Hydraulische Kenndaten Hochrechnung.....	34
Tabelle 4-7: Ergebnisse und Vergleich der Bemessungsergebnisse .....	34

## Abkürzungsverzeichnis

a	Anzahl Sprengerarme	-
AFS	Abfiltrierbare Stoffe	mg/l
A <sub>RT</sub>	Spezifische Oberfläche	m <sup>2</sup>
A <sub>TK</sub>	Oberfläche Tropfkörper	m <sup>2</sup>
ATV	Abwassertechnische Vereinigung E.V.	-
B1	Becken 1: Vorlage	-
B4	Becken 4: Ablaufbecken Tropfkörper	-
B5	Becken 5: Ablaufbecken Schüttbetfilter	-
BA	Flächenbelastung	-
BAS	Biofilm Activated Sludge	-
B <sub>d,xx</sub>	Organische Fracht	kg/d
B <sub>R</sub>	Raumbelastung	kg/(m <sup>3</sup> *d)
BSB <sub>5</sub>	Biochemischer Sauerstoffbedarf in 5 Tagen	mg/l
C	Kohlenstoff	-
CO <sub>2</sub>	Kohlendioxid	-
CSB	Chemischer Sauerstoffbedarf	mg/l
DWA	Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall	-
EW	Einwohnerwerte	EW
EvU	Innovative Umwelttechnik GmbH	-
GK	Größenklasse	-
H <sub>2</sub> S	Schwefelwasserstoff	-
HL	Hochlast	-
IDM	Induktiver Durchflussmesser	-
IFAS	Integrated Fixed Film Activated Sludge	-
ISA	Institut für Siedlungs- und Wasserwirtschaft	-
KA	Kläranlage	-
LOGO	Speicherprogrammierbare Schaltung von Siemens	-
M1	Motor Tropfkörper	-
M2	Motor Schüttbetfilter	-
MBBR	Moving Bed Biofilm Reactor	-
MO	Mikroorganismen	-
N	Stickstoff	-
NH <sub>3</sub>	Ammoniak	-



NH <sub>4</sub> -N	Ammoniumstickstoff	-
NO <sub>2</sub> -N	Nitritstickstoff	-
NO <sub>3</sub> -N	Nitratstickstoff	-
O <sub>2</sub>	Sauerstoff	-
P	Phosphor	-
P0	Zulaufpumpe Vorlage	-
P1	Zulaufpumpe Tropfkörper	-
P2	Zulaufpumpe Schüttbetfilter	-
P3	Rezirkulationspumpe Tropfkörper	-
P4	Rezirkulationspumpe Schüttbetfilter	-
PE	Polyethylen	
PET	Polyethylenterephthalat	-
PO <sub>4</sub> -P	Phosphor	-
q <sub>ATK</sub>	Flächenbeschickung	m/h
Q <sub>d</sub>	Tagesabwassermenge	m <sup>3</sup> /d
Q <sub>t</sub>	Trockenwetterzufluss	m <sup>3</sup> /h
RV	Rücklaufverhältnis	-
SBF	Schüttbetfilter	-
SK	Spülkraft	mm/Arm
SPS	Speicherprogrammierbare Schaltung	-
TK	Tropfkörper	-
TKN	Total Kjeldahl Nitrogen	-
TNb	<a href="#">Total bound Nitrogen</a>	-
TS	Trockensubstanz	mg/l
USV	Unterbrechungsfreie Stromversorgung	-
V <sub>SBF</sub>	Volumen Schüttbetfilter	m <sup>3</sup>
V <sub>TK</sub>	Volumen Tropfkörper	m <sup>3</sup>
VKB	Vorklärbecken	-
η <sub>CSB</sub>	Abbaugrad CSB	%
η <sub>NH<sub>4</sub>-N</sub>	Abbaugrad NH <sub>4</sub> -N	%



## 1 Zusammenfassung

Für die biologische Behandlung kommunaler und industrieller Abwässer wird zumeist das Belebtschlammverfahren eingesetzt. Dabei ist insbesondere der Sauerstoffeintrag für etwa 50% des Energiebedarfes einer Kläranlage verantwortlich. Obwohl die Effizienz des Sauerstoffeintrages signifikant gesteigert werden konnte, stoßen weitere Effizienzsteigerungen an physikalische Grenzen.

Angesichts der kontinuierlich weiter steigenden Energiepreise gewinnen Systeme an Interesse, die ohne Druckbelüftung arbeiten. Um deren Attraktivität zu steigern, ist es jedoch notwendig, die spezifische Umsatzleistung deutlich zu erhöhen, ohne dies mit erhöhtem Energieaufwand wie z.B. bei den Biofiltern zu erkaufen.

In den 80er und 90er Jahren wurde als ein Ansatz zur Leistungssteigerung insbesondere die Erhöhung der spezifischen Aufwuchsfläche z.B. durch Kunststoffträgermaterialien verfolgt. Hierbei ergaben sich jedoch Grenzen bzgl. der Benetzbarkeit und Probleme durch Verkürzung der Verweildauer bei hohen Beschickungsraten.

Auch wurde bisher das Problem der Auskühlung von Tropfkörpern (TK) in den Wintermonaten, die mit deutlichen Einbußen der Leistungsfähigkeit verbunden ist, noch nicht gelöst. Insgesamt fehlt es bisher an geeigneten Konzepten zur Steuerung und Regelung der bisher weitgehend sich selbst überlassenen Prozesse im Tropfkörper.

Als eine Alternative zu klassischen Tropfkörpern wurde in den 90er Jahren der Rieselstromreaktor entwickelt. Der Sauerstoffeintrag musste durch Belüftung mittels Ventilator erfolgen, was dennoch energetisch günstiger als die Druckbelüftung, trotz dieses zusätzlichen Aggregates, war. Allerdings musste der Abwasserstrom mehrfach rezirkuliert werden um die geforderten Ablaufkonzentrationen zu erreichen, wodurch sich der energetische Vorteil nahezu aufhob.

Der hier gewählte Lösungsansatz sieht vor, die biologischen Abbauprozesse in einem neuartigen Reaktor mit einem Schüttbett aus einem leicht fluidisierbaren Kunststoffaufwuchs-Trägermaterial durchzuführen. Das Trägermaterial bietet eine spezifische Oberfläche von 400 bis zu 600 m<sup>2</sup>/m<sup>3</sup> und liegt damit bis um den Faktor 3 über den bisher zur Nitrifikation eingesetzten klassischen Tropfkörpermaterialien. Damit werden ebenfalls um mindestens den Faktor 2 höhere Raumabbauleistungen im Vergleich zum klassischen Tropfkörper erwartet.

Der Austrag der überschüssigen Biomasse erfolgt zum einen kontinuierlich durch Ausspülen mit dem abwärts gerichteten Wasserstrom und zusätzliche in größeren Abständen erfolgende Spülungen. Im Gegensatz zum klassischen Filter sind keine speziellen Filterböden, keine speziellen Filterdüsen und weitaus leistungsschwächere Spülpumpen notwendig. Während der Rieselstromreaktor nur im Abstrom zu spülen war, und das Trägermaterial nicht mobili-

siert wird, kann das Trägermaterial des neu entwickelten Schüttbettreaktors leicht mobilisiert und damit sehr effektiv von überschüssiger Biomasse befreit werden.

Die Versuchsanlage wurde auf zwei Standorten aufgebaut. Zunächst wurden die Versuche zur Nitrifikation auf der Kläranlage Obergartzem-Enzen durchgeführt. Diese Kläranlage bietet als einzige Anlage in der Umgebung durch eine weitgehende Elimination des chemischen Sauerstoffbedarfs (CSB) in der biologischen Vorreinigung eine geeignete Rohwasserqualität.

Der zweite Standort war auf dem Gelände einer Papierfabrik.

Die Belastung der Anlage im Nitrifikationsmodus wurde kontinuierlich gesteigert in erster Linie durch Steigerung der Zulaufwassermenge, da die Zulaufkonzentrationen sehr niedrig lagen. Es wurden CSB-Raumbelastungen im Schüttbettfilter von bis zu  $1,4 \text{ kg/m}^3$  festgestellt, überwiegend zwischen  $0,6$  und  $1 \text{ kg/m}^3$ . Die Raumbelastungen durch Ammoniumstickstoff ( $\text{NH}_4\text{-N}$ ) erreichten ca.  $0,3 \text{ kg/m}^3$ , umgerechnet auf den TNb wurden ca.  $0,4 \text{ kg/m}^3$  kurzzeitig gefahren. Die  $\text{NH}_4\text{-N}$  –Raumabbauleistung erreichte ca.  $0,18 \text{ kg CSB}/(\text{m}^3\text{d})$ . Im Vergleich dazu lag die Raumabbauleistung des Referenztropfkörpers bei max.  $0,07 \text{ kg}/(\text{m}^3\text{d})$ .

Während der Versuche zur Nitrifikation musste der Schüttbettfilter nur in größeren Abständen von einigen Wochen gespült werden. Die Sauerstoffversorgung in dieser Phase erfolgte rein über den atmosphärischen Eintrag über die Diffusion von oben bzw. durch die Luftströmung durch die Trägermaterialschüttung.

Bei den Untersuchungen am Standort der Papierfabrik sollte die Leistungsfähigkeit bzgl. CSB-Abbau untersucht werden. Zahlreiche technische Probleme sowie die unerwartet ungünstige Zusammensetzung des zur Verfügung stehenden Abwassers erwiesen sich als maßgebliche Einflussgrößen für die erzielten geringen Abbaugrade. Auch konnte eine ausreichende Sauerstoffversorgung nur durch ein zusätzliches Gebläse erzielt werden.

Die Bemessungsempfehlungen und die Wirtschaftlichkeitsbetrachtungen beruhen daher auf dem Betrieb zur Erprobung zur Nitrifikation. Es kann festgehalten werden, dass der Schüttbettfilter mit ca.  $1,5 \text{ m}$  Höhe deutlich flacher gebaut werden kann im Vergleich zum klassischen Tropfkörper, zum Biofilter und insbesondere im Vergleich zum Rieselstromreaktor.

Die Integration des Schüttbettfilters in ein Gesamtsystem kann als nitrifizierende Stufe hinter eine anoxische Stufe (Moving Bed Biofilm Reactor (MBBR)) oder Schlammsystem mit Zwischenklärung) erfolgen.

In Anlehnung an die Bemessung anhand der 85-Perzentilwerte würde der Schüttbettfilter um ca.  $50\%$  kleiner dimensioniert werden können als ein Tropfkörper, bei sehr weitgehender Vorreinigung wäre eine Volumenminderung um ca.  $2/3$  möglich. Energetisch wirkt sich die geringe Bauhöhe trotz des höheren Rezirkulationsverhältnisses positiv aus. Mit Blick auf die Investitionskosten kann der Schüttbettfilter damit punkten, dass dessen Bauvolumen sehr deutlich unter dem eines klassischen Tropfkörpers liegt.

## 2 Veranlassung

Für die biologische Behandlung kommunaler und industrieller Abwässer wird zumeist das Belebtschlammverfahren in verschiedenster Ausprägung eingesetzt. Dabei sind die biologische Stufe und insbesondere der Sauerstoffeintrag für etwa 50% des Energiebedarfes einer Kläranlage verantwortlich. Obwohl die Effizienz des Sauerstoffeintrages durch den Einsatz der feinblasigen Belüftung signifikant gesteigert werden konnte und Rührprozesse immer effektiver wurden, stoßen weitere Effizienzsteigerungen an physikalische Grenzen.

Industriell geprägte kommunale Abwässer sind in vielen Fällen durch hohe Konzentrationen an reduzierten Stickstoffverbindungen gekennzeichnet. Die Oxidation zu Nitrat erhöht den Sauerstoffbedarf deutlich, sodass ein Viertel und in einzelnen Fällen bis zu 50% der Gebläseleistung für die Nitrifikation benötigt wird. Die für warme und konzentrierte Abwässer geeigneten Verfahren wie Deammonifikation bzw. Denitrifikation sind im Konzentrationsbereich  $<100 \text{ mg/l NH}_4\text{-N}$  und bei kühlem Abwasser nicht bzw. nicht prozessstabil nutzbar. Daraus leitet sich ebenfalls die Notwendigkeit ab, eine Technologie zu finden, mit welcher die Nitrifikation energetisch deutlich günstiger als bisher durchgeführt werden kann.

Weiterhin muss bei Einleitung industrieller Abwässer mit hohen C:N-Verhältnissen der alleinige Einsatz des Belebtschlammverfahrens bei höher konzentrierten Abwässern kritisch hinterfragt werden. Ein Großteil des energetisch aufwändig mit Druckluft eingetragenen Sauerstoffes dient hier nur dem Zwecke des Abbaus der Kohlenwasserstoffverbindungen, die jedoch ein wertvolles chemisches Energiepotential darstellen.

Eine Alternative dazu sind vielfach anaerobe Behandlungsverfahren zur Vorreinigung industrieller Abwässer z.B. aus der Lebensmittel- und Papierindustrie. Doch ist das theoretische Potential der anaeroben Behandlung an vielen Stellen in der Praxis nur zum Teil nutzbar z.B. aufgrund nicht vorhandener Aufstellungsflächen sowie aufgrund der Abwasserzusammensetzung. So führen sehr hohe Sulfatkonzentrationen im Abwasser zu massiver Schwefelwasserstoff( $\text{H}_2\text{S}$ )-Bildung und damit kaum beherrschbaren Betriebsproblemen. Daher erscheint es sinnvoll und notwendig, auch für solche durchaus zahlreichen Anwendungsfälle energieeffiziente aerobe Behandlungsverfahren zu entwickeln.

### 3 Stand der Technik

#### 3.1 Natürlich belüftete aerobe Reaktoren

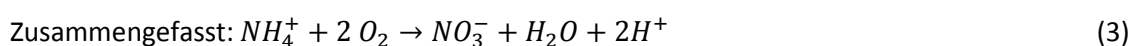
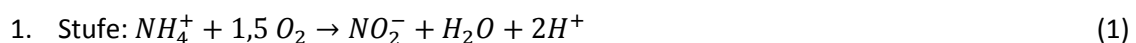
Zu den natürlich belüfteten aeroben Reaktoren zählen in erster Linie die Tropfkörper, die aus der Historie bekannten diskontinuierlich eingestauten Füllkörper sowie eingeschränkt Scheibentauchkörper und bewachsene Bodenfilter als Vertreter der naturnahen Verfahren. Allen gemeinsam ist, dass sie ohne Luftzufuhr durch Gebläse auskommen, bei Scheibentauchkörpern ist jedoch Bewegungsenergie für die Walzen notwendig. Der Verzicht auf die Luftversorgung durch Gebläse macht daher diese Reaktoren bzw. Verfahren sehr energieeffizient. Allerdings sind diese Verfahren bis auf den Tropfkörper meist nur im Bereich unterer fünfstelliger Einwohnerwerte (EW) einsetzbar.

#### 3.2 Prozesse in Tropfkörpern und ähnlichen Biofilmreaktoren

Beim klassischen Tropfkörper wächst der Biofilm auf einer festen, unbeweglichen Oberfläche. Früher bestand diese üblicherweise aus Lava-Tuff bzw. aus Schlackesteinen. Heute kommen auch immer häufiger Kunststofffüllungen zum Einsatz. (Bever 2002, S. 59) Lava-Tuff birgt eine höhere Verstopfungsgefahr aufgrund der geringeren Hohlraumanteile von ca. 50% und der ungleichmäßigen Formen. Bei Kunststoffaufwuchsträgern ist die Verstopfungsgefahr wesentlich geringer, da diese Hohlraumanteile von bis zu 95% besitzen, bei einer spezifischen Oberfläche von bis zu 200 m<sup>2</sup>/m<sup>3</sup>. Lava-Tuff Füllungen haben im Vergleich eine spezifische Oberfläche von etwa 90 m<sup>2</sup>/m<sup>3</sup>. (Mudrack 2010, S. 69)

Unterschiedliche Organismen sorgen für den Bewuchs im Tropfkörper. Im oberen Bereich findet die Elimination von Schmutzstoffen durch heterotrophe Organismen statt. Dies führt zu einem Gefälle der Konzentration des Biochemischen Sauerstoffbedarfs in fünf Tagen (BSB<sub>5</sub>) von oben nach unten. Das BSB<sub>5</sub>-Gefälle bietet verschiedenen Organismen Lebensmöglichkeiten in unterschiedlichen Zonen und sorgt für unterschiedliche Abbauleistungen innerhalb des Tropfkörpers. Im oberen Teil des Tropfkörpers erfolgt der Abbau der Kohlenstoffverbindungen. Anfangs hohe Umsatzgeschwindigkeiten nehmen nach unten hin ab. Die Oxidation von Stickstoff findet erst im unteren Teil statt, da dort die entsprechenden Umgebungsbedingungen für die Nitrifikanten bestehen. (Mudrack 2010, S. 68)

Die Nitrifikation besteht aus zwei Stufen. Zuerst findet eine Oxidation von Ammonium zu Nitrit statt. Danach erfolgt die Umwandlung von Nitrit zu Nitrat. Diese beiden Prozesse können mit folgenden Gleichungen beschrieben werden.



Die Umwandlung erfolgt durch die autotrophen Bakterien unter anderem den Nitrosomas für die Ammoniumoxidation, Gleichung (1), sowie die Nitrobacter für die Nitritoxidation, Gleichung (2). Autotrophe Bakterien benötigen keine organischen Stoffe, anders als heterogene Organismen nutzen sie anorganisches Kohlendioxid ( $\text{CO}_2$ ) als Kohlenstoffquelle. (Mudrack 2010, S. 87–88)

Aufgrund der unterschiedlichen  $\text{BSB}_5$ -Konzentrationen können heterotrophe Organismen im oberen Bereich des Tropfkörpers schneller wachsen. Dort erfolgt überwiegend Kohlenstoffabbau. Erst wenn dieser weit vorangeschritten ist, können sich die Nitrifikanten gegenüber den heterotrophen Mikroorganismen (MO) ausreichend etablieren. Bild 2-3 zeigt den Verlauf der  $\text{BSB}_5$ -Konzentrationen, sowie der Ammonium- und Nitratstickstoffkonzentrationen in den einzelnen Schichten (Pressinotti 2008, S. 57).

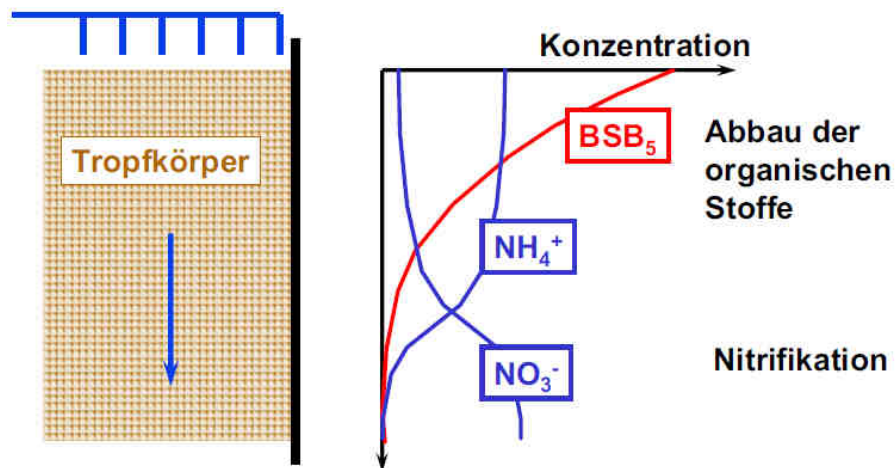


Bild 3-1: Konzentrationsprofile über Höhe eines Tropfkörpers (Gujer 2007)

Dies bedeutet auch, dass eine ausreichende Menge an gelöstem Sauerstoff im Abwasser vorhanden sein muss, damit sich Nitrosomas entwickeln können. Ebenso sollte sich der pH-Wert im neutralen bis leicht alkalischen Bereich befinden.

Eine biologische Vorreinigung vor dem Tropfkörper begünstigt die Nitrifikation. Die Abtrennung von Schwebstoffen und der  $\text{BSB}_5$ -Vorabbau sorgen für ein geringeres heterotrophes Wachstum, was sich positiv auf die Nitrifikanten auswirkt. Die Nitrifikationsrate von Tropfkörpern, welche aus einer Zwischenklärung gespeist werden, kann 1,5 bis 2 Mal so hoch werden wie bei einfacher mechanischer Reinigung. (ATV-Handbuch 1997, S. 150)

### 3.3 Weitere Biofilmreaktorkonzepte

In den letzten Jahrzehnten wurden zahlreiche Verfahren mit trägerfixierter Biomasse entwickelt. Zu nennen sind hierbei belüftete Filter, getauchte Festbetten oder das MBBR-Verfahren. Insbesondere die belüfteten Filter erreichen auch sehr hohe Raumabbauleistungen von bis zu  $1 \text{ kg NH}_4\text{-N}/(\text{m}^3\cdot\text{d})$  bzw.  $3 \text{ kg BSB}_5/(\text{m}^3\cdot\text{d})$ . Den genannten Verfahren ist jedoch gemeinsam, dass der Sauerstoffeintrag mittels energieintensiver Druckbelüftung er-

folgt. Diese Reaktoren müssen zur Erreichung der systemisch möglichen hohen Abbauleistungen mit hohen Luftüberschüssen betrieben werden.

Einzig Tropfkörper und eingeschränkt Scheibentauchkörperverfahren ermöglichen eine Abwasserreinigung mit CSB-Abbau und Nitrifikation in einem natürlich belüfteten System. Allerdings werden in den klassischen gering belasteten Tropfkörpern nur geringe Stickstoff-Raumabbauleistungen (ca. 0,05 ... 0,1 kg NH<sub>4</sub>N/(m<sup>3</sup>·d)) erreicht (siehe Bild 3-2). Dies erfordert relativ große spezifische Behandlungsvolumina, wodurch trotz deutlicher energetischer und betrieblicher Vorteile nur selten Tropfkörper eingesetzt werden.

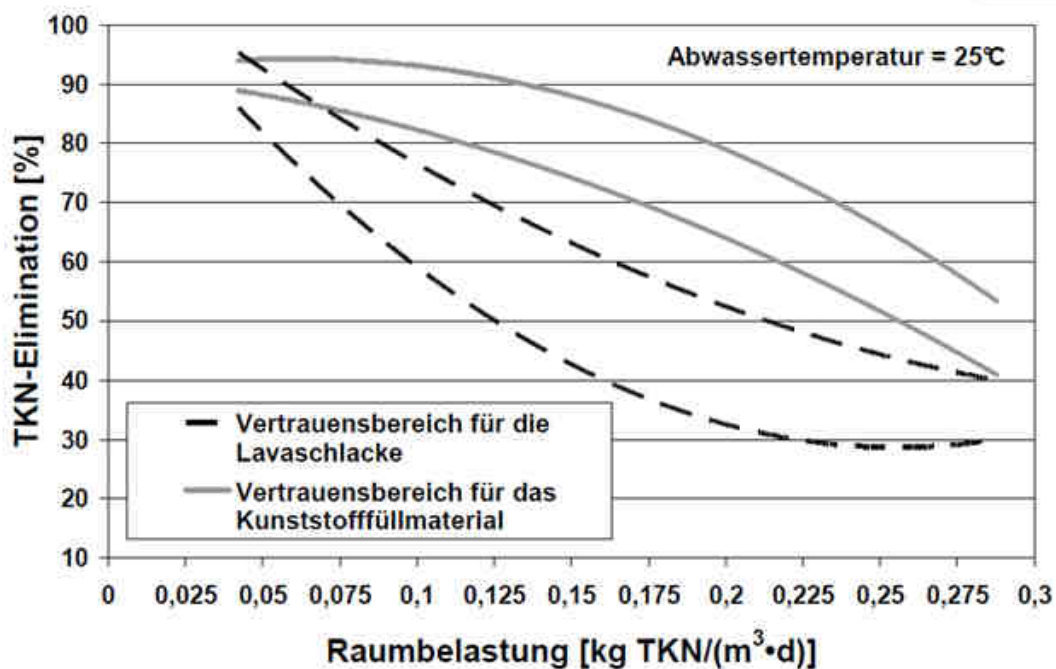


Bild 3-2: Stickstoffraumbelastung und Raumabbauleistung von Tropfkörpern mit Lava und Kunststoffaufwuchs-Trägermaterialien (Orth und Lange 2010, S. 35)

Angesichts der kontinuierlich weiter steigenden Energiepreise gewinnen Systeme an Interesse, die ohne Druckbelüftung arbeiten. Um deren Attraktivität zu steigern, ist es jedoch notwendig, die spezifische Umsatzleistung deutlich zu erhöhen, ohne dies mit erhöhtem Energieaufwand wie z.B. bei den Biofiltern zu erkaufen. Mit der Erhöhung der Umsatzleistung wäre gleichzeitig eine deutliche Verringerung des Reaktorvolumens verbunden.

In den 80er und 90er Jahren wurde als ein Ansatz zur Leistungssteigerung insbesondere die Erhöhung der spezifischen Aufwuchsfläche z.B. durch Kunststoffträgermaterialien verfolgt. Hierbei ergaben sich jedoch Grenzen bzgl. der Benetzbarkeit und Probleme durch Verkürzung der Verweildauer bei hohen Beschickungsraten. Auch wurde bisher das Problem der Auskühlung von Tropfkörpern in den Wintermonaten, die mit deutlichen Einbußen der Leistungsfähigkeit verbunden ist, noch nicht gelöst. Insgesamt fehlt es bisher an geeigneten Konzepten zur Steuerung und Regelung der bislang weitgehend sich selbst überlassenen Prozesse im Tropfkörper.



Als eine Alternative zu klassischen Tropfkörpern wurde in den 90er Jahren der Rieselstromreaktor entwickelt. (Haldenwang 1997) Dieser diente in erster Linie zur räumlich kompakten, energetisch günstigen, aeroben Elimination kleiner hoch belasteter Industrieabwasserströme. Diese Reaktoren wurden mit CSB-Raumbelastungen bezogen auf das Gesamtvolumen von  $3 \text{ kg}/(\text{m}^3 \cdot \text{d})$ , im Extremfall bis zu  $12 \text{ kg}/(\text{m}^3 \cdot \text{d})$ , betrieben. Dabei wurden in praktischen Versuchen max. Raumabbauleistungen bis ca.  $4 \text{ kg CSB}/(\text{m}^3 \cdot \text{d})$  erzielt (Haldenwang 1997).

Der Sauerstoffeintrag musste durch Belüftung mittels Ventilator erfolgen, was dennoch energetisch günstiger als die Druckbelüftung trotz dieses zusätzlichen Aggregates war. (Haldenwang 1997) Allerdings musste der Abwasserstrom mehrfach rezirkuliert werden, um die geforderten Ablaufkonzentrationen zu erreichen, wodurch sich der energetische Vorteil nahezu aufhob.

Auch gestaltete sich der Biomasseaustrag nicht optimal, da die Rieselstromreaktoren nur mit Druckluftstößen und durch Spülung mit Abwasser im Abstrom von überschüssiger Biomasse befreit werden konnten. Es kam dadurch in den unteren Schichten zur unerwünschten Akkumulation von Biomasse. (Haldenwang 1997) Das Rieselstromreaktorkonzept wurde ebenfalls noch nicht ausreichend auf dessen Eignung zur energetisch günstigen Nitrifikation untersucht. Gerade hier wird ein sehr erfolgversprechender Entwicklungsansatz gesehen.

Trotz der energetischen Vorteile des Tropfkörperprinzips und der bekannten geringeren Schlammproduktion bei einfacherem Handling werden in der Praxis bisher einige Hemmnisse für dessen breiten Einsatz gesehen. Dazu zählen die bisher noch nicht erfolgte optimale Einbindung der Denitrifikationsprozesse sowie die bisher ebenfalls noch nicht optimale Einbindung der biologischen Phosphatelimination. Als Ansätze zur Integration der Denitrifikation sind z.B. die Vorschaltung einer anoxischen Belebung (Holle, 1999), die Nutzung der Vorklä rung als sauerstofffreies Milieu zur Nitratreduktion z.B. auf der Kläranlage (KA) Oberaudorf (Müller) und die Einbindung von anoxischen MBBR-Stufen (Riße, Koch 2016) zu nennen. Die Nachschaltung von MBBR-Stufen, wie auf der KA Arnsberg praktiziert, wiesen den Nachteil des zusätzlichen Substratbedarfes auf. (Jardin, Kruse 2006).

Beim Rieselstromreaktor wurde bei Notwendigkeit einer größeren Anzahl von Reaktoren kein wirtschaftlicher Vorteil gegenüber konventionellen Verfahren gesehen, was ggf. durch die bisher auf PE-Behälter fixierte Konstruktion und die recht aufwändige Herstellung der Aufwuchsträgerkugeln bedingt war. (Haldenwang 1997) Hier deutet sich Handlungsbedarf an, um mit einem adäquaten System auch größere Wassermengen sowie kommunales Abwasser wirtschaftlich und energetisch vorteilhaft behandeln zu können.

Die Elimination von Phosphor (P) erfolgt bisher bei Anlagen mit trägerfixierter Biomasse fast ausschließlich durch Fällung. Für die biologische P-Elimination in Systemen mit trägerfixierter Biomasse, die mit Blick auf die P-Rückgewinnung wünschenswert ist, sind bisher noch

keine praxisnahen Lösungsansätze bekannt. Hier deutet sich noch erheblicher Entwicklungsbedarf an, wobei neue Ansätze gesucht werden müssen.

### 3.4 Schüttbettfilter als neuer Lösungsansatz

Der gewählte Lösungsansatz sieht vor, die biologischen Abbauprozesse in einem neuartigen Reaktor mit einem Schüttbett aus einem leicht fluidisierbaren Kunststoffaufwuchs-Trägermaterial durchzuführen. Das Trägermaterial bietet je nach Ausführung eine spezifische Oberfläche von 400 bis zu 600 m<sup>2</sup>/m<sup>3</sup> und liegt damit bis um den Faktor 3 über den bisher zur Nitrifikation eingesetzten klassischen Tropfkörpermaterialien. Damit werden ebenfalls um etwa den Faktor 2 bis 3 höhere Raumabbauleistungen im Vergleich zum klassischen Tropfkörper erwartet. Hieraus ergeben sich eine proportionale Verringerung des Reaktorvolumens und eine Verringerung der Bauhöhe.

Die Ausführung der Biomasse-Aufwuchsträger als profilierte Hohlzylinder sichert einen hohen Grad an Durchlüftung nahezu unabhängig von der Einbaulage. Verengungen der Luftkanäle, wie sie bei kleinen kugelförmigen Materialien bei stärkerem Biofilmbewuchs z.B. in Filtern auftreten, spielen hier nahezu keine Rolle. Der Luftdurchsatz durch natürliche Konvektion, ggf. unterstützt durch einen sehr kleinen Saugzugventilator, sollte ausreichend sein um eine ausreichende Sauerstoffversorgung zu gewährleisten. Damit wird eine energetisch außerordentlich günstige Sauerstoffversorgung möglich analog zum klassischen Tropfkörper, was einer der entscheidenden Vorteile des neu entwickelten Reaktorkonzeptes ist.

Der Austrag der überschüssigen Biomasse erfolgt zum einen kontinuierlich durch Ausspülen mit dem abwärts gerichteten Wasserstrom durch das Material und zusätzliche in größeren Abständen erfolgende Spülungen. Diese Spülungen werden durch einfache Suspension des geschütteten Trägermaterials nach Einstauen der Trägermaterialschüttung im Reaktor und intensiver Wasserbewegungen mittels Spülpumpe oder Rührwerk mit geringem Energieaufwand und minimalem baulich-apparativen Aufwand erzielt. Im Gegensatz zum klassischen Filter sind keine speziellen Filterböden, keine speziellen Filterdüsen und weitaus leistungsschwächere Spülpumpen notwendig. Während der Rieselstromreaktor nur im Abstrom zu spülen ist und das Trägermaterial nicht mobilisiert wird, kann das Trägermaterial des neu entwickelten Schüttbettreaktors leicht mobilisiert und damit sehr effektiv von überschüssiger Biomasse befreit werden. Zudem sichert die Durchmischung des Trägermaterials einen annähernd homogenen Biofilmbewuchs in allen Schichten des Reaktors, während bei klassischen Tropfkörpern und Rieselstromreaktoren eine deutliche Differenzierung der Biofilmmzusammensetzung in Abhängigkeit von der Einbauhöhe vorliegt.

## 4 Untersuchungen

### 4.1 Untersuchungsansatz

Das Ziel der Versuchsanlage ist es, eine Weiterentwicklung von Reaktorkonzepten mit natürlicher Belüftung und trägerfixierter Biomasse zu verwirklichen. Dadurch kann auch bei aeroben biologischen Prozessen maßgeblich Energie eingespart werden. Dieses Verfahren soll sowohl für eine energiesparende Nitrifikation von kühlen und stickstoffhaltigen Abwasser als auch für eine Vorbehandlung industrieller Abwasser mit hohen CSB-Konzentrationen eingesetzt werden können.

Zur Erprobung des neuen Reaktorkonzeptes wurde zunächst die Eignung zur Nitrifikation und die Eignung zur Elimination der nach Vorreinigung verbleibenden geringen CSB/BSB<sub>5</sub>-Konzentrationen untersucht (Schwachlastsystem). Diese Untersuchungen dienten auch zur erstmaligen Erprobung des Reaktorkonzeptes sowie auch der Erprobung des hydraulischen Verhaltens.

In einer zweiten Untersuchungsphase sollte die Eignung zur effizienten Elimination der organischen Verbindungen, möglichst in einem Industrieabwasser, untersucht werden (Hochlastsystem).

### 4.2 Untersuchungen am Standort der Kläranlage Obergartzem – Enzen: Schwachlastsystem

Die Versuchsanlage wurde auf der KA Obergartzem-Enzen aufgebaut. Diese Kläranlage wurde ausgewählt, da sie als einzige Anlage in der Umgebung durch eine weitgehende CSB Elimination in der Vorreinigung die ausreichende Rohwasserqualität bietet. Die KA Obergartzem-Enzen verfügt neben der mechanischen Vorreinigung über eine Hochlastbelebungsstufe mit einer Zwischenklärung, aus deren Ablauf die angestrebte Zulaufwasserqualität für die Versuchsanlage entnehmbar ist. Die Anlage ist für 20.000 EW und für einen Trockenwetterzufluss von 6.000 m<sup>3</sup>/d ausgelegt. (Ertfverband 2006, S. 3)

Bei dem ankommendem Abwasser handelt es sich überwiegend um kommunales Abwasser. Dieses wird in Obergartzem-Enzen mit dem Aquator-Verfahren gereinigt, welches eine Kombination aus Belebtschlammverfahren und Biofilmsystem darstellt. Es besteht aus einer Hochlastbelebungsstufe zum Abbau der Kohlenstoffverbindungen, einer Nitrifikationsstufe in Festbettreaktoren und einer Denitrifikationsstufe als Sandfiltration. (Ertfverband 2006, S. 1)

Die mechanische Reinigung dient der Entfernung von Grobstoffen, Sanden und Schwimmstoffen, zu denen unter anderem Fette und Styropor gehören. Der mechanischen Vorreinigung folgt die belüftete Hochlastbelebungsstufe. Hier findet der Abbau von Kohlenstoffverbindungen durch Mikroorganismen statt. Außerdem erfolgt hier eine simultane Phosphatfäll-

lung durch die Zugabe von Eisenchloridsulfat. (Erftverband 2006, S. 1–2) Dem folgt die Zwischenklärung, aus welcher auch das Wasser für die Versuchsanlage entnommen wird. In der Zwischenklärung werden Schlamm und Wasser getrennt und das vorgereinigte Abwasser gelangt, wie in Bild 4-1 zu erkennen, weiter zu den sechs belüfteten Festbettreaktoren beziehungsweise in die Versuchsanlage. Die Festbettreaktoren sind mit Blähton gefüllt, wo die Oxidation des Stickstoffs erfolgt. Der abgesetzte Schlamm wird als Rücklaufschlamm in die Belebungsstufe gefördert. (Erftverband 2006, S. 2)

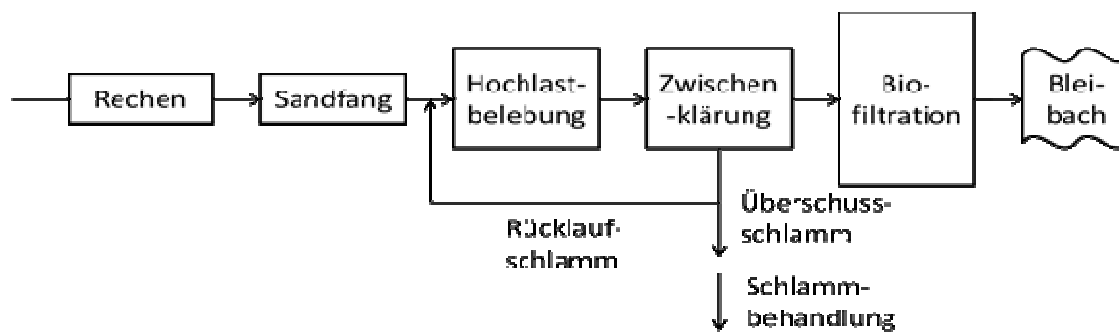


Bild 4-1: Blockfließbild der KA Obergartzen-Enzen

In den mit Blähton gefüllten Filtrationsreaktoren findet die Nitrifikation von Ammoniumstickstoff zu Nitratstickstoff statt. Daraufhin gelangt das Wasser in den Denitrifikationsfilter, wo zusätzlich noch einmal eine Zugabe von Eisenchlorid erfolgt um die Phosphatkonzentration im Abwasser weiter zu reduzieren. Schließlich wird das Abwasser, nachdem es alle Reinigungsstufen durchlaufen hat, in den Bleibach eingeleitet. (Erftverband 2006, S. 3)

#### 4.2.1 Versuchsaufbau

Die zweistraßige Versuchsanlage besteht aus einem Tropfkörper (Referenzstraße 1) und einem Schüttbettfilter (Straße 2). Beide befinden sich zusammen mit sämtlichen Steuereinheiten in einem 2,4 m x 6 m großen Container. Die gesamte Versuchsanlage wird mit einer Tauchpumpe (P0) aus der Zwischenklärung mit Wasser versorgt. Das Wasser wird durch einen ca. 50 Meter langen 1" Schlauch in die Vorlage (B1) der Versuchsanlage gepumpt. Durch ein in den Schlauch eingebautes Drosselventil lässt sich die Zulaufmenge der Pumpe etwas regulieren. In der Vorlage befinden sich die beiden Pumpen P1 und P2, welche als Zulaufpumpen für die beiden Versuchsstraßen dienen. In der Vorlage befindet sich außerdem eine pH-Sonde mit integriertem Temperatursensor zur Überwachung des Abwassers. Des Weiteren befindet sich oberhalb der Vorlage ein Notüberlauf, welcher ein Überlaufen des Beckens verhindert.

Die Steuerung der Anlage befindet sich in einem Schaltschrank im Container. Die Automatisierung/ Steuerung aller Pumpen, Motoren und Magnetventile erfolgt mit Hilfe einer LOGO Steuerung. Die Automatisierung bietet als Variante a) den Automatikbetrieb sowie als Vari-

ante b) den Handbetrieb. Der Handbetrieb ermöglicht bei Ausfall des Automatikbetriebs die gesamte Anlage bzw. auch einzelne Anlagenteile per Hand zu betreiben.

In Bild 4-2 ist der komplette Versuchsaufbau zu sehen. Die einzelnen Straßen werden im weiteren Verlauf der Arbeit detaillierter beschrieben.

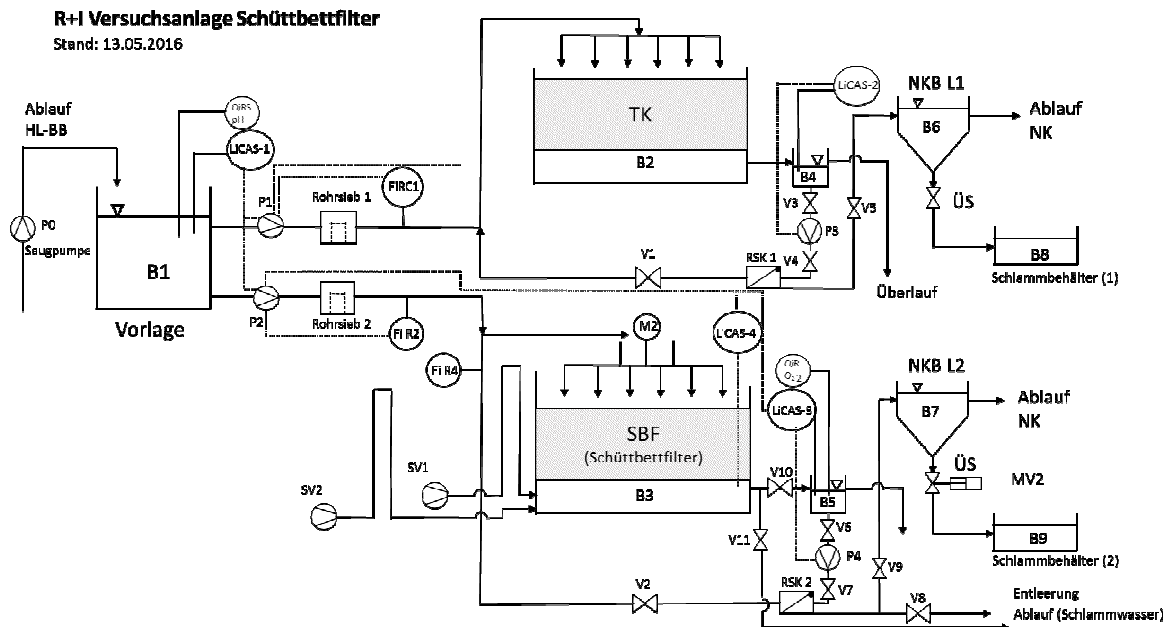


Bild 4-2: R+I-Fließschema der Versuchsanlage

#### 4.2.1.1 Referenzstraße Tropfkörper

Der Tropfkörper wird durch die Schlauchpumpe P1 mit Wasser aus der Vorlage gespeist. Die Durchflussmenge wird mit einem Induktiven Durchflussmesser (IDM) gemessen und in der LOGO-SPS der Fa. Siemens aufgezeichnet. Das Wasser gelangt über einen Schlauch in den Drehsprenger des Tropfkörpers von wo aus es auf den Tropfkörper gerieselt wird. Der Tropfkörper ist 1,60 m hoch und hat einen Durchmesser von 60 cm. Er ist bis zu einer Höhe von 1,30 m mit einem festen Kunststoffträgermaterial mit einer spezifischen Aufwuchsfläche von  $150 \text{ m}^2/\text{m}^3$  gefüllt. Der Drehsprenger wird mit einem Motor (M1) angetrieben, so dass der Tropfkörper gleichmäßig beschickt wird. Aus dem Tropfkörper gelangt das gereinigte Abwasser in das Ablaufbecken (B4). In diesem Becken befinden sich eine Höhenstandsonde sowie ein Notablauf. Im Automatikbetrieb wird die darauf folgende Rezirkulationspumpe (P3), wenn der Zuschaltwasserstand erreicht wird, eingeschaltet. Bei zu hohem Wasserstand kann das Wasser über den Notüberlauf abfließen. Mit der Rezirkulationspumpe (P3) wird das gereinigte Abwasser durch einen Schlauch zu einem Teil in das Nachklärbecken und zum anderen Teil durch die Rezirkulationsleitung zurück zum Tropfkörper gepumpt. Die Mengenverteilung kann über die Stellungen der Kugelhähne in der der Rezirkulationsleitung geregelt

werden. Das gereinigte Abwasser verlässt die Versuchsanlage durch eine Leitung mit einer Nennweite von 50 mm aus dem Versuchscontainer und gelangt in den Ablauf der Zwischenklärung der Kläranlage Obergartzem-Enzen.

#### 4.2.1.2 Straße Schüttbettfilter

Der Schüttbettfilter wird mittels der Tauchpumpe P2 aus der Vorlage mit Abwasser versorgt. Die Durchflussmenge wird analog zum Tropfkörper mit einem MID überwacht. Durch ein Rohr gelangt das Abwasser in einen Drehsprenger, der mit einem Motor (M2) angetrieben wird und das Wasser auf den Schüttbettfilter rieselt. Der Schüttbettfilter hat eine Höhe von 2 m, einen Durchmesser von 60 cm und ist bis zu einer Höhe von 1,40 m mit Trägermaterial gefüllt (Bild 4-3). Bei dem Trägermaterial handelt es sich um ein leicht aufschwimmendes Trägermaterial aus Kunststoffträgermaterial der Fa. EvU (Innovative Umwelttechnik GmbH). Dieses Kunststoffträgermaterial besitzt eine Aufwuchsfläche von ca.  $400 \text{ m}^2/\text{m}^3$ , welche eine Länge, sowie einen Durchmesser von 1 cm haben und innen hohl sind. Auf das Trägermaterial wird in Kapitel 3.4 näher eingegangen. Der Schüttbettfilter kann, wenn der Sauerstoffgehalt im Ablauf zu gering ist, mit einem kleinen Lüfter im Gegenstrom von unten belüftet werden, sodass sich eine leichte Aufwärtsströmung der Luft innerhalb des Filters einstellt.

Aus dem Reaktor gelangt das gereinigte Abwasser in das Ablaufbecken (B5). In diesem befindet sich sowohl eine Sauerstoffsonde mit integriertem Temperaturfühler als auch eine Höhenstandssonde, die, wie beim Tropfkörper, dazu dient ein Trockenlaufen der Pumpen zu verhindern. Ein Notablauf verhindert eine Überfüllung des Filters.

Aus dem Ablaufbecken gelangt das Wasser mit der Rezirkulationspumpe (P4) zu einem Teil in die Rezirkulation und zum anderen in die Nachklärung, sofern sich der Pegelstand zwischen dem minimalen und maximalen Wert befindet und das Signal für den Durchfluss freigegeben wird. Wie beim Tropfkörper lässt sich auch hier die Mengenverteilung anhand der Ventileinstellungen einstellen.



Bild 4-3: Schüttbettfilter (links) mit Nachklärung (rechts) (eigene Aufnahmen)

Zur Verhinderung einer Festsetzung und Verblockung der Trägermaterialschüttung des Schüttbettfilters durch zu viel Biomasse ist eine Spülvorrichtung eingebaut. Beim Spülen muss der Schüttbettfilter mit Wasser gefüllt werden und der Ablauf zum Becken (B5) geschlossen sein. Sobald das Trägermaterial vollständig aufschwimmt kann mithilfe einer Drehvorrichtung das Reaktorkrählwerk händisch gedreht werden. Der Reaktor wird somit von übermäßiger Biomasse gereinigt. Anschließend kann das mit Biofilmpartikeln beladene Abwasser über einen separaten Abfluss abgeführt werden.

Das gereinigte Abwasser gelangt, wie beim Tropfkörper, über den Containerablauf zurück in den Ablauf der Zwischenklärung der Kläranlage Obergartzem-Enzen.

#### 4.2.1.3 Besonderheiten des Schüttbettfilters

Der Schüttbettfilter ist eine Weiterentwicklung des Tropfkörpers. Er ist so konzipiert, dass ein Betrieb ohne künstliche Belüftung möglich ist. Die Sauerstoffversorgung wird durch den natürlichen Luftzug ermöglicht, der sich durch den Temperaturunterschied zwischen Wasser- und Lufttemperatur einstellt. Falls die Sauerstoffüberwachungswerte im Ablauf unter 2 mg/l sinken, besteht die Möglichkeit einer Notsauerstoffzufuhr durch einen Ventilator. Im Versuchszeitraum in Obergartzem-Enzen wurden diese Werte jedoch nie unterschritten. Eine Notsauerstoffversorgung war dort folglich zu keinem Zeitpunkt nötig.



Die Durchmischung des Trägermaterials während der Spülung dient nicht nur einer ausreichenden Sauerstoffversorgung, sondern ermöglicht auch eine homogene Verteilung der unterschiedlich mit Biomasse bewachsenen Aufwuchsträger.

Durch die Fluidisierbarkeit des Materials und die mechanischen Reinigungsvorrichtungen ist eine Entfernung von Biomasse durch den Spülprozess möglich. Außerdem wird permanent etwas Biomasse, welche sich vom Trägermaterial gelöst hat, über den Ablauf ausgetragen. Eine Spülung der Anlage wird notwendig, wenn die Durchlässigkeit der Trägermaterialschüttung nachlässt. Gespült wird, wenn der Schüttbetfilter durch zu viel Biomasse oder durch den Eintrag von Fremdstoffen belegt ist. Diese Spülung erfolgt im Schüttbetfilter ausschließlich mithilfe von (vorgereinigtem) Abwasser und mechanischer Energie. So ist eine rein mechanische Spülung möglich. Falls dies nicht ausreicht um das Trägermaterial von überschüssiger Biomasse und Schmutz zu befreien, kann alternativ auch eine Druckluftspülung angewendet werden.

Während der Messphase auf der KA Obergartzem-Enzen wurde die Anlage nach einem Monat das erste Mal und eine Woche später das zweite Mal gespült. Nachfolgend mussten keine weiteren Spülvorgänge vorgenommen werden.

#### **4.2.1.4 Beschreibung des Trägermaterials**

Im Schüttbetfilter wurde das Trägermaterial EvU Pearl® mit einer spezifischen Aufwuchsfläche von  $400 \text{ m}^2/\text{m}^3$  verwendet. Bei dem Trägermaterial handelt es sich um hohle zylinderförmige Kunststoffteilchen der Fa. EvU mit einer verzahnten Oberfläche. Wie anhand Bild 4-4 zu erkennen ist, sind die einzelnen Teilchen ca. 1 cm lang und haben einen Außendurchmesser von ebenfalls ca. 1 cm sowie einen Innendurchmesser von ca. 0,8 cm. Sowohl die Innen- als auch die Außenseite des Trägermaterials besitzen feine, zahnartige Einkerbungen und bieten dadurch eine gute Aufwuchsfläche für Mikroorganismen. (EvU-Innovative Umwelttechnik GmbH 2016)





Bild 4-4: Zeichnung des verwendeten Aufwuchsträgermaterials EvU Pearl® ((EvU-Innovative Umwelttechnik)

Die EvU Pearl® werden mittels Extrusionsverfahren hergestellt und sind durch deren Wandstärke von ungefähr 2 mm ausreichend stabil gegen Druck und andere mechanische Beanspruchung. Die Vorteile der EvU Pearl® sind der recht einfache geometrische Aufbau, die große spezifische Gesamtoberfläche sowie der freie Innendurchgang, wodurch ein komplettes Zuwachsen des Innenraumes ausgeschlossen werden kann. Die feinen inneren Strukturen anderer Materialien bieten zwar eine größere theoretische Aufwuchsfläche, jedoch besteht bei ihnen auch mehr die Gefahr des Zuwachsens und somit der Verstopfung.

Mit der Geometrie des eingesetzten Materials wird ein gutes Verhältnis zwischen Struktur, Oberfläche, Materialeinsatz und betrieblichen Eigenschaften erzielt. (EvU-Innovative Umwelttechnik GmbH 2016)

Außerdem bietet es eine Vielzahl an Einsatzmöglichkeiten, nicht nur im Schüttbettfilter, sondern auch im Schwebebett oder Wirbelbett. Überschüssige Biomasse lässt sich gut ablösen, ebenso sind sie weitgehend unempfindlich gegenüber dem Eintrag von Haaren oder groben Fasern. (EvU-Innovative Umwelttechnik GmbH 2016)

## 4.2.2 Inbetriebnahme, Besonderheiten und Probleme

### 4.2.2.1 Einarbeitungsphase

Die Versuchsanlage wurde Ende April 2016 nach Obergartzem-Enzen transportiert und im Laufe der folgenden zwei Wochen angeschlossen und fertiggestellt. Am 12.05.2016 wurde die Straße 2 (Schüttbettfilter) zum ersten Mal im Handbetrieb mit Rohwasser und Belebtschlamm angefahren. Von da an lief die Versuchsstraße 2 für 10 Tage im Rezirkulationsbetrieb.

Geplant war es beide Straßen im Automatikbetrieb laufen zu lassen. Aufgrund von diversen Problemen mit der Elektronik in der Steuerung war es nicht möglich, die Anlage durchgehend im Automatikbetrieb zu betreiben. Außerdem erreichte die Rezirkulationspumpe der Referenzstraße nicht die ausreichende Pumpleistung. Daher wurde zunächst nur der Schüttbetfilter im Handbetrieb gestartet.

Ab der dritten Maiwoche war es mit Hilfe einer Zeitschaltuhr, welche die P2 getaktet ein- und ausschaltete, möglich, die Anlage durchgehend im Handbetrieb zu betreiben.

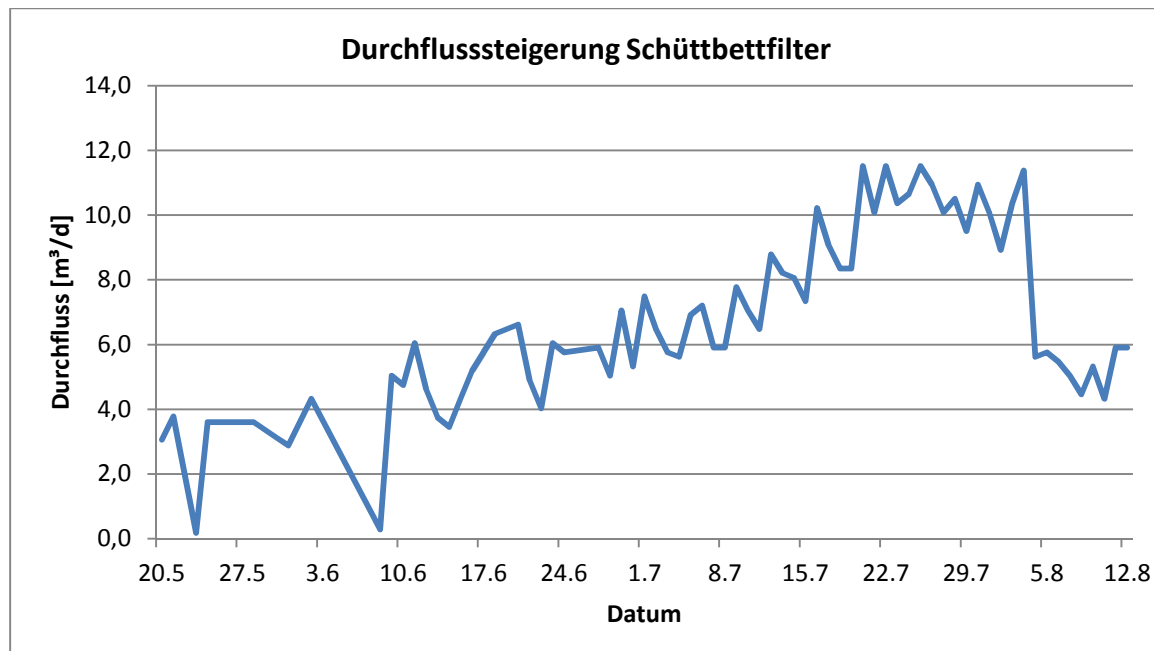


Bild 4-5: Steigerung der Tagesabwassermenge im Zulauf zum Schüttbetfilter

Der Durchfluss wurde, wie in Bild 4-5 zu erkennen, langsam gesteigert, damit die Biomasse auf dem Trägermaterial aufwachsen kann. Ab dem 03.08. wurde die Anlage, noch einmal für 1,5 Wochen mit deutlich geringerer Belastung beschickt um Veränderungen bei der Abbauleistung zu untersuchen.

Ab dem 09.06.2016 konnte zusätzlich die Referenzstraße mit einer Durchflussmenge von 0,7 l/min parallel in Betrieb genommen werden.

#### 4.2.2.2 Aufbau und Untersuchung des Biofilms auf dem Trägermaterial

Der Biofilm spielt bei den biologischen Reinigungsverfahren eine entscheidende Rolle. Das durch den Schüttbetfilter rieselnde Abwasser sorgt für ein Wachstum von Mikroorganismen, bestehend aus Bakterien, Pilzhyphen und Protozoen. Der Biofilm hat bei seiner Entstehung eine Dicke von weniger als 50 µm und kann bis zu einer Größe von einigen 100 µm heranwachsen, wenn die Umgebungsbedingungen stimmen und eine ausreichende Versorgung mit Nährstoffen gewährleistet ist. (Mudrack 2010, S. 70), (Schrader 2007, S. 29)

Biofilme bestehen aus vielen zusammengesetzten Schichten unterschiedlicher Lebewesen, welche ein eigenes Mikroklima darstellen. Das Festsetzen von Bakterien im Biofilm ist gleichermaßen mit Vor- und Nachteilen verbunden. Vorteilhaft zu nennen ist, dass eine Bewegung hin zum Sauerstoff nicht notwendig ist. Des Weiteren ist jedoch vor allem der Schutz gegen Einflüsse von Außerhalb für die Biofilmorganismen von Nutzen. Nachteilig ist die schlechte Sauerstoffversorgung und Nährstoffknappheit in der Tiefe des Biofilms. (Drews 2010, S. 194).

Die oberen Schichten im Trägermaterial von Tropfkörpern und ebenso im Schüttbettfilter sind stärker belastet als die unteren Schichten. Deshalb können in den oberen Schichten nur Organismen mit kurzen Generationszeiten überleben. In den unteren Schichten überleben auch Organismen mit langen Generationszeiten. Zu diesen Organismen zählen unter anderem die Nitrifikanten. (Mudrack 2010, S. 71) Bei sehr dicken Biofilmen herrschen in den untersten Schichten anoxische bis anaerobe Verhältnisse.

Während im Tropfkörper die Spülkraft des Abwassers abgelöste Biofilmteile austrägt, wurde davon ausgegangen, dass dies beim Schüttbettfilter nicht ausreicht, weshalb hier die Biofilmablösung bzw. Austrag durch mechanische Einwirkung erfolgen muss.

Sowohl in den Tropfkörpern als auch auf dem Material des Schüttbettfilters leben ebenfalls höhere Lebewesen, die sich positiv auf den Sauerstoffaustausch und die O<sub>2</sub>-Versorgung sowie auch auf die Minderung der Überschussschlammproduktion auswirken. Zu diesen Lebewesen gehören Protozoen, Nematoden und Rädertierchen. Ebenso gibt es höhere tierische Lebewesen wie Borstenwürmer, Fadenwürmer und Insekten Larven. Zu nennen sind hierbei die Larven der Tropfkörperfliege. Diese gehört zu den Schmetterlingsmücken. Sie sorgt durch ihre Bewegungen und ihr Nahrungsverhalten für eine Reduzierung der Biofilmdicke und vermeidet Verstopfungen. Ein Weibchen der Tropfkörperfliege kann zwischen 20 bis 100 Eier legen. Die Entwicklung vom Ei bis zur Fliege ist stark temperaturabhängig. So dauert die Entwicklung bei 10°C ungefähr 60 Tage, bei 20° C hingegen nur 14 Tage. (Mudrack 2010, S. 70–71)

Um zu überprüfen wie sich die Biomasse auf dem Trägermaterial aufbaut mussten zunächst Gewicht und Dichte des unbewachsenen Trägermaterials bestimmt werden.

Dafür wurde ein 1 Liter fassender Plastikbehälter, wie in Bild 4-6 gezeigt, mit dem Trägermaterial gefüllt und gewogen. Ein Liter des trockenen Trägermaterials wog 254 g, was einer Trockenrohichte des Trägermaterials von 254 g/l entspricht. Als Referenzwert für spätere Messungen diente in Wasser eingelegtes Trägermaterial nach einer Abtropfzeit von fünf Minuten.



Bild 4-6: Bewachsenes Trägermaterial (links); Messung Gewicht Trägermaterial (rechts) (Lerner 2016)

Ein Liter des in fünf Minuten abgetropften Trägermaterials wog 323 g. Dies entspricht einer Gewichtszunahme von fast 30 % im Gegensatz zum trockenen Trägermaterial.

Nach einem Monat wurde eine Stichprobe des Trägermaterials aus dem Schüttbettfilter entnommen und gewogen. Das Trägermaterial zeigte sichtbaren Bewuchs, teilweise wuchsen dicke Klümpchen besonders in den Zwickeln der oberen Lagen des Trägermaterials. Die Messung erfolgte genau wie zuvor und es ergab sich ein Gewicht von 350 g woraus ersichtlich ist, dass die Biomasse innerhalb von vier Wochen um 27 g zugenommen hat. Danach wurde die Messung wöchentlich wiederholt, sodass eine Wachstumskurve - siehe Bild 4-7 - dargestellt werden kann.

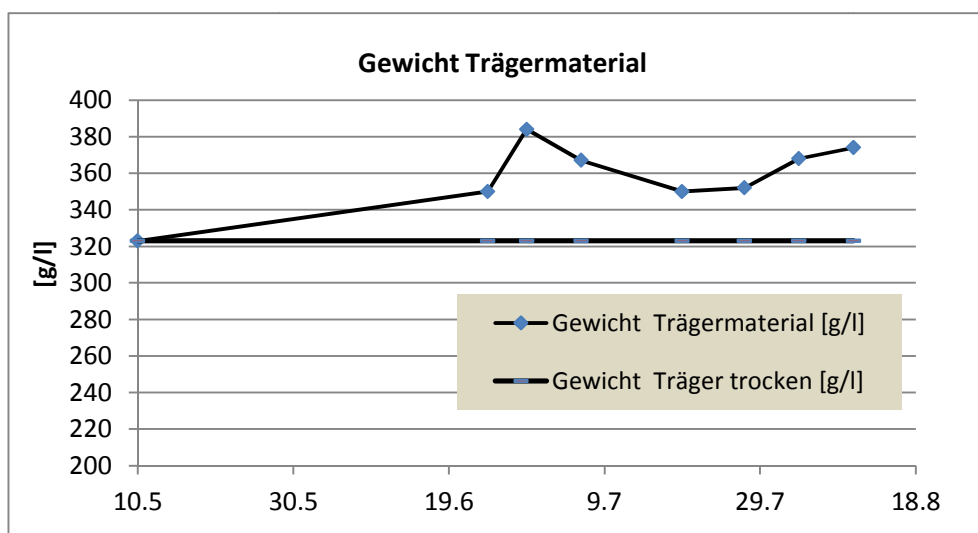


Bild 4-7: Entwicklung der Biomasse auf dem Trägermaterial über den Versuchszeitraum

Es ist zu sehen, dass das Abtropfgewicht ab Mitte/Ende Juni nur noch in geringem Maße variierte, d.h. es stellt sich ein recht stabiler Zustand ein, was sich auch daran zeigte, dass nur ganz wenige Spülungen notwendig waren.

Im Trägermaterial befanden sich nicht nur Biomasse, sondern auch Verunreinigungen, welche nicht ohne weiteres für die Messung entfernt werden konnte. Die biologischen Prozesse waren auch äußerlich deutlich erkennbar. So konnten nach 30 Tagen und Temperaturen zwischen 16 bis 20 Grad die ersten Tropfkörperfliegen am Rand des Schüttbettfilters gesichtet werden. Außerdem siedelten sich ebenfalls nach ca. 30 Tagen einige Abwasserpilze im Ablauf des Schüttbettfilters an.

Tabelle 4-1: Entwicklung des Biofilms auf dem Trägermaterial, Annahme TR- im Biofilm 4,5%

Datum	Gewicht Trägermaterial [g/l]	Gewicht Träger trocken [g/l]	TR	
			Abtropfgewicht Biomasse [g/l]	Hochrechnung Biomasse-Trockengewicht [g/l]
10.05.2016	323	<b>323</b>	0	0,00
24.06.2016	350	323	27	1,22
29.06.2016	384	323	61	2,75
06.07.2016	367	323	44	1,98
19.07.2016	350	323	27	1,22
27.07.2016	352	323	29	1,31
03.08.2016	368	323	45	2,03
10.08.2016	374	323	51	2,30

Spülen der Anlage 08.07.16 und 13.07.16

#### 4.2.2.3 Besonderheiten und Probleme

Die Abwasserqualität bot keine Probleme bei der Inbetriebnahme der Anlage. Schwierigkeiten mit der Schaltanlage und der darin verbauten Elektronik führten aber zu erheblichen Verzögerungen. Ein Automatikbetrieb war zu Beginn der Versuchsphase nicht möglich. Um dennoch den Durchfluss und damit auch die Raumbelastung langsam zu steigern, wurde die Zulaufpumpe P2 anfangs mit einer Zeitschaltuhr gesteuert. Erschwerend kam hinzu, dass die Mengeneinstellung mittels der Handventile nicht stabil war und sich durch „eingefangene“ Feststoffe die eingestellte bzw. gewünschte Menge meist wieder veränderte.

Eine weitere Schwierigkeit war, dass sich die komplette Anlage immer wieder von selbst ausschaltete und es somit häufiger zu Stillständen der gesamten Anlage kam. Die Ursache hierfür konnte bis zum Schluss nicht ermittelt werden, zunächst wurden Stromausfälle auf der KA Enzen vermutet, was nur einmal der Grund gewesen sein konnte. Selbst die Installation einer unterbrechungsfreien Spannungsversorgung (USV) für die speicherprogrammierbare Schaltung (SPS), die auch Spannungseinbrüche überbrücken sollte, brachte keine wirkliche Besserung. Vermutet wurde schließlich ein interner Hardwarefehler der LOGO-

Bausteine, der aber im Rahmen der verfügbaren Zeit und der begrenzten Möglichkeiten nicht gefunden und behoben werden konnte.

Damit dennoch frühzeitig auf die Stillstände reagiert werden konnte, wurde eine Überwachung mit Hilfe eines Smartphones eingerichtet. Mit der Android App MobileWebcam war es möglich, im zwei Stunden Takt die Anzeige des Schaltschranks zu fotografieren. Somit konnte die Stillstände der Anlage frühzeitig erkannt und Gegenmaßnahmen ergriffen werden.

Zudem war es nötig, die Sauerstoffsonde wöchentlich zu reinigen und regelmäßig mit Referenz-Messgeräten zu überprüfen. Die pH-Sonde musste ebenfalls regelmäßig gesäubert und mit einer Kalibrierlösung überprüft werden.

Ein weiteres Problem in der Anfangszeit war ein hoher Feststoffgehalt im Zulauf, bedingt durch vermehrtes Regenaufkommen und Ausfällen der Filter in der großtechnischen Anlage. Das vorhandene Rohrsieb verstopfte innerhalb eines Tages viel zu stark. Grund hierfür war eine bezogen auf die Abwasserqualität zu fein gewählte Maschenweite des der Anlage vorgeschalteten Siebes. Um zu vermeiden, dass zu viele Feststoffe in den Schüttbettfilter gelangten wurde um die Zulaufpumpe (P2) ein Filter gebaut. Dieser bestand aus einer Kunststoffkiste, in welche die Pumpe gesetzt wurde. Die Kiste selber wurde mit einem Sack aus Moskitonetz / Fliegennetz umhüllt, wie in Bild 4-8 ersichtlich ist. Das Rohrsieb konnte nun entfernt werden.



Bild 4-8: Moskitonetz



Bild 4-9: Siebkorb



Nach einem Monat war das Moskitonetz so stark mit Biomasse bewachsen, dass der Durchfluss zum Schüttbetfilter stark eingeschränkt war. Es wurde entfernt und durch einen grobmaschigen Wäschekorb ersetzt (siehe Bild 4-9). Dieser ließ zwar etwas mehr kleinformatische Feststoffe durch, wuchs aber wesentlich langsamer zu.

Nach Einbau des Siebkorb konnten des Weiteren die Zulaufproben direkt aus dem Wäschekorb entnommen werden.

### 4.2.3 Untersuchungsparameter und Probenahme

#### 4.2.3.1 Beschreibung und Auswertung der durchgeführten Messungen

Ziel der Versuchsphase waren die Untersuchungen des Schüttbetfilters zur Nitrifikation. Der chemische Sauerstoffbedarf spielt bei der Nitrifikation eine wichtige Rolle, weswegen dieser ebenfalls beprobt wurde. Es wurden in der Versuchsanlage folgende Parameter untersucht: CSB,  $\text{NH}_4\text{-N}$ ,  $\text{NO}_2\text{-N}$ ,  $\text{NO}_3\text{-N}$ ,  $\text{BSB}_5$  sowie die Menge der absetzbaren Stoffe.  $\text{PO}_4\text{-P}$  wurde nach der Einarbeitungsphase beprobt. Die Fähigkeit der Anlage zu nitrifizieren kann durch Messungen der Nitrat- und Ammoniumkonzentrationen im Abwasser bestimmt werden.

Auch erfolgte an der Anlage eine Überwachung der pH-Werte im Zulauf sowie des Sauerstoffgehaltes im Ablauf des Schüttbetfilters mittels Sonden. Zum anderen wurden die Durchflüsse im Zulauf und im Ablauf mittels IDM überwacht.

#### 4.2.3.2 Abwasserrelevante Parameter

##### **Chemischer Sauerstoffbedarf:**

Der CSB gibt an, welche Menge an Sauerstoff ( $\text{O}_2$ ) für eine vollständige biologische oder chemische Oxidation, der im Wasser vorliegenden Schmutzstoffe, benötigt wird. Er spielt außerdem eine Rolle für die Bewertung des Verschmutzungsgrades kommunaler Abwässer. Für die Bestimmung des CSB wurden Rundküvetten der Firma Macherey-Nagel verwendet. Zur Erfassung erfolgt eine Oxidation mit Kaliumdichromat, Schwefelsäure und Silbersulfat bei einer Temperatur von  $148^\circ\text{C}$  über 2 Stunden. In einem anderen Verfahren lässt sich der CSB-Gehalt mit demselben Küvettenatz anhand eines Schnelltests bei dem die Küvetten bei  $160^\circ\text{C}$  nur für 30 Minuten gekocht werden, bestimmen. (MACHEREY-NAGEL GmbH & Co. KG 2015) In dieser Versuchsreihe wurde weitestgehend der Schnelltest angewendet.

##### **Biochemischer Sauerstoffbedarf:**

Der biochemische Sauerstoffbedarf (BSB) gibt die organische Verschmutzung des Abwassers sowie die Sauerstoffmenge an, welche beim Schmutzstoffabbau mikrobieller Stoffwechselprozesse verbraucht wird. Üblicherweise wird der BSB für ein aerobes Milieu bei  $20^\circ\text{C}$  in 5 Tagen bestimmt ( $\text{BSB}_5$ ). Der  $\text{BSB}_5$  wurde im Labor der Versuchsanlage der KA Obergartzem-Enzen nicht selbst bestimmt, sondern im Labor des Instituts für Siedlungswas-

serwirtschaft (ISA) der RWTH Aachen mit der Verdünnungsmethode nach DIN 1.899-1. Es wurde von insgesamt fünf Zulauf- und Ablaufproben der  $BSB_5$  bestimmt. Aus diesen Messwerten konnte anschließend ein Verhältnis von  $BSB_5$  zu CSB abgeleitet werden. In dieser Versuchsreihe betrug das Verhältnis im Zulauf von  $BSB_5$ :CSB 1:3,75 und im Ablauf 1:6,5. Unter Zuhilfenahme dieser Verhältniswerte konnte der  $BSB_5$  für den restlichen Messzeitraum berechnet werden.

### **Stickstoff:**

Hauptziel des untersuchten Abwasserreinigungsverfahrens mittels eines Schüttbettfilters ist die Elimination der im Abwasser enthaltenen Stickstoffverbindungen. Daher lag der Fokus der durchgeführten Analytik vornehmlich auf der Bestimmung des Ammoniumstickstoffs ( $NH_4$ -N), des Nitritstickstoff ( $NO_2$ -N) sowie des Nitratstickstoff ( $NO_3$ -N). Anhand dieser Stickstoffparameter lässt sich der Nachweis einer vollständigen Nitrifikation erbringen. Bei einer erfolgreichen Nitrifikation sollten sich weder Ammoniumstickstoff noch Nitritstickstoff im Ablauf des Reaktors nachweisen lassen. Gleichzeitig hohe Nitratstickstoffkonzentrationen sind jedoch Zeichen einer fortdauernden Nitrifikation. Die Messung der Stickstoffparameter erfolgte dreimal wöchentlich und wurde, photometrisch, mit einem Küvetten Test der Firma Macherey-Nagel, bestimmt. Nitrit wurde ab dem zweiten Monat nur noch einmal wöchentlich überprüft.

### **Phosphor:**

Phosphor spielt als limitierender Eutrophierungsfaktor eine entscheidende Rolle für Gewässer. (Al Jiroudi 2015, S. 38) Im späteren Verlauf wurde Phosphor in Form von Orthophosphat ( $PO_4$ -P) stichprobenartig gemessen. Die Bestimmung erfolgt ebenfalls mit abgesetzten, filtrierten Proben per photometrischer Messung mit Rundküvetten der Firma Macherey-Nagel.

### **Absetzbare Stoffe:**

Die Menge der absetzbaren Stoffe gibt einen Überblick über partikuläre Schmutzfracht im Abwasser. Für die Ermittlung der absetzbaren Stoffe wurde eine aufgeschüttelte Abwasserprobe von einem Liter in einen Imhofftrichter gefüllt und nach 30 Minuten Absetzzeit das Volumen der abgesetzten Stoffe abgelesen.

### **Trockensubstanzgehalt:**

Der Trockensubstanzgehalt (TS) gibt Aufschluss über die aktive Biomasse (Wasser Wissen, 2009b) im Tropfkörperschlamm. Der TS-Gehalt wurde mit dem Mikrowellenverfahren bestimmt. Dafür wurde nach dem Spülvorgang eine Probe mit Schlammwasser in ein Aluschälchen gegeben und in einer Trocknungswaage (Precisa M310) solange bei  $105^\circ C$  getrocknet, bis das Gewicht für mindestens eine Minute konstant blieb.



### 4.2.3.3 Probenentnahme

Die Proben wurden als Stichproben in der Regel dreimal wöchentlich, montags, mittwochs und freitags, zwischen 9 und 11 Uhr genommen. Die Probenentnahmestelle wurde am Anfang etwas variiert. Bei den ersten zwei Proben wurde das Wasser aus der Vorlage entnommen. Von der zweiten bis vierten Probenwoche wurden die Proben aus dem Rohrsieb entnommen. Der Rieselarm erwies sich aufgrund des geringen Feststoffgehalts und der gleichmäßigen Druckverteilung als geeignet für die Probenahme. Der als Sieb fungierende Wäschekorb bot letztendlich die beste Alternative, da so für beide Straßen nur eine Zulaufprobe entnommen werden musste. Die Probe wurde vor Ort zu einem Teil in den Imhofftrichter gefüllt, der andere Teil wurde ins Labor geschickt um den CSB und auch den BSB<sub>5</sub> zu ermitteln. Alle anderen Parameter wurden eine halbe Stunde später aus der abgesetzten Probe ermittelt. Die Proben für die Stickstoffparameter sowie Phosphor wurden filtriert. Für die Filtration wurde ein Pfeifentrichter verwendet.

Für die Ablaufprobe wurden 2 Liter aus dem Ablaufbecken der jeweiligen Reaktoren geschöpft. Beim Ablauf wurde 1 Liter der abgesetzten Probe für die BSB<sub>5</sub> Analyse in eine PET-Flasche gefüllt. Die restlichen Parameter wurden genauso behandelt wie bei der Zulaufprobe. In Tabelle 4-2 sind alle Parameter sowie Ort und Häufigkeit der jeweiligen Probenahme dargestellt.

Tabelle 4-2: Darstellung der Parameter mit Verfahren und Ort der Messung

Parameter	Dimension	Labor	Verfahren	Transport	Häufigkeit
CSB, NH <sub>4</sub> -N, NO <sub>3</sub> -N	mg/l	Kläranlage Enzen	Machery-Nagel Küvettest	0,5 l Kunststoff- flasche	Mo, Mi, Fr
NO <sub>2</sub> -N	mg/l	Kläranlage Enzen	Machery-Nagel Küvettest	0,5 l Kunststoff- flasche	1. Monat: Mo, Mi, Fr 2. Monat: Mo
PO <sub>4</sub> -P	mg/l	Kläranlage Enzen	Machery-Nagel Küvettest	0,5 l Kunststoff- flasche	2. Monat: Mo
BSB <sub>5</sub>	mg/l	ISA Labor	Verdünnungs- methode	1 l bzw. 0,5 l Kunststoffflasche, 3 h	5 mal insgesamt
Temperatur	°C	vor Ort	Messsonde in pH-Sonde		kontinuierlich
pH		vor Ort	Sonde Endress und Hauser		kontinuierlich
O <sub>2</sub>		vor Ort	Sonde Endress und Hauser		kontinuierlich
Absetzbare Stoffe	ml/l	Kläranlage Enzen		Imhofftrichter	Mo, Mi, Fr
Durchfluss Zufluss	l/min	vor Ort	IDM	Zulaufleitung	kontinuierlich
Durchfluss Rezirkulation	l/min	vor Ort	IDM	Rezirkulations- leitung	kontinuierlich

## 4.2.4 Ergebnisse und Diskussion Versuche auf dem Gelände der KA Obergartzem-Enzen (Schwachlastbereich)

### 4.2.4.1 Analyseergebnisse

Die Durchflussmenge wurde über den Zeitraum, wie bereits in Kapitel 3.3 beschrieben, gesteigert. Insgesamt kann der Versuchszeitraum in acht Phasen eingeteilt werden. Die Beschickungsmengen und Zeiträume der einzelnen Phasen sind in Tabelle 4-3 dargestellt.

Tabelle 4-3: Versuchseinstellungen am Standort der KA Obergartzem-Enzen  
Schüttbettfilter (SBF) - Mittelwerte

Phase:	Zeitraum	Durchfluss [m <sup>3</sup> /d]	Rücklaufverhältnis RV
1	20.05.16-01.06.16	3,4	2,1
2	02.06.16-16.06.16	4,6	2,1
3	17.06.16-30.06.16	5,7	1,2
4	01.07.16-08.07.16	6,4	1,2
5	09.07.16-14.07.16	7,75	1,4
6	15.07.16-21.07.16	10,1	1,2
7	22.07.16-02.08.16	10,5	1,6
8	03.08.16-12.08.16	5,31	1,1

#### CSB:

Bild 4-10 und Bild 4-11 stellen den Verlauf der Zulauf- und Ablaufkonzentrationen von CSB bzw. Ammoniumstickstoff über den Versuchszeitraum dar.

Bei den CSB-Konzentrationen sind in Phase 2 starke Schwankungen der Zulaufkonzentrationen zu beobachten. Dies kann mit feststoffhaltigem Abwasser infolge von Starkregenereignissen in Verbindung gebracht werden. Die CSB-Konzentrationen im Zulauf waren sehr gering. Sie lagen im Mittel bei 44,7 mg/l, was am recht weitgehenden CSB-Vorabbau in der Hochlastbelebungsphase lag. Die Konzentrationen der Ablaufwerte verliefen relativ gleichmäßig bis Phase 6. In Phase 6 wurden etwas höhere Ablaufkonzentrationen gemessen.

Die CSB-Ablaufkonzentrationen bewegten sich in Abhängigkeit von der Raumbelastung meist zwischen 20 und 30 mg/l. Beim ersten Starkregenereignis (7.6.) war ebenfalls ein Peak von ca. 60 mg/l bei einer Zulaufkonzentration von 140 mg/l zu beobachten. Beim zweiten Peak wurde der CSB-Peak im Zulauf des Schüttbetfilters aufgefangen.

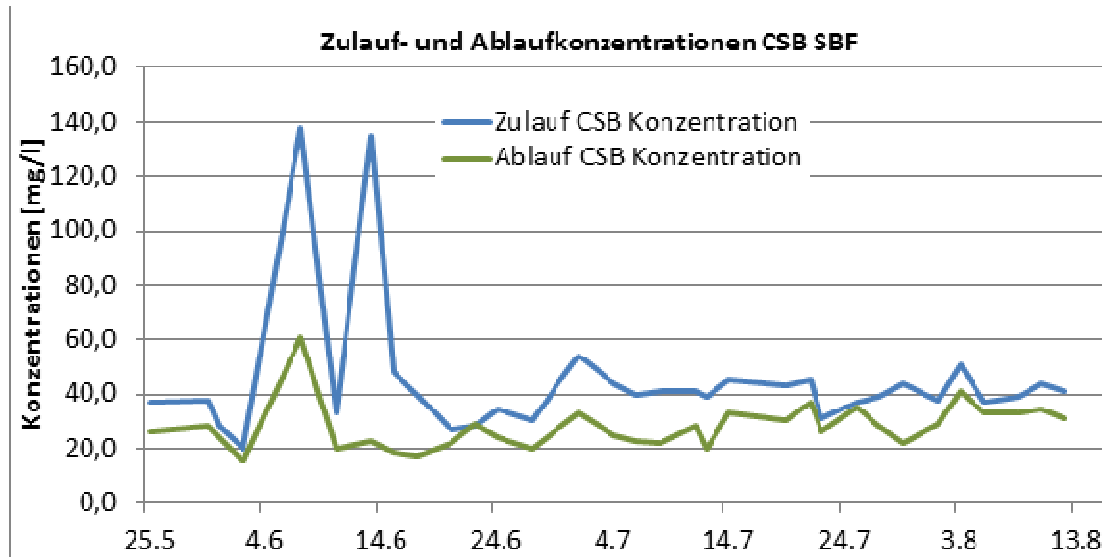


Bild 4-10: Zulauf- und Ablaufkonzentrationen CSB im SBF

In den Wochen, in denen die Raumbelastung allein durch die Erhöhung der hydraulischen Beschickung stark gesteigert wurde (ab Mitte Juli), wurde auch ein leichter Anstieg der CSB-Ablaufkonzentrationen auf 30 bis 40 mg/l beobachtet. Dies war auf die deutlich verkürzte Verweilzeit in der Schüttung und die vervielfachte Raumbelastung mit schon weniger gut abbaubarem CSB aus dem Ablauf der Hochlastbelebung zurückzuführen. Dennoch ist festzuhalten, dass die Überwachungswerte bzgl. CSB bis auf den einen Konzentrationspeak Anfang Juni nicht überschritten bzw. überwiegend weit unterschritten wurden.

### Ammonium:

In Bild 4-11 wird deutlich, dass die Ammoniumzulaufkonzentrationen bereits sehr niedrig waren. Diese lagen i. M. zwischen 8 und 13 mg/l, d.h. z.T. lagen die Ammoniumkonzentrationen im Zulauf des Schüttbetfilters auf dem Niveau der Ablaufkonzentrationen konventioneller Kläranlagen. Dies resultierte aus dem Betrieb der KA Enzen, der mit einer recht hohen Rezirkulation erfolgte sowie den vielen Regentagen im Frühsommer 2016 und den daraus resultierenden Verdünnungseffekten. Zudem erfolgte in der Hochlaststufe eine Teilnitrifikation infolge des Imports von Nitrifikanten aus dem Filterspülabwasser. Auch erfolgte in der Hochlaststufe bereits fast die gesamte Stickstoffinkorporation.

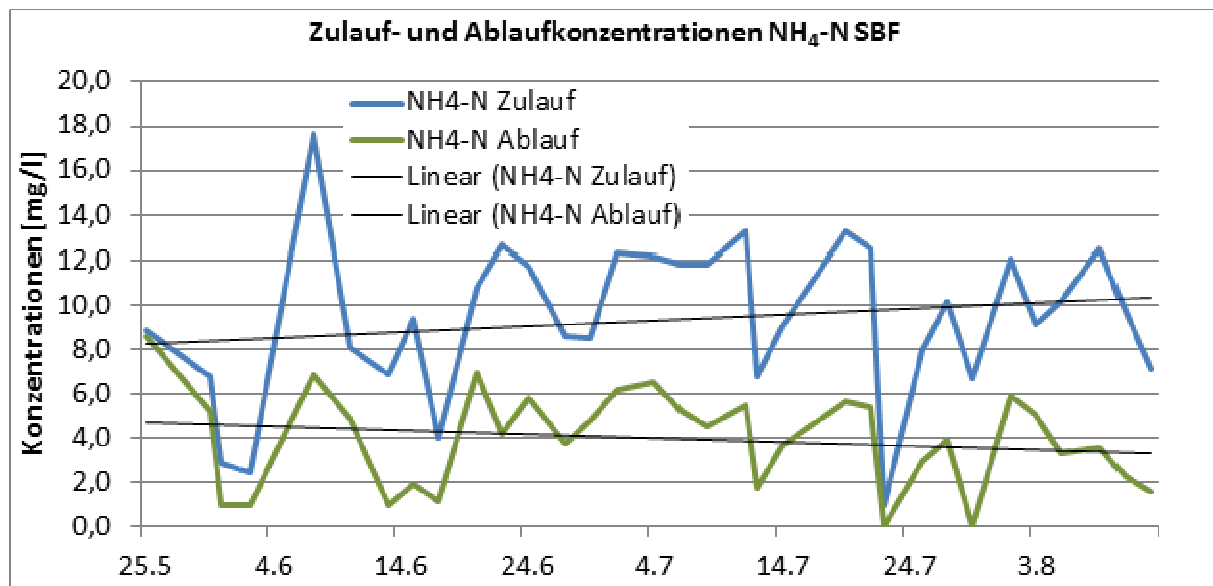


Bild 4-11: Zulauf- und Ablaufkonzentrationen NH<sub>4</sub>-N (Ammoniumstickstoff) im SBF

Es dauerte etwa zwei Wochen, bis sich ausreichend nitrifizierende Bakterien auf dem Trägermaterial angesiedelt hatten (Anfang Juni). In der Schwachlastphase Anfang Juni wurde der Ammoniumpeak infolge Gewitterregen weitgehend aufgefangen, was für eine schon nach zwei Wochen gute Pufferkapazität gegenüber Ammoniumstößen hindeutet. In den folgenden Tagen / Wochen stellte sich trotz stetiger Lastzunahme eine stabile Verminderung der Ammoniumkonzentration um ca. 6 bis 7 mg/l ein. Dabei wurde die hydraulische Flächenbeschickung von anfangs 1,3 m<sup>3</sup>/(h\*m<sup>2</sup>) auf ca. 2,5 m<sup>3</sup>/(h\*m<sup>2</sup>) in der Hochlastphase Ende Juli bei einer Tagesabwassermenge Q<sub>d</sub> von ca. 8 m<sup>3</sup>/d gesteigert.

Kurz nach Inbetriebnahme lagen die Nitrit-Konzentrationen im Ablauf des SBF mit 1 bis 1,4 mg/l noch relativ hoch, was nicht unüblich für eine sich im Aufbau befindliche Nitrifikationsbiologie ist. Nach etwa drei Wochen lagen die Nitrit-Konzentrationen fast immer unter 1 mg/l (Bild 4-12). In Phase 8 wurden jedoch wieder recht hohe Nitritwerte gemessen. Hier kann es aufgrund des nun konzentrierteren Abwassers ggf. zu Beeinflussungen der photometrischen Bestimmung durch die Eigenfärbung des Wassers gekommen sein.

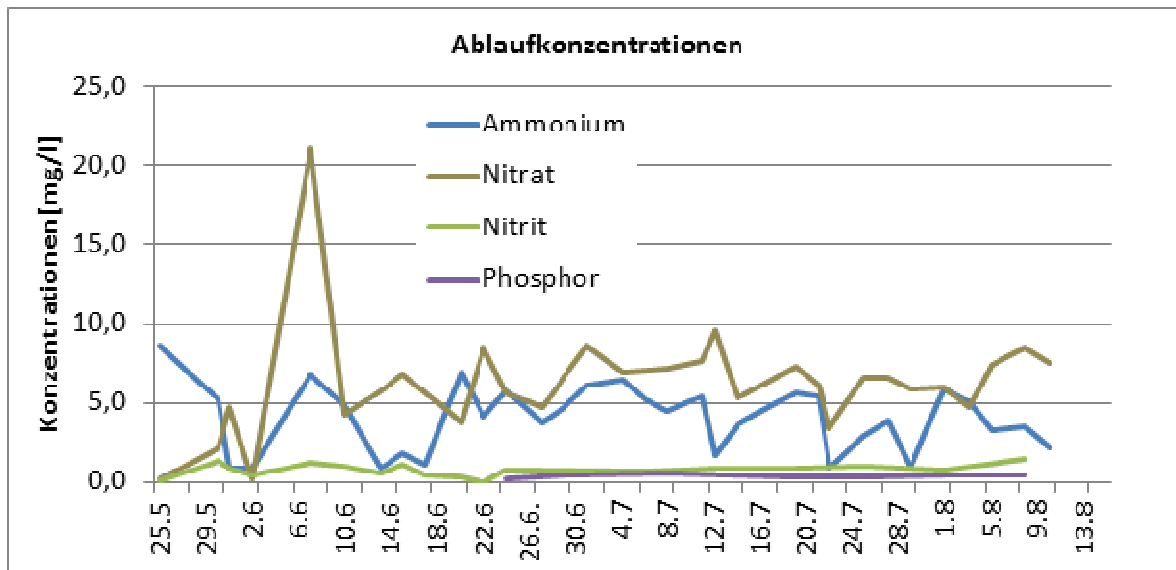


Bild 4-12: Ammoniumzulauf, Nitrat, Nitrit und Phosphor-Ablaufkonzentrationen im SBF

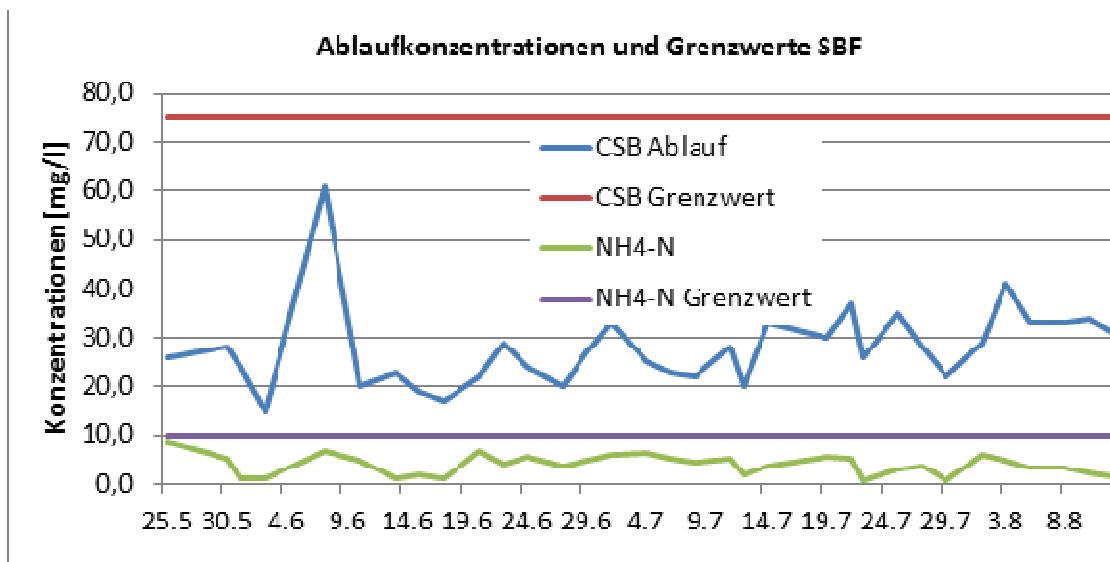


Bild 4-13: Ablaufkonzentrationen und Grenzwerte CSB, NH<sub>4</sub>-N im SBF

Nach DWA/ ATV Arbeitsblatt 281 (2001) liefert bei herkömmlichen Tropfkörpern ein Rücklaufverhältnis von  $RV \leq 1$  eine ausreichende Verdünnung (BSB<sub>5</sub>-Gehalt von 150 mg/l bzw. ca. 300 mg/l CSB am Drehsprenger).

Dennoch konnten in den Versuchen erst bei einem Rücklaufverhältnis von größer eins gute Ergebnisse erreicht werden, bei deutlich geringeren BSB<sub>5</sub>-Konzentrationen. Die in A 281 vorgegebene BSB<sub>5</sub>-CSB-Konzentration bezieht sich nicht auf Nitrifikationstropfkörper und ist somit in der Versuchsanlage deutlich niedriger. Allerdings ist die Schütthöhe des SBF mit ca. 1,4 m nur etwa 1/3 so hoch wie beim klassischen Tropfkörper.

Das Rückpumpen dient nicht nur der Verdünnung, es kann zusätzlich Belastungstöße ausgleichen und der Tropfkörper bzw. hier der Schüttbettfilter ist insgesamt belastbarer. (ATV-Handbuch 1997, S. 136)

Tabelle 4-4 stellt die mittleren Konzentrationen von CSB und  $\text{NH}_4\text{-N}$  über den Beobachtungszeitraum bei verschiedenen Lasten dar. Anhand Tabelle 4-4 in Verbindung mit Bild 4-13 lässt sich erkennen, dass die Ablaufwerte für CSB und  $\text{NH}_4\text{-N}$ , nach der Abwasserverordnung für eine Kläranlage mit der Größenklasse 4, zu jeder Zeit eingehalten wurden. (AbwV, S. 12–13, 1997)

Tabelle 4-4: Mittelwert Ablaufkonzentrationen Schüttbettfilter

Phase:	CSB [mg/l]	$\text{NH}_4\text{-N}$ [mg/l]	$\text{NO}_2\text{-N}$ [mg/l]	$\text{NO}_3\text{-N}$ [mg/l]	$\text{PO}_4\text{-P}$ [mg/l]	$\eta_{\text{CSB}}$	$\eta_{\text{NH}_4\text{-N}}$
1	26	4,9	0,8	2,4		24%	21%
2	27,4	3,1	0,9	7,7		63%	65%
3	26	4,5	0,6	5,9	0,4	31%	52%
4	25,6	5,6	0,7	7,5	0,6	42%	53%
5	27	3,7	0,9	7,5		35%	62%
6	31	3,8	1	5,7	0,4	22%	55%
7	31	3,8	0,95	6	0,45	26%	59%
8	32,8	2,7	1,6	7,3	0,5	18%	73%

Die durchschnittlich geringsten Ammoniumkonzentrationen wurden in Phase 8 erreicht. Dies lässt sich auf die geringere Belastung nach der starken Belastung der vergangenen Monate zurückführen, wo niedrige Zulaufmengen auf einen an höhere Frachten gewöhnten Biofilm trafen. In Phase 2 war der Ammoniumabbau ebenfalls höher, jedoch gab es in diesem Zeitraum viele Regentage, wodurch die Zulaufmenge an Ammoniumstickstoff deutlich geringer war. Schwankungen ergaben sich dadurch, dass einige Phasen öfter beprobt wurden als andere. Standzeiten und Regentage veränderten zusätzlich die Ergebnisse. Nach Regenerereignissen verdünnte das Abwasser und ergab somit geringere Zulaufkonzentrationen. Standzeiten in denen keine durchgehende Beschickung stattfinden konnte, sorgten für schlechtere Werte.

#### 4.2.5 Spezifische Abbauleistungen und Vergleich mit dem klassischen Tropfkörper

Die Referenzstraße arbeitete mit einer deutlich niedrigeren Beschickungsrate, sodass für einen Vergleich der beiden Straßen nur die Raumbelastung und Flächenbelastung in Frage kommen, da sich die Behältergrößen sowie die spezifische Oberfläche der Trägermaterialien voneinander unterscheiden. Die Ablaufkonzentrationen beim Tropfkörper aus der Versuchsanlage waren allerdings besser als die des Schüttbettfilters, letzterer wurde jedoch im Vergleich mit einer 2 bis 5-fach höheren Belastung betrieben. Bilder 4-14 und 4-15 zeigen den Verlauf der Raumbelastung von CSB, Ammoniumstickstoff und Gesamtstickstoff des Schütt-

bettfilters und den Verlauf der Raumbelastung von CSB- und Ammoniumstickstoff des Tropfkörpers. Die Raumbelastung des Schüttbettfilters liegt bei beiden Parametern dauerhaft deutlich über der des Tropfkörpers. Der Schüttbettfilter wurde mit einer Beschickungsmenge von 2 bis 8 l/min und der Tropfkörper mit 0,7 bis 1,7 l/min beschickt.

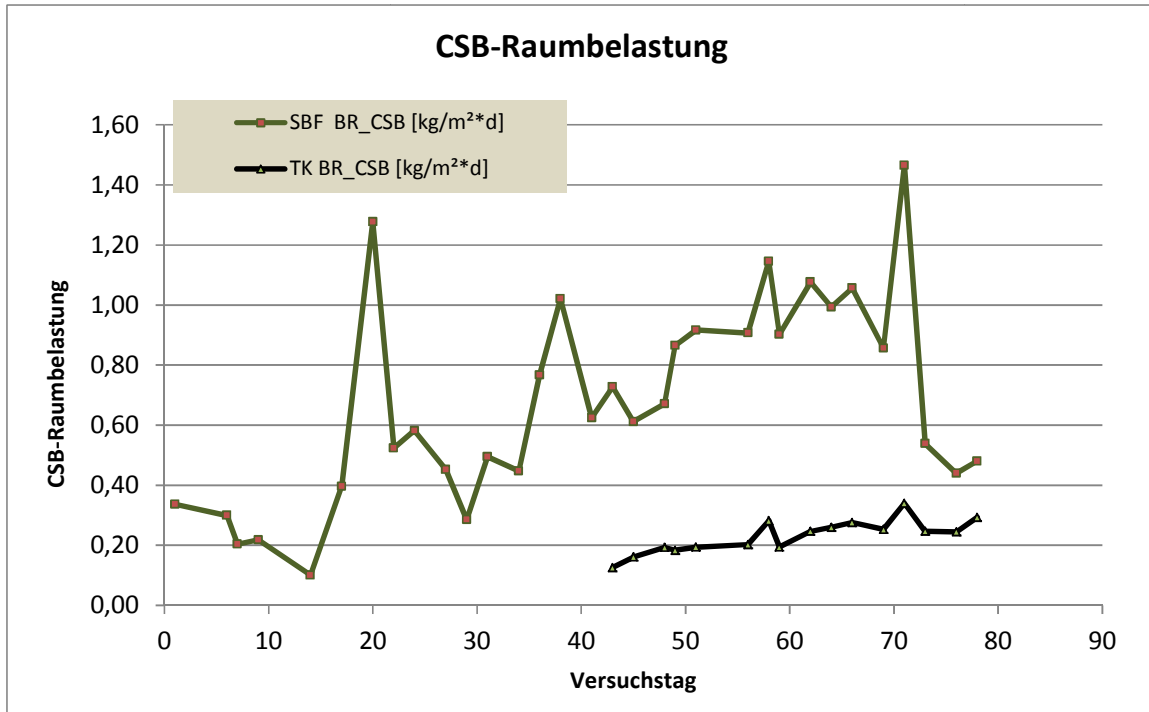


Bild 4-14: Vergleich der CSB-Raumbelastung im TK und im SBF

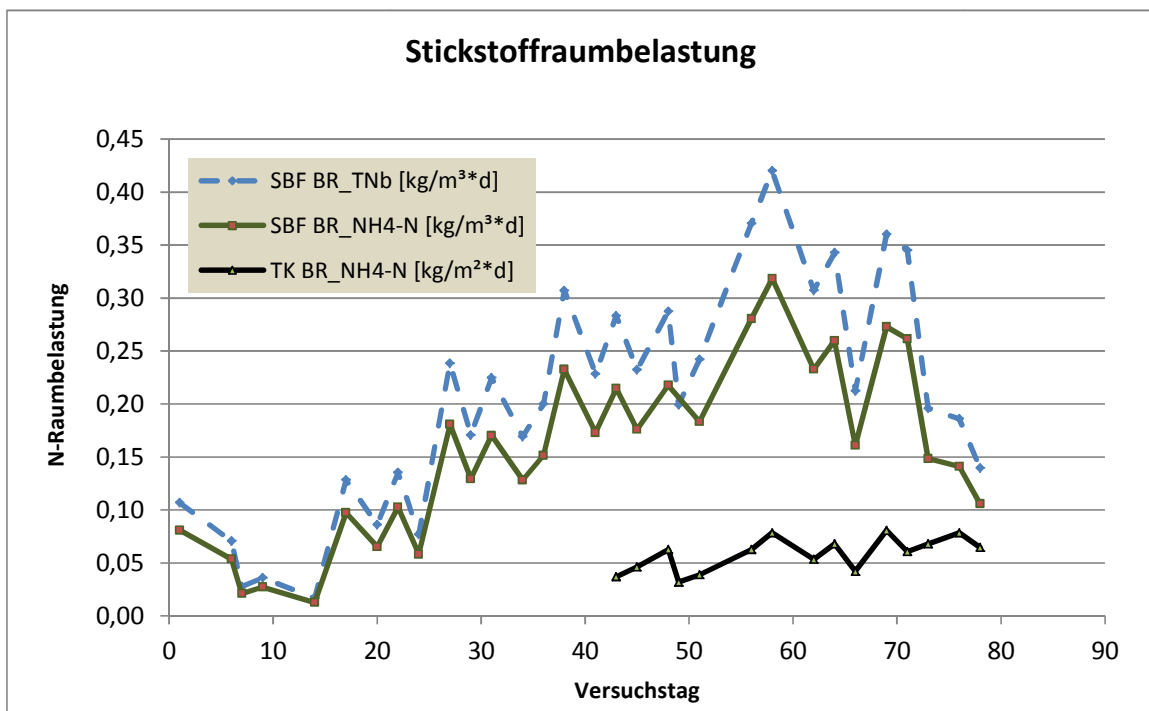


Bild 4-15: Vergleich der TNb- und NH<sub>4</sub>-N-Raumbelastung im TK und im SBF

Das Arbeitsblatt ATV DVWK A281 empfiehlt eine maximale Raumbelastung für BSB<sub>5</sub> und TKN. Die BSB<sub>5</sub>-Raumbelastung soll bei kunststoffgefüllten Tropfkörpern mit einer spezifi-

schen Oberfläche von maximal  $150 \text{ m}^2/\text{m}^3$  bei  $0,4 \text{ kg BSB}_5/(\text{m}^3\cdot\text{d})$  liegen, was ca.  $0,8 \text{ kg CSB}/\text{m}^3$  entspricht. (ATV-DVWK- A 281 2001, S. 14)

Die TKN-Raumbelastung soll bei einem Tropfkörper bei Beschickung mit nicht vorgereinigtem Abwasser im Bereich zwischen  $0,1$  bis  $0,15 \text{ kg}/(\text{m}^3\cdot\text{d})$  bei einer spezifischen Oberfläche von  $150 \text{ m}^2/\text{m}^3$  liegen. Nitrifikationstropfkörper, die nach einer Zwischenklärung beschickt werden wie in der Versuchsanlage, dürfen laut ATV DVWK A281 eine TKN-Raumbelastung von max.  $0,2 \text{ kg}/(\text{m}^3\cdot\text{d})$  bei einer spezifischen Oberfläche von  $200 \text{ m}^2/\text{m}^3$  und ca.  $4$  bis  $5 \text{ m}$  Höhe des Trägermaterials erreichen. (ATV-DVWK- A 281 2001, S. 14)

Im Schüttbettfilter wurden bei höheren Stickstoff-Raumbelastungen gute Ammoniumablaufwerte erreicht (Konzentrationen im Mittel um  $4 \text{ mg/l}$ ). Die Konzentration vom Gesamtstickstoffgehalt im Zulauf wurde in der Versuchsanlage nur wenige Male bestimmt und lag somit deutlich über der  $\text{NH}_4\text{-N}$ -Konzentration. Anhand dieses Verhältnisses konnte die  $\text{N}_{\text{ges}}$ -Raumbelastung für den restlichen Zeitraum abgeschätzt werden. Die  $\text{N}_{\text{ges}}$ -Raumbelastung übersteigt die  $\text{NH}_4\text{-N}$ -Raumbelastung um den gleichen Faktor und ist in **Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden.** als gestrichelte Linie dargestellt.

Die Ammoniumstickstoffraumbelastung überstieg die vorgegebenen Werte von  $0,1$  bis  $0,15 \text{ kg}/(\text{m}^3\cdot\text{d})$ , deutlich. Bei Werten zwischen  $0,2$  und  $0,3 \text{ kg NH}_4\text{-N}/(\text{m}^3\cdot\text{d})$  wurden immer noch gute Ablaufkonzentrationen erreicht. Bezogen auf  $\text{N}_{\text{ges}}$  lagen die Raumbelastungen bei  $0,26$  bis  $0,39 \text{ kg N}_{\text{ges}}/(\text{m}^3\cdot\text{d})$ . Das bedeutet, dass der Schüttbettfilter aufgrund seiner größeren spezifischen Aufwuchsfläche bei im Vergleich zum herkömmlichen Tropfkörper deutlich höheren Stickstoffraumbelastungen sicher nitrifizieren kann.

Eine Aussage über die Abbauleistung einer Anlage kann über den Abbaugrad (s. Formel) oder über die Raumabbauleistung  $\text{dB}_R$  bestimmt werden. Anders als der Abbaugrad ist die Raumabbauleistung abhängig von der Durchflussmenge. Die Raumabbauleistung setzt die Differenz zwischen Zulauf- und Ablauffrachten mit dem Reaktionsvolumen ins Verhältnis und wird mit folgender Formel bestimmt:

$$\text{dB}_R = \frac{B_{d,zu} - B_{d,ab}}{V_{SBF}} \quad [\text{kg}/(\text{m}^3\cdot\text{d})]$$

$\text{dB}_R$  = Raumabbauleistung [ $\text{kg}/(\text{m}^3\cdot\text{d})$ ]

$B_{d,zu}$  = Zulauf fracht [ $\text{kg}/\text{d}$ ]

$B_{d,ab}$  = Ablauf fracht [ $\text{kg}/\text{d}$ ]

$V_{SBF}$  = Schüttvolumen Schüttbettfilter [ $\text{m}^3$ ]



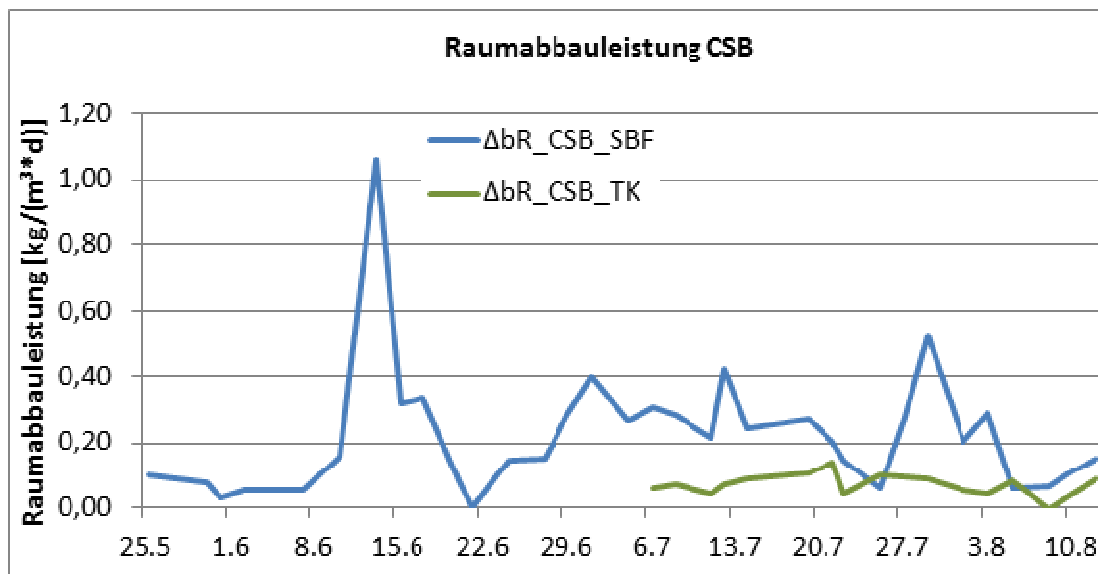


Bild 4-16: Vergleich der CSB-Raumabbauleistung im SBF und TK

Die Raumabbauleistung bezogen auf den CSB lag überwiegend zwischen 0,2 und 0,4 kg/(m³\*d). Der Spitzenwert wurde in Phase 2 erreicht und betrug 1,06 kg/(m³\*d). Zu dieser Zeit war das Zulaufwasser allerdings recht feststoffhaltig.

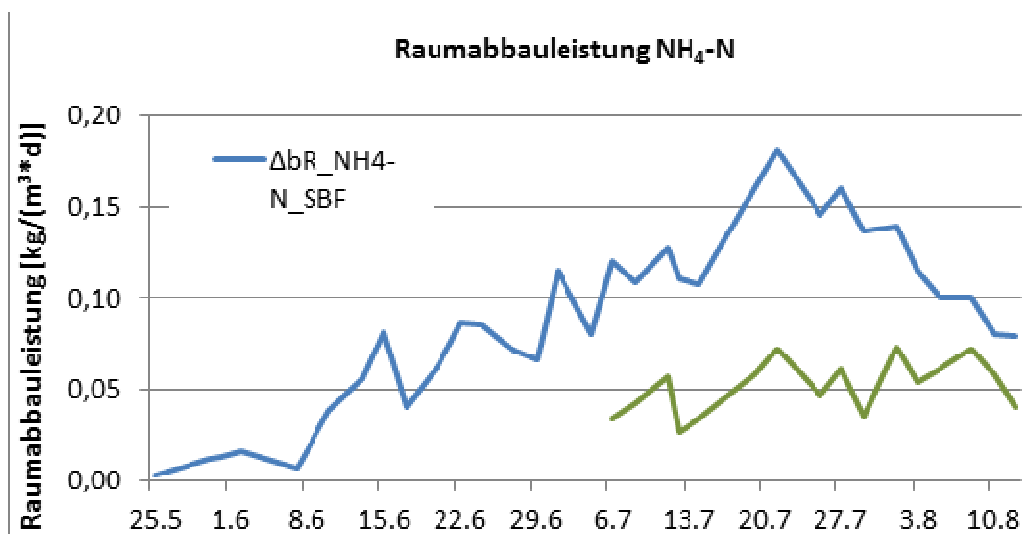


Bild 4-17: Vergleich der Ammonium-Raumabbauleistung im SBF und im TK

Die höchste Raumabbauleistung für NH<sub>4</sub>-N wurde in Phase 6 erreicht und betrug 0,16 kg/(m³\*d). Anhand von Bild 4-17 und Bild 4-18 ist zu erkennen, dass die Raumabbauleistungen für CSB und NH<sub>4</sub>-N des Schüttbetfilters dauerhaft deutlich über der des Tropfkörpers lagen. Ebenso lässt sich eine deutliche Steigerung der Raumabbauleistung im Verlauf der Versuchsphase erkennen, insbesondere für den Parameter NH<sub>4</sub>-N.

Bei den CSB-Werten ist bis Anfang Juli tendenziell eine Steigerung der CSB-Raumabbauleistung zu erkennen, danach eine Abnahme. Das könnte darauf hindeuten, dass der Wirkungsgrad der CSB-Elimination ab Durchflussmengen von über 10 m³/d abnimmt.

Bei Ammoniumstickstoff ist die Steigerung der Raumabbauleistung sehr viel stärker sichtbar, was darauf hindeutet, dass die Abbauleistungen der Belastung bis Ende Juli immer weiter folgen konnten. Die Verringerung der Beschickungsmenge Anfang August führte, aufgrund der geringeren Frachten, zu einer geringeren  $\text{NH}_4\text{-N}$ -Raumbelastung und damit zu einer geringeren  $\text{NH}_4\text{-N}$ -Raumabbauleistung des Schüttbettfilters. Diese blieb jedoch deutlich höher als die des Tropfkörpers.

Weiterhin wurde eine Betrachtung nach der Flächenbelastung vorgenommen. Die spezifische Aufwuchsfläche des Tropfkörpers unterscheidet sich stark von der des Schüttbettfilters. Beim Tropfkörper beträgt diese  $150 \text{ m}^2/\text{m}^3$ . Sehr konservativ gerechnet kann bei einem Schüttbettfilter von einer spezifischen Aufwuchsfläche von mehr als  $400 \text{ m}^2/\text{m}^3$  ausgegangen werden. Dies entspricht einer rd. 2,7-fach höheren spez. Fläche. Aus diesem Grund wurden beim Schüttbettfilter höhere volumenspezifische  $\text{NH}_4\text{-N}$ -Umsatzleistungen erwartet, die wie gezeigt auch bestätigt werden konnten. Diese lagen bezogen auf die  $\text{NH}_4\text{-N}$  Raumbelastung überwiegend doppelt so hoch wie die des Tropfkörpers. Es konnten im Maximum jedoch auch 4-fach höhere volumenbezogenen  $\text{NH}_4\text{-N}$ -Umsatzleistungen ermittelt werden, wie in Bild 4-18 dargestellt ist.

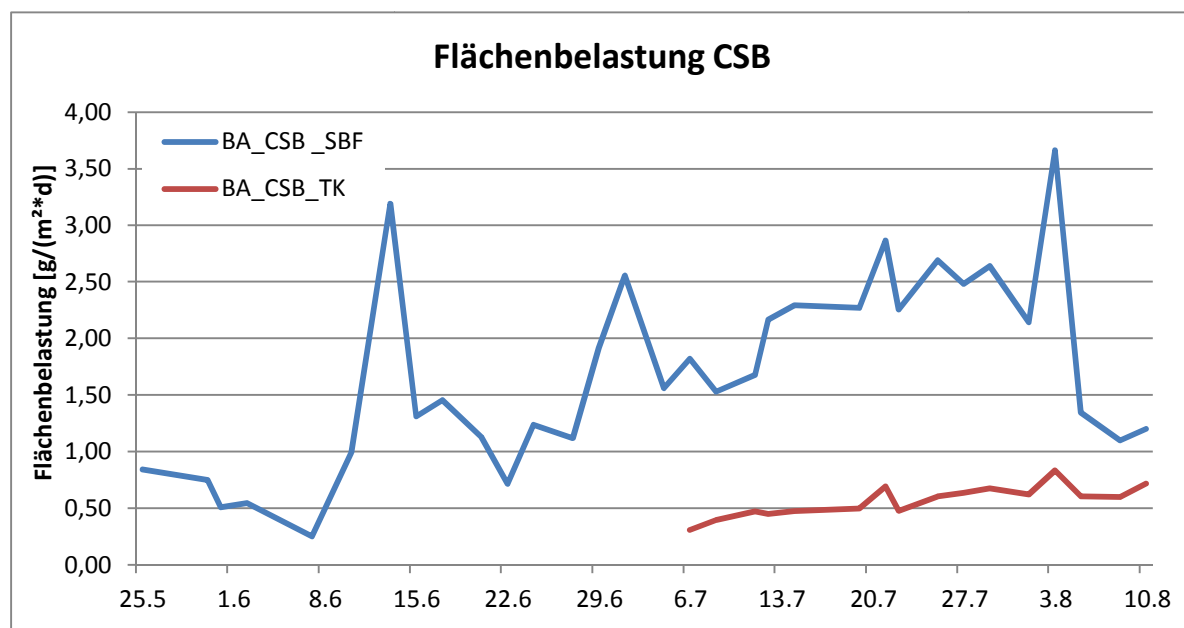


Bild 4-18: Vergleich der CSB-Flächenbelastung im SBF und im TK

Die flächenbezogenen Belastungen bzgl.  $\text{NH}_4\text{-N}$  beim SBF und beim TK verdeutlicht Bild 4-19. Die ermittelten flächenspezifischen  $\text{NH}_4\text{-N}$ -Belastungen von SBF und TK liegen dicht beieinander. Mit etwa  $0,5$  bis  $0,7 \text{ g}/(\text{m}^2\cdot\text{d})$  beim SBF und  $0,3$  bis  $0,5 \text{ g}/(\text{m}^2\cdot\text{d})$  beim TK werden damit Bereiche im unteren bis mittleren Belastungsbereich von Biofilmreaktoren festgestellt.

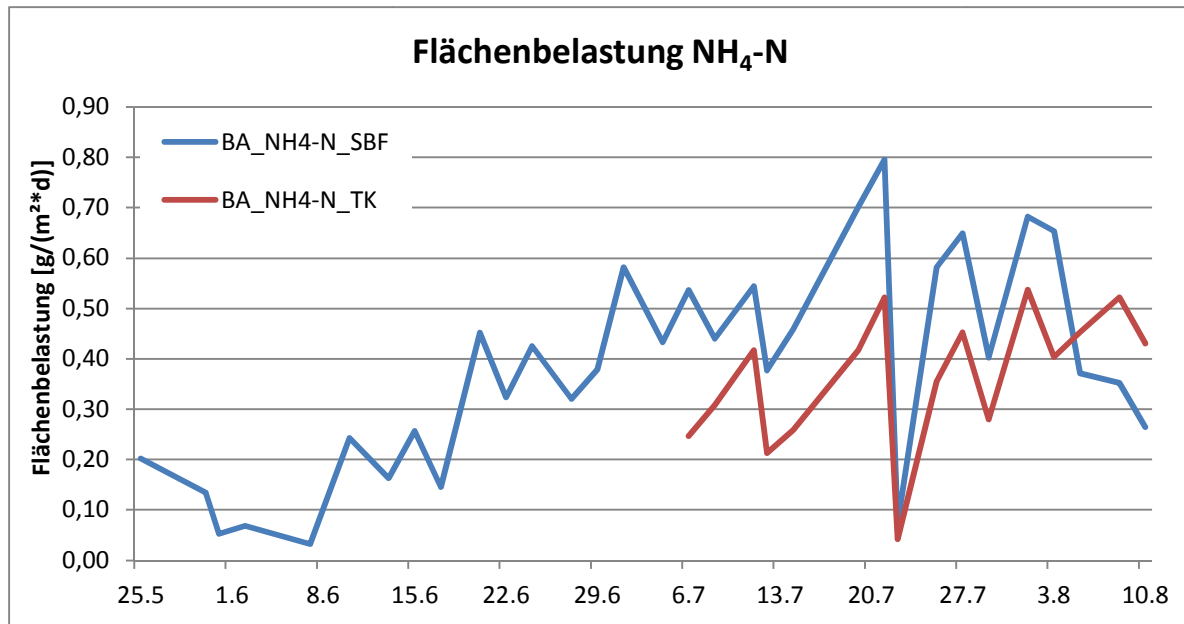


Bild 4-19: Vergleich der NH<sub>4</sub>-N-Flächenbelastung im SBF und im TK

### 4.3 Ableitung von Bemessungsempfehlungen

Basierend auf den Versuchsergebnissen wurden im Folgenden Überlegungen zur Ableitung von Bemessungsempfehlungen angestellt. Dafür wurden orientierend und analog zur Herangehensweise zur Bemessung von anderen Anlagentypen, die 85-%-Perzentile der vorgefundenen Konzentrationswerte (CSB, BSB<sub>5</sub>, NH<sub>4</sub>-N) sowie die 85-%-Perzentile der Belastungsparameter herangezogen.

Tabelle 4-5: Zusammenstellung der 85-Perzentilwerte der Zulaufkonzentrationen zur Versuchsanlage sowie der Belastungsparameter des SBF

85Perzentile gegeben aus Versuchsphase, <b>blaue Werte über Korrelationen gerechnet</b>			
Konzentrationen:		Raumbelastungen:	
C <sub>CSB5zu</sub>	46,1 [mg/l]	BR,CSB	0,28 [kg/(m³d)]
C <sub>BSB5zu</sub>	23,0 [mg/l]	BR,BSB5	0,14 [kg/(m³d)]
C <sub>NH4-N</sub>	12,5 [mg/l]	BR,NH4-N	0,24 [kg/(m³d)]
C <sub>Nges</sub>	16,5 [mg/l]	BR,TKN	0,32 [kg/(m³d)]
Durchfluss:			
Q Anlage	0,43 [m³/h]	RV	1,55
Qrezi	0,67 [m³/h]		

Weiterhin wurde der Schüttbetfilter für eine großtechnische Anlage (orientierend an der Größe der KA-Obergartzem-Enzen) bemessen. Dabei sind zum einen Konzentrationswerte genutzt worden, wie sie bei im Ablauf einer vorgeschalteten Denitrifikation zu erwarten sind. Zum anderen sind Konzentrationswerte genutzt worden, wie sie sich auf der KA Obergartzem Enzen dargestellt haben, dort allerdings unter Berücksichtigung der externen Rezirkulation – d.h. auf der KA Obergartzem-Enzen wird ein Teil des gereinigten Abwassers sowie alle Filterspülabwässer in den Zulauf zur Hochlastbelebung gefördert, wodurch der Zulauf verdünnt und in der Hochlastbelebung der KA Enzen ein Teil des rückgeführten Nitra-

tes denitrifiziert wird. Dies erklärt zu einem Teil die sehr niedrigen Zulaufkonzentrationen zur Versuchsanlage. Als Referenzwert dient ein klassischer Tropfkörper, der mit den Eingangswerten analog des Ablaufes einer vorgeschalteten Denitrifikations-Stufe bemessen wurde (60% CSB/BSB<sub>5</sub>-Elimination vor Erreichen des Schüttbettfilters).

Tabelle 4-6: Hydraulische Kenndaten Hochrechnung

<b>Großtechnische Anlage:</b>		
<b>EW</b>	20.000	E
<b>Qd</b>	6.000	[m <sup>3</sup> /d]
<b>Qt</b>	425	[m <sup>3</sup> /h]
<b>Qmittel</b>	250	[m <sup>3</sup> /h]

Die Ergebnisse der Bemessungsrechnungen fasst die folgenden Tabelle 4-7 zusammen.

Tabelle 4-7: Übersicht und Vergleich der Bemessungsergebnisse

Großtechnische Anlage SBF			SBF m. Werten Abl. HL Enzen		TK klassisch	
<b>Qd</b>		6.000 m <sup>3</sup> /d	100% Rezi	12.000 m <sup>3</sup> /d		6.000 m <sup>3</sup> /d
<b>Frachten:</b>	<b>Bd,CSB nach Vorreinig. 60%</b>	960 kg/d		553 kg/d		960 kg/d
	<b>Bd,BSB5 nach Vorrein. 60%</b>	480 kg/d		147 kg/d		480 kg/d
	<b>Bd,NH4-N nach Vorr. 15%</b>	170 kg/d		150 kg/d		170 kg/d
	<b>Bd,TKN nach Vorrein. 20%</b>	176 kg/d		198 kg/d		176 kg/d
<b>Volumen über CSB*:</b>	<b>V_SBF, CSB</b>	1.200 m <sup>3</sup>	<b>V_SBF, CSB*</b>	691 m <sup>3</sup>	<b>V_TK, CSB**</b>	2.400 m <sup>3</sup>
<b>Volumen über BSB5*:</b>	<b>V_SBF, BSB5</b>	1.200 m <sup>3</sup>	<b>V_SBF, BSB5***</b>	737 m <sup>3</sup>	<b>V_TK, BSB5**</b>	2.400 m <sup>3</sup>
<b>Volumen über NH4-N:</b>	<b>V über NH4-N:</b>	702 m <sup>3</sup>	<b>V über NH4-N:</b>	619 m <sup>3</sup>	<b>V über NH4-N:</b>	2.450 m <sup>3</sup>
<b>Volumen über TKN:</b>	<b>V über TKN:</b>	550 m <sup>3</sup>	<b>V über TKN:</b>	619 m <sup>3</sup>		
<b>Rezirkulationsverhältnis:</b>	<b>RV_SBF</b>	1,6	<b>RV_SBF</b>	1,6	<b>RV</b>	1,0
<b>Gesamtvolumenstrom</b>	<b>Q SBF</b>	1.083 m <sup>3</sup> /h	<b>Q SBF</b>	1.300 m <sup>3</sup> /h	<b>Q</b>	1.083 m <sup>3</sup> /h
<b>Höhe:</b>	<b>h SBF</b>	1,5 m	<b>h SBF</b>	1,5 m	<b>h TK</b>	4,0 m
<b>Grundfläche:</b>	<b>A SBF</b>	468 m <sup>2</sup>	<b>A SBF</b>	413 m <sup>2</sup>	<b>A TK</b>	613 m <sup>2</sup>
<b>Durchmesser</b>	D<40	24,4 m	D<40	22,9 m	D<40	27,9 m
<b>Oberflächenbeschickung:</b>	<b>qA,SBF</b>	2,3 m/h	<b>qA,SBF</b>	3,1 m/h	<b>qA, TK</b>	1,8 m/h
* bei TK mit Kunststofffüllung BR BSB5 = 0,4 zulässig, bezogen auf CSB BR = 0,8						
** bei TK mit Brockenfüllung BR BSB5 = 0,2 zulässig, bezogen auf CSB BR = 0,4						
***Ansatz Korrelation aus Versuchen						

Tabelle 4-7 verdeutlicht, dass für die Nitrifikation unter den getroffenen Annahmen ein Schüttbettfilervolumen von ca. 600 bis 700 m<sup>3</sup> notwendig ist. Im Gegensatz dazu müsste ein klassischer Tropfkörper etwa 2.450 m<sup>3</sup> Reaktorvolumen haben, d.h. es liegt etwa der Faktor 3,5 bis 4 zwischen beiden Reaktortypen. Allerdings hat die organische Fracht im Zulauf erheblichen Einfluss auf das Bemessungsergebnis. Wird dabei mit klassischen Annahmen gerechnet bzw. ist die Vorreinigung nicht weitgehend, wird der Schüttbettfilter deutlich größer im Vergleich zu einer Bemessung mit Fokus auf der Nitrifikation, bei der andere Parameter weitestgehend außer Acht gelassen werden.

Bemerkenswert ist, dass die Bauhöhe bzw. die Höhe des Trägermaterials des SBF nur etwa ein Drittel eines klassischen TK beträgt. Hier sollten jedoch noch weitere Untersuchungen erfolgen, um a) bei höheren NH<sub>4</sub>-N-Zulaufkonzentrationen und b) um ein optimales Verhältnis von Durchmesser zu Schütthöhe zu ermitteln. Sollte sich die niedrige notwendige Gesamthöhe bestätigen, wäre damit ein wesentlicher (energetischer) Vorteil aufgrund geringerer und unter Aufwendung von Pumpenergie zu überwindender Höhen gegeben.

## 4.4 Untersuchungen am Standort Papierfabrik (Hochlastbetrieb)

### 4.4.1 Untersuchungsstandort Hochlastphase

Für die Untersuchung der Kohlenstoffelimination hoch belasteter Industrieabwasser wurde der Standort einer Papierfabrik bei Zülpich im Kreis Euskirchen gewählt.

Die Papierfabrik stellt Wellpappe aus Altpapier her. Die Anlage bedient sich unter anderem eines Wasservorrates, um das Altpapier für diesen Vorgang wieder aufzubereiten. Ein Großteil des Produktionswassers wird in einer eigenen Kreislaufwasser-Aufbereitungsanlage gereinigt und für die Papierproduktion erneut eingesetzt.

Die Kreislaufwasserbehandlungsanlage behandelt Prozesswasser mit einem Durchsatz von ca. 55 m<sup>3</sup>/h, wovon nur wenige m<sup>3</sup>/d dem Kreislauf nicht wieder beigefügt werden. Die CSB-Konzentration liegt im Zulauf zwischen 3.000 und 8.000 mg/l und wird im kombinierten anaerob-aeroben Reinigungsprozess um ca. 90% vermindert.

Das in den Anaerobreaktoren gewonnene Biogas wird in letzter Instanz in einem Abhitzeessel zur Dampferzeugung verwertet.

Das Prozesswasser besitzt über den gesamten Reinigungsprozess eine relativ hohe Temperatur bzw. erfährt nur in der 2. Belebungsstufe eine signifikante Abkühlung. Auch bei kalter Witterung und Niederschlag erfolgt dort ein nennenswerter Temperaturabfall lediglich dadurch, da sie als einzige Reinigungsstufe nicht abgedeckt ist.

Eine Entkalkungsstufe nach der Anaerobstufe soll das Prozesswasser von den hohen Kalkaufkommen befreien.

### 4.4.2 Inbetriebnahme und Besonderheiten

Im Gegensatz zur Versuchsphase auf der KA Enzen lagen die Konzentrationen der absetzbaren Stoffe in einem Bereich, der ohne vorherige Absetzstufe viel zu hoch war für die Beschickung/Betrieb von Biofilmreaktoren. Deshalb wurde das vorhandene Nachklärbecken als Vorklärbecken (VKB) umfunktioniert und das Abwasser über eine Tauchpumpe von der Kreislaufwasserbehandlungsanlage zunächst in das VKB und von dort in den vorhandenen Vorlagebehälter gefördert. Hier wurde durchgehend der pH-Wert und die Temperatur über eine Messelektrode bestimmt. Vom Vorlagebehälter erfolgte die Beschickung des SBF mit einer weiteren Pumpe analog zur Schwachlastphase.

Die Versuchsanlage wurde zunächst mit dem Ablauf der Zwischenklärung beschickt, der jedoch nur noch sehr geringe Anteile mit leicht abbaubarem CSB aufwies. Deshalb wurde recht bald auf den Ablauf der Entkalkung umgestellt.

Das der Kalkabscheidung entnommene, zu behandelnde Abwasser durchlief zuerst das o.g. trichterförmige Absetzbecken und dann in den Vorlagebehälter. Sedimentierter Schlamm wurde über ein Magnetventil aus diesem abgelassen.

Ende September konnte die Versuchsanlage in Betrieb genommen werden. Aus der vorangegangenen Schwachlastphase waren bereits einige Probleme in der elektronischen Steuerung bekannt, die jedoch nicht dauerhaft behoben werden konnten.

Unter dem programmtechnisch vorgesehenen Automatikbetrieb sollten alle Pumpen automatisch arbeiten und bei Überschreitung oder Unterschreitung der Grenzwerte an den Füllstandmesseinrichtungen den Betrieb einstellen. Dieser Betriebsmodus war nicht nutzbar, so dass die Anlage wiederum weitestgehend im Handbetrieb gefahren werden musste.

Ein weiteres Problem zeigte sich in den relativ häufigen, aber zufällig auftretenden Neustarts der Anlage, da sich die Steuerung (SPS) in diesem Fall in den bereits als fehlerhaft bestätigten Automatikbetrieb zurücksetzte. Diese wurden auch nach dem Einsatz der unterbrechungsfreien Stromversorgung weiterhin verzeichnet, was eindeutig auf Defizite in der Funktionsweise der SPS schließen lässt.

Infolge der Neustarts wurde die P2 (Zulaufpumpe zur Sedimentation) abgeschaltet und die P0 (Reaktorbeschickungspumpe) konnte somit nach Neustart nur noch den verbleibenden Rest an Wasser aus der Vorlage in den Reaktor geben, bis zuletzt nur noch die Rezirkulation in Betrieb war bzw. manuell Abhilfe geschaffen wurde.

Aufgrund des nicht möglichen Automatikbetriebes war ein selbsttätiges Ablassen des Schlammes aus der Vorklärung nicht möglich. Infolgedessen wurde die Wirkung der Vorklärung bei unterbrechungsfreiem Betrieb oftmals wegen einer Überfüllung dieser mit sedimentiertem Schlamm reduziert. Die Vorklärung musste daher regelmäßig durch manuelles Öffnen des Magnetventils geleert werden, was sich bedingt durch die hohe Viskosität des konzentrierten Schlammes, als zeitaufwändiger Arbeitsschritt herausstellte.

Eine weitere Schwachstelle bot sich in der Zulaufleitung von P2 über die Schläuche in die Vorklärung. Ausfälle in der Steuerung unterbrachen den Strom von warmem Wasser aus der Vorklärung, und in ihnen stehendes Wasser gefror bei Temperaturen unter 0 °C.

Um die Auswirkungen dieser Ausfälle so gut als möglich zu minimieren, wurde eine Überwachung der Anlage per Smartphone und dazugehöriger Mobile Webcam-App im Container installiert.

In der Inbetriebnahmephase wurde das zu reinigende Wasser der schwächer belasteten Zwischenklärung entnommen und die Vorklärstufe der Versuchsanordnung war noch nicht zwischen Vorlage und Zulaufpumpe geschaltet. Reaktorspülungen wurden zu diesem Zeitpunkt einmal wöchentlich durchgeführt.

Nach Umstellung auf den Ablauf der Kalkabscheidung war jedoch erkennbar, dass sich der Handrotor beim Spülvorgang deutlich schwerer bewegen ließ. Auskristallisierungen auf dem Trägermaterial der obersten Schicht ließen darauf schließen, dass sich der Reaktor neben etwaigem Biomassebewuchs und anhaftendem Feststoffanteil im Abwasser mit Kalk belegte. Auch tendierte das Trägermaterial hier zum Verbacken. Spülungen wurden daher während der Versuchsphase zwei bis dreimal wöchentlich durchgeführt.

#### 4.4.3 Ergebnisse und Diskussion Hochlastsystem

Die folgende Grafik charakterisiert die Zulaufabwassermengen zur Versuchsanlage. Aufgrund der sehr hohen CSB-Konzentrationen im Ablauf der Entkalkung musste die Zulaufwassermenge im Vergleich zur Schwachlastphase radikal vermindert werden (Bild 4-22). Der Rezirkulationsvolumenstrom wurde jedoch auf dem Level der Schwachlastversuche gehalten, um eine ausreichende Benetzung und Spülung des SBF zu erreichen.

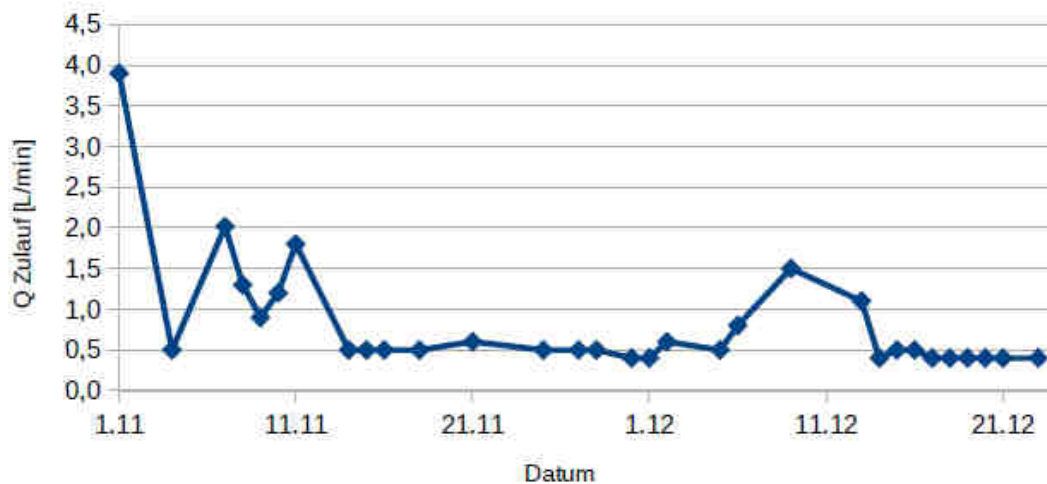


Bild 4-20: Volumenströme im Zulauf zum SBF (Hochlastphase)

Wenn die Verläufe der CSB-Konzentrationen betrachtet werden, werden diese recht stark von den abfiltrierbaren Stoffen beeinflusst, welche in das System trotz Vorklärung eingetragen werden bzw. hindurch gespült werden. Im Bild 4-22 wird daher der filtrierte CSB dargestellt. Es wird sichtbar, dass im Reaktor nur ein recht geringer Teil des gelösten CSB biochemisch umgesetzt wird. Dies lag sicher zum einen am Sauerstoffmangel, im Ablauf des SBF wurden bis zur dauerhaften Inbetriebnahme des Lüfters Sauerstoffkonzentrationen nahe 0 gemessen (Bild 4-23). D.h. der Sauerstoffeintrag allein durch Diffusion und den Naturzug durch das  $\Delta T$  war zu gering, um den tatsächlichen Sauerstoffbedarf zu decken.

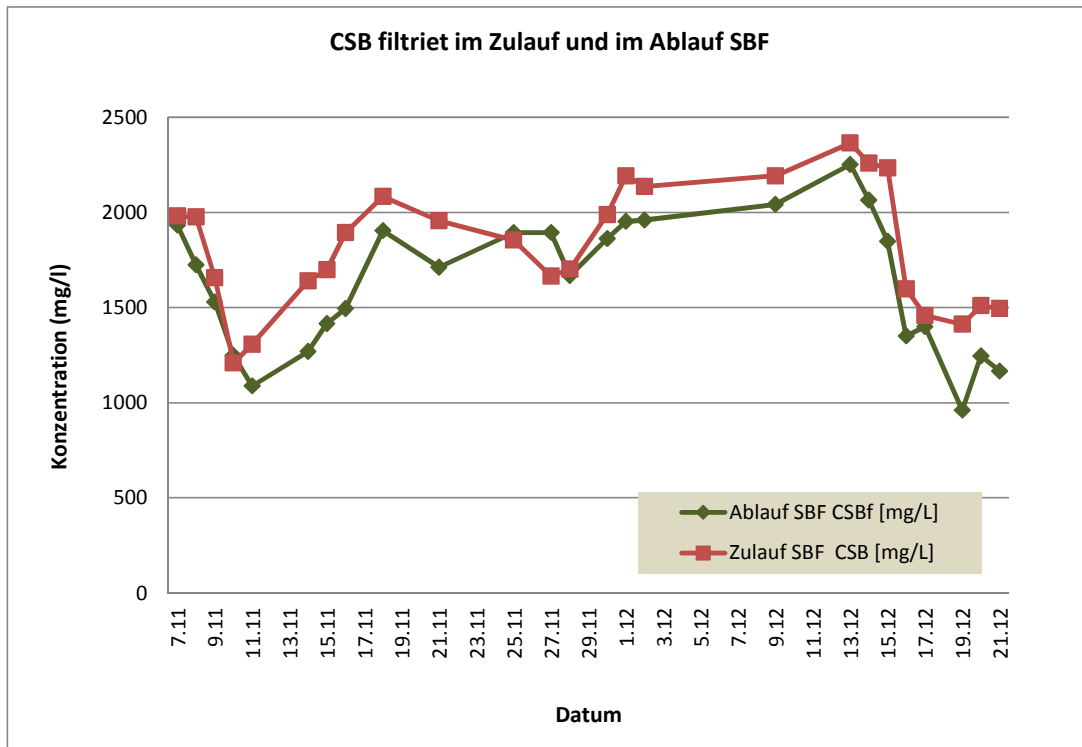


Bild 4-21: CSB<sub>filtriert</sub>-Konzentrationen im Zulauf und im Ablauf zum SBF (Hochlastphase)



Bild 4-22: O<sub>2</sub>-Konzentrationen im Ablauf des SBF (Hochlastphase)

Für die Hochlastphase wurde ebenfalls näherungsweise eine Korrelation der Raumabbauleistung von der Raumbelastung ermittelt (Bild 4-23). Es wird zunächst deutlich, dass z.T. sehr hohe Raumbelastungen ungewollt durch hohe Zulaufkonzentrationen im SBF vorlagen. Im Vertrauensbereich zwischen 2 und 6 kg CSB/(m<sup>3</sup>\*d) kann für die störungsfreien Betriebstage eine gute Korrelation ermittelt werden. Es zeigt sich aber auch, dass die möglichen Raumabbauleistungen weitaus unterhalb der erwarteten Werte liegen. Die Ursachen sind zum einen in der recht schwierigen Abbaubarkeit des Abwassers zu sehen, es lag ein hoher



Inertanteil von einigen 100 mg/l vor, aber auch in der geringen Kontaktzeit im SBF von nur wenigen Minuten sowie dem Sauerstoffmangel im Versuchszeitraum bis Ende November. Sauerstoffmangel trat ein durch die hohe Zehrungsrate im SBF und die nicht ausreichende Belüftung des Schüttbetfilters durch den eingebauten kleinen Lüfter. Die kleinteilige Schüttung mit vermehrtem Biomasseaufwuchs stellte einen unerwartet großen Widerstand der sich sonst natürlich einstellenden Durchströmung entgegen.

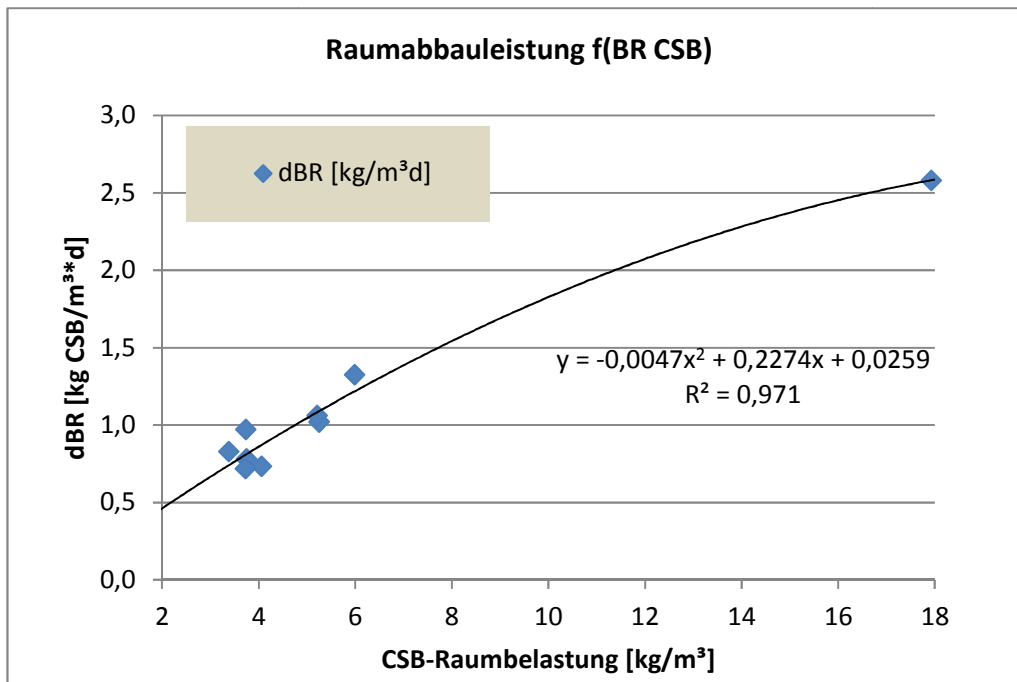


Bild 4-23: CSB-Raumabbauleistung im SBF in Abhängigkeit von der Raumbelastung

## 5 Wirtschaftlichkeitsbetrachtung

Die Überlegungen zur Wirtschaftlichkeitsbetrachtungen basieren auf der Anwendung für den Betrieb zur Nitrifikation nach gutem CSB-/BSB<sub>5</sub>-Abbau. Es wurde zunächst das Thema Energie betrachtet und die Energieverbräuche für den SBF und einen klassischen Tropfkörper als Referenzgröße aufgelistet (Tab. 5-1). Unter den recht realitätsnahen Annahmen (H = 1,5 + 1,5 m) ist sichtbar, dass der Stromverbrauch für Beschickung und Rezirkulation beim Schüttbettfilter mit rund 2 kWh/(E\*a) sehr gering ist und nochmals unter dem eines schon sehr günstigen Tropfkörpers (günstige Annahme: H = 5,5 m) liegt.

Tabelle 5-1: Ergebnisse der Bemessungsrechnungen und Vergleich

Großtechnische Anlage SBF			TK klassisch	
	hges	3,0 m		5,5 m
ηPumpe*ηMotor	Zulauf	0,5		0,5
	Rezi	0,5		0,5
Energieverbrauch Zulauf	Ezu	1,8 kW		3,2 kW
		15.505 kWh/a		28.426 kWh/a
Energieverbrauch Rezi	Erezi	2,7 kW		3,2 kW
		24.033 kWh/a		28.426 kWh/a
Energieverbrauch gesamt	Eges	<b>39.538 kWh/a</b>		<b>56.852 kWh/a</b>
Energieverbrauch spezif.	Espez	2 kWh/E*a		3 kWh/E*a
Energiekosten:		18 Ct/kWh		18 Ct/kWh
		7.117 €/a		10.233 €/a
E-Kosten pro EW		0,36 €/E*a		0,51 €/E*a

Mit Blick auf die Investitionskosten kann der Schüttbettfilter damit punkten, dass dessen Bauvolumen bis um etwa 2/3 unter dem eines klassischen Tropfkörpers liegt. Damit verbunden ist auch ein in ähnlicher Größenordnung geringeres Trägermaterialvolumen. Allerdings ist für das kleinteilige Trägermaterial ein deutlich höherer Marktpreis im Vergleich zu konventionellen strukturierten Packungen aus Kunststoff und im Vergleich zu Lava-Brocken zu erwarten.

Die um den Faktor 2 bis ca. 3 höheren möglichen NH<sub>4</sub>-N bzw. TKN-Raubelastungen des SBF im Vergleich zum klassischen Tropfkörper würden auch ein flächensparendes Bauen ermöglichen und den SBF z.B. als Ersatz für nur teilausgelastete nitrifizierende Raumfilter als eine denkbare Option erscheinen lassen.

## **6 Optimierungspotenziale und Schlussfolgerungen bzgl. Verfahrenstechnik**

Für den Anlagenbetrieb ist eine robuste und funktionssichere Automatisierung mit einer brauchbaren Handbedienebene notwendig. Die Defizite während des Versuchsbetriebs konnten auch durch hohen personellen Aufwand nicht aufgehoben werden. Hier muss die Elektrotechnik ggf. auch anwenderfreundlicher und wartungsfreundlicher konstruiert, gebaut und programmiert werden.

### **6.1 Betrieb als Nitrifikationsreaktor**

Beim Betrieb als Nitrifikationsreaktor konnten die erwarteten Vorteile weitgehend versuchs-technisch nachgewiesen werden. Die raumbezogene Nitrifikationsleistung liegt um den Faktor 2 bis 3 über der des klassischen Tropfkörpers bei nur einem Drittel der Bauhöhe und damit nur etwa 1/3 des Reaktorvolumens. Damit liegt der Energiebedarf trotz etwas höherer Rezirkulationsrate nochmals deutlich unter dem eines klassischen Tropfkörpers. Der SBF bietet daher eine interessante Alternative zu diesem.

Folgende Ansätze zur Optimierung als Nitrifikationsreaktor werden gesehen:

- Ggf. Betrieb mit höherer Rezirkulationsrate bei flachen Reaktoren
- Optimierte Reaktorbeschickung

Die Integration des Schüttbettfilters in ein Gesamtsystem ist als nitrifizierende Stufe hinter einer anoxischen Stufe (MBBR oder Schlammssystem mit Zwischenklärung) möglich. Die P-Elimination muss dann in der anoxischen Stufe erfolgen (Bio-P und /oder chem. Fällung)

### **6.2 Betrieb als Hochlastreaktor**

Die Betriebsweise als Hochlastreaktor bereitete die meisten Probleme. Dennoch werden Ansätze zur Optimierung als Hochlastreaktor gesehen. So muss unbedingt auf eine gute Feststoffabscheidung im Vorfeld geachtet werden. Die notwendigen Raumumsatzleistungen sind nur zu schaffen, wenn über einen Ventilator zusätzlich Sauerstoff in die unteren Bereiche der Schüttung eingetragen wird. Die erwartete Leistungsfähigkeit des Systems bei optimalen Bedingungen im Hochlastbereich konnte noch nicht nachgewiesen werden. Für eine optimale Ausnutzung der möglichen volumenspezifischen Abbauleistung ist die generelle gute Abbaubarkeit des im Abwasser enthaltenen CSB eine wesentliche Voraussetzung. Der Austrag der überschüssigen Biomasse muss im Vergleich zum Betrieb als Nitrifikationsreaktor in weitaus kürzeren Abständen erfolgen. Die Spültechnik ist für beide Anwendungsfälle noch zu optimieren und die denkbaren Ansätze müssen praktisch erprobt werden.

## 7 Literaturverzeichnis

Al Jiroudi, Dania (2015): Vor-Ort-Vergleich von technischen und naturnahen Kleinkläranlagen bei gleichen Untersuchungsbedingungen. Dissertation. Universität Rostock, Rostock. Institut für Umweltingenieurwesen.

ATV-DVWK- A 281 (2001): Bemessung von Tropfkörpern und Rotationstauchkörpern. September 2001. Hennef: GFA-Gesellschaft zur Förderung der Abwassertechnik (ATV-DVWK-Regelwerk Arbeitsblatt, A 281), zuletzt geprüft am 12.07.2016.

ATV-Handbuch (Hg.) (1997): Biologische und weitgehende Abwasserreinigung. Abwassertechnische Vereinigung. 4. Aufl. Berlin: Ernst & Sohn.

Bever, Jürgen (Hg.) (2002): Weitergehende Abwasserreinigung. 4. Aufl. München: Oldenbourg Industrieverl.

Erftverband (2006): Gruppenklärwerk Obergartzem-Enzen. Hg. v. Erftverband.

EvU-Innovative Umwelttechnik GmbH: EvU-Pearl. Online verfügbar unter <http://www.evugruppe.de/de/pearl/funktionen.html>, zuletzt geprüft am 05.07.2016.

Gujer (Bild S.5)

Haldenwang, Lutz; Aerobe Behandlung von hochbelasteten Abwässern mit niedrigem Energieaufwand - Erprobung des Rieselstromreaktors (1997), Schlussbericht zum gleichnamigen DBU-Vorhaben, (FKZ 06849)

Holle, Bernward; Zwischenklärung / Tropfkörper Kläranlage Straubing, Info-Material des Ingenieurbüro Atemis Aachen, (1999)

Jardin, Norbert; Kruse, Klaus; Anwendung der Denitrifikation nach Tropfkörpern auf der KA Arnsberg, Innovationsworkshop Ruhrverband 2006

MACHEREY-NAGEL GmbH & Co. KG (2015): NANOCOLOR® CSB 160, zuletzt geprüft am 23.06.2016.

Mudrak&Kunst; Biologie der Abwasserreinigung, Springer- Verlag (2010), (ISBN 978-3-8274-2576-8)

(Orth und Lange 2010, S. 35) (aus Noras BA, Bild S.6)

Pressinotti, Fabio Chui (2008): Kläranlagen für warme Klimazonen.

Riße, Henry; Koch, Tino: Zusammenfassung der Versuche auf der Tropfkörperanlage Hubbelrath- Sauerweg des Bergisch-Reinischen Wasserverbandes (BRW), 2016.

Schrader, C. (2007): Verfahrenstechnische Möglichkeiten zur Entfernung von organischen Spurenstoffen aus kommunalem Abwasser: Oldenbourg Industrieverl. Online verfügbar unter <https://books.google.de/books?id=BMBD0D9qH58C>.

AbwV (21.03.1997): Verordnung über Anforderungen an das Einleiten von Abwasser in Gewässer, S. 1–93, zuletzt geprüft am 02.08.2016.

Wasser Wissen (2009a): absetzbare Stoffe. Online verfügbar unter <http://www.wasserwissen.de/abwasserlexikon/a/absetzbarestoffe.htm>, zuletzt aktualisiert am 17.08.2009, zuletzt geprüft am 13.08.2016.

Wasser Wissen (2009b): Trockensubstanzgehalt, Trockenmassegehalt (TSR). Online verfügbar unter <http://www.wasser-wissen.de/abwasserlexikon/t/trockensubstanzgehalt.htm>, zuletzt aktualisiert am 18.08.2009, zuletzt geprüft am 13.08.2016.

Lerner, N.: Untersuchungen eines Schüttbettfilters im Einsatz zur Nachbehandlung von bereits biologisch vorgereinigtem Abwasser, Bachelorarbeit am Institut für Siedlungswasserwirtschaft der RWTH Aachen, 2016

## 8 Anhang Bilddokumentation

### Reaktoren



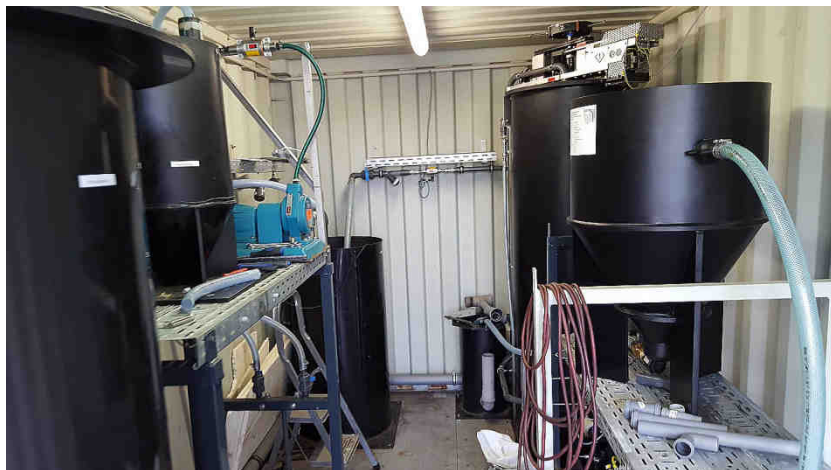
### SBF im Roh- und Ausbau



### Nachklärung & Zwischenbehälter



Aufbau 1. Versuchsstandort



Umsetzung 2. Versuchsstandort



Untersuchungen



*SBF im Betrieb*



*Beprobung & Meßtechnik im Einsatz*