

**Erhöhung der Reinigungsleistung  
von SBR-Kläranlagen**

**durch verfahrenstechnische Kopplung**

**von Belebtschlammbiologie mit  
verwirbelbarer Biofilmbiologie**

**Förderkennzeichen:**

PWTE-W - WTAK 02390399 - 02WA0110

**Fördernde Institution:**

Bundesministerium für Bildung, Wissenschaft, Forschung und Technologie

**Projektleiter:**

Dipl.-Ing. Tino Koch, EvU<sup>®</sup>-Entwicklung von Umwelttechnik GmbH

Das diesem Bericht zugrunde liegende Vorhaben wurde mit Mitteln des Bundesministeriums für Bildung und Forschung unter dem Förderkennzeichen PWTE-W-WTAK 02390399-02WA0110 gefördert. Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt beim Autor.

# Inhalt

<b>1. AUFGABENSTELLUNG UND LÖSUNGSVORSCHLAG .....</b>	<b>4</b>
1.1 VORBEMERKUNGEN ZUM SBR-VERFAHREN .....	4
1.2 NACHTEILE DER SBR-TECHNOLOGIE .....	5
1.3 LÖSUNGSVORSCHLAG.....	5
<b>2. AUFBAU UND TECHNISCHE ERPROBUNG DER VERSUCHSANLAGE .....</b>	<b>6</b>
2.1 BECKENMAßE UND AUSRÜSTUNG DES VERSUCHSREAKTORS .....	6
2.2 AUFWUCHSTRÄGER FÜR DIE BIOFILMBIOLOGIE .....	6
2.3 ABWASSERZUGABE .....	8
2.4 TECHNISCHE ERPROBUNG .....	8
<b>3. UNTERSUCHUNGEN BIOFILMBIOLOGIE OHNE BELEBTSCHLAMMBIOLOGIE .....</b>	<b>9</b>
3.1 EINFABRPHASE DER BIOFILMBIOLOGIE .....	9
3.2 ABBAULEISTUNGEN DER BIOFILMBIOLOGIE.....	11
3.2.1 <i>Versuchsphase 1 - Grundreinigung ohne Nitrifikation.....</i>	<i>11</i>
3.2.2 <i>Versuchsphase 2 - Grundreinigung mit Nitrifikation .....</i>	<i>13</i>
3.2.3 <i>Versuchsphase 3 - Grundreinigung mit erhöhter Nitrifikation.....</i>	<i>14</i>
<b>4. UNTERSUCHUNGEN VERFAHRENSKOMBINATION BIOFILMBIOLOGIE UND BELEBTSCHLAMMBIOLOGIE.....</b>	<b>15</b>
4.1 EINARBEITUNGSPHASE BIOFILMBIOLOGIE + BELEBTBIOLOGIE.....	16
4.2 ZIELSTELLUNGEN DER UNTERSUCHUNGEN BIOFILM UND BELEBTBIOLOGIE .....	16
4.2.1 <i>Versuchsphase 1 - Grundreinigung mit Nitrifikation und Denitrifikation.....</i>	<i>17</i>
4.2.1.1 Zoneneinteilung SBR-Versuchsreaktor .....	17
4.2.1.2 Tagesganglinie Abwasserzugabe.....	18
4.2.1.3 Abwasserzusammensetzung .....	19
4.2.1.4 Raumbelastungen.....	19
4.2.1.5 SBR-Zyklen und Phasen .....	19
4.2.1.6 Zyklusprotokoll N-Elimination.....	19
4.2.1.7 Versuchsergebnisse.....	20
4.2.1.8 Bewertung der Versuchsphase .....	21
4.2.2 <i>Versuchsphase 2 - Grundreinigung mit Nitrifikation, Denitrifikation und Bio-P .....</i>	<i>21</i>
4.2.2.1 Zyklusprotokoll N-Elimination + Bio-P .....	22
4.2.2.2 Versuchsergebnisse.....	23
4.2.2.3 Bewertung der Versuchsphase .....	23
<b>5. VERSUCHSPHASE WINTERBETRIEB (<math>T_w &lt; 10\text{ °C}</math>).....</b>	<b>23</b>
<b>6. SCHLAMMANFALL, SCHLAMMSTABILISIERUNG .....</b>	<b>25</b>
6.1 SCHLAMMSYNTHESE BIOFILMVERSUCHE BEI BSB-FLÄCHENBELASTUNGEN UM 5 G BSB/M <sup>2</sup> *D .....	25

6.2	SCHLAMMSYNTHESE BIOFILMVERSUCHE BEI BSB-FLÄCHENBELASTUNGEN UM 9 G BSB/M <sup>2</sup> *D .....	26
6.3	SCHLAMMSYNTHESE BIOFILM + BELEBTSCHLAMM.....	26
6.4	SCHLAMMSTABILITÄT.....	27
<b>7.</b>	<b>DENITRIFIKATIONSTESTS.....</b>	<b>27</b>
<b>8.</b>	<b>BETRIEBS- UND INVESTITIONSKOSTEN .....</b>	<b>28</b>
8.1	BETRIEBSKOSTEN .....	28
8.2	INVESTITIONSKOSTEN.....	28
<b>9.</b>	<b>EINSCHÄTZUNG ZUM STAND DER TECHNIK .....</b>	<b>29</b>
<b>10.</b>	<b>LITERATUR, PATENTE.....</b>	<b>30</b>
<b>11.</b>	<b>ANHANG .....</b>	<b>32</b>

## Tabellenverzeichnis

Tabelle 1 - Tagesgang Abwasserzufluss Kleinkläranlagen .....	8
Tabelle 2 - Abwasserzusammensetzung Biofilmversuche - Versuchsphase 1.....	11
Tabelle 3 - Abwasserzusammensetzung Biofilmversuche - Versuchsphase 2.....	13
Tabelle 4 - Abwasserzusammensetzung Biofilmversuche - Versuchsphase 3.....	14
Tabelle 5 - Zoneneinteilung SBR-Versuchsreaktor (Biofilm+Belebtschlammversuche) .....	17
Tabelle 6 - Zyklusprotokoll Biofilm+Belebtschlammversuche - Versuchsphase 1.....	20
Tabelle 7 - mittlere Ablaufwerte Biofilm+Belebtschlammversuche - Versuchsphase 1 .....	20
Tabelle 8 - Zyklusprotokoll Biofilm+Belebtschlammversuche - Versuchsphase 2.....	22
Tabelle 9 - mittlere Ablaufwerte Biofilm+Belebtschlammversuche - Versuchsphase 2 .....	23
Tabelle 10 - mittlere Ablaufwerte bei T < 10°C.....	24
Tabelle 11 - Denitrifikationsversuche mit Methanol .....	28

## Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1 - allgemeiner SBR-Kreislauf.....	4
Abbildung 2 - Aufwuchsträger für die Biofilmbiologie .....	7
Abbildung 3 - Zoneneinteilung SBR-Versuchsreaktor (Biofilm+Belebtschlammversuche).....	17
Abbildung 4 - Tagesgang Abwasserzugabe (Biofilm+Belebtschlammbiologie) .....	18
Abbildung 5 - Korrelation Ablauf NH <sub>4</sub> -N - Temperatur.....	24
Abbildung 6 - Korrelation Ablauf N <sub>anorg.</sub> - Temperatur.....	24
Abbildung 7 - Korrelation Ablauf o-P - Temperatur.....	25
Abbildung 8 - Infoblatt SBBR-Verfahren .....	32

# 1. Aufgabenstellung und Lösungsvorschlag

## 1.1 Vorbemerkungen zum SBR-Verfahren

Aus Erfahrungen auf internationalen Fachmessen besteht auf dem Gebiet der dezentrale Abwasserreinigung ein weltweiter Bedarf an technologisch einfachen, kleinen Kläranlagen mit weitergehender biologischer Elimination von Phosphor und Stickstoff. Es sind insbesondere auch jene Systeme gefragt, die eine separate Erfassung und Behandlung unterschiedlich verschmutzter Teilströme ermöglichen.

Das SBR-Verfahren (Sequencing-Batch-Reactor) erlangt bei der Reinigung organisch belasteter Abwässer dabei zunehmend an Bedeutung.

Bei diesem technologisch relativ einfachen Verfahren laufen die Verfahrensschritte Füllen des Reaktors mit Rohabwasser, biologische Reinigung des Abwassers, Sedimentation der Biomasse und Entnahme des gereinigten Abwassers zeitlich nacheinander in einem Becken ab.

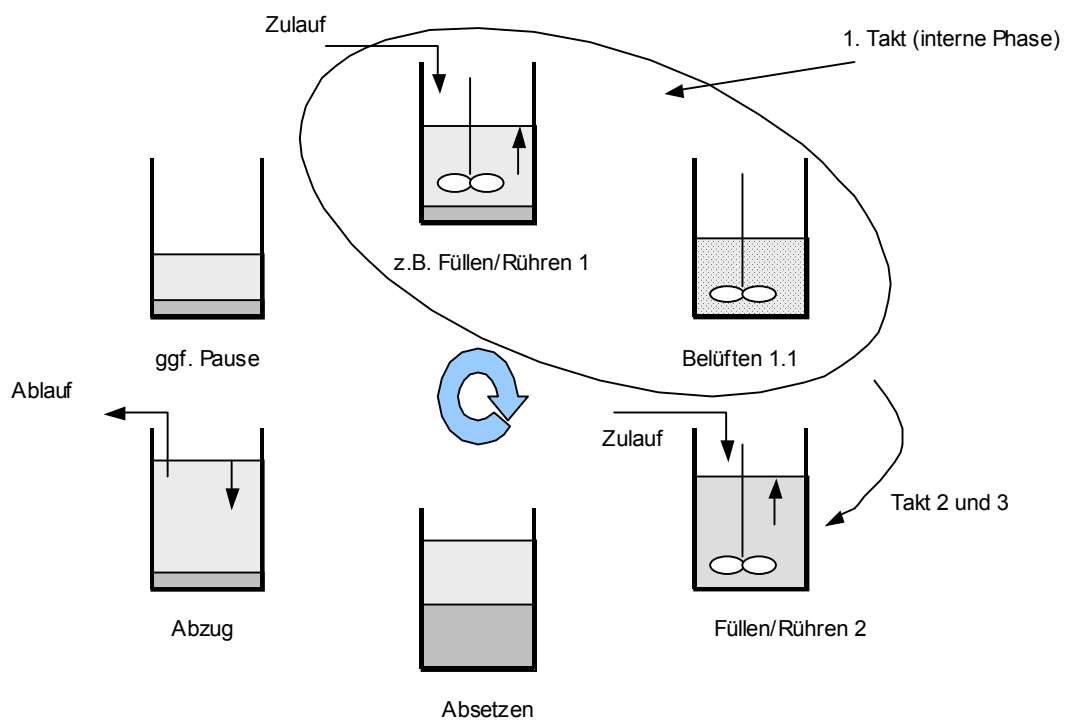


Abbildung 1 - allgemeiner SBR-Kreislauf

Die SBR-Technologie zeichnet sich, im Vergleich mit konventionellen Durchlaufanlagen, vor allem durch die Einsparung an Investitionskosten durch Wegfall einer Nachklärereinrichtung und durch geringere Energiekosten aufgrund der nicht erforderlichen Rückführung von Belebtschlamm aus der Nachklärung in die Biostufe aus.

## 1.2 Nachteile der SBR-Technologie

Herkömmliche Kläranlagen nach dem SBR-Prinzip entsprechen nicht dem neuesten Stand der biologischen Abwasserreinigung. Sie weisen einige Nachteile auf, die sich auf die Effektivität und somit die Investitions- und Betriebskosten auswirken.

Ein wesentlicher Nachteil der SBR-Technologie wird darin gesehen, dass zur Reinigung des Abwassers nur suspendierte Biologie (Belebtschlamm) genutzt wird.

Der Bioschlamm bildet aufgrund seines Sedimentationsverhaltens und der zeitlich begrenzten Absetzzeit im SB-Reaktor eine meist nur unzureichend eingedickte, relativ voluminöse Schicht, die einen erheblichen Anteil des Beckenvolumens in Anspruch nimmt. Höhere Biomassekonzentrationen können im SB-Reaktor nur erreicht werden, wenn die Eindickzeit verlängert oder ein höherer Anteil des Beckenvolumens für die Sedimentationszone genutzt wird. Derartige Maßnahmen wirken sich jedoch nachteilig auf die Investitionskosten und die Effektivität des Verfahrens aus.

Ein weiteres Problem ist, dass die Beschaffenheit und Aktivität sowie das Eindickverhalten des Belebtschlammes, in Abhängigkeit von BSB-Belastung, Schlammalter, Wassertemperatur, Sauerstoffversorgung und Turbulenz schwanken. Das hat zur Folge, dass das biologische Leistungspotential des Reaktors und das Volumenverhältnis zwischen sedimentierter Biomasse und nutzbarem Beckenvolumen für den Abwasseraustausch nicht optimal kalkulierbar sind. Bei der Bemessung müssen daher Sicherheiten vorgesehen werden, die sich ebenfalls nachteilig auf die Investitionskosten auswirken.

Die weitergehende Reinigung des Abwassers, wie die Elimination von Stickstoff durch Nitrifikation und Denitrifikation und die weitergehende biologische Phosphorelimination sind mit dem SBR-Verfahren auch mit Belebtsbiologie prinzipiell möglich.

Die für eine weitergehende Abwasserreinigung erforderlichen anoxischen und anaeroben Verfahrensstufen lassen sich jedoch aufgrund relativ niedriger Biomassekonzentrationen und geringer Sedimentationsgeschwindigkeit des Schlammes, nur durch zeitaufwendige Zyklen ohne Luftzufuhr realisieren. Der für die Realisierung anoxischer und anaerober Phasen erforderliche Zeitaufwand geht ebenfalls zu Lasten des Beckenvolumens und somit der Effektivität des SBR-Verfahrens.

## 1.3 Lösungsvorschlag

Grundsätzliches Ziel des Vorhabens ist die Entwicklung und Erprobung einer verfahrens- und bautechnisch einfachen Abwasserreinigungsanlage nach dem SBR-Verfahren, mit der auch relativ kleine Mengen dezentral anfallenden und unterschiedlich belasteten kommunalen Abwassers mit geringem Kosten- und Wartungsaufwand in ähnlichem Maße wie in Großkläranlagen gereinigt werden können.

Das Ziel solle durch die verfahrenstechnische Kopplung von Belebtsbiologie mit frei beweglicher Biofilmbiologie erreicht werden.

Durch die zusätzliche Nutzung verwirbelbarer Biofilmbiologie wird - ohne wesentliche Inanspruchnahme von Beckenvolumen - die Biomasse pro Volumeneinheit erhöht und somit eine größere Raumbelastung, eine weitergehende Reinigung des Abwassers, kürzere Belüftungszyklen und eine effektivere Nutzung des Beckenvolumens erreicht. Die anoxisch-anaeroben Verfahrensschritte können deutlich verkürzt werden.

Außerdem wird das Verhältnis zwischen Sedimentationsraum und Nutzvolumen für den Abwasseraustausch günstig beeinflusst. Die verfügbare Biomasse und der zur Sedimentation erforderliche Raum sind relativ konstant und somit verfahrenstechnisch besser kalkulierbar.

## 2. Aufbau und technische Erprobung der Versuchsanlage

Die Untersuchungen wurden in einem GFK-Rundbecken auf dem Gelände der kommunalen Kläranlagen Gröditz und Bad Liebenwerda durchgeführt.

### 2.1 Beckenmaße und Ausrüstung des Versuchsreaktors

– Durchmesser	2,5 m
– Anstauhöhe	2,1 m
– Nutzvolumen	10 m <sup>3</sup>
– Belüftung	Verdichter, Stabbelüfter
– Zulauf Abwasser	Abwasserpumpe
– Entnahme Klarphase	Schwimmkörper mit integrierter Ablaufpumpe
– Schlammmentnahme	Injektorpumpe
– Steuerung	Zeitschaltuhren für Zulaufpumpe und Belüftung
– Wasserspiegelmessung	Ultraschall
– Anschlusswert	30 - 35 EW

### 2.2 Aufwuchsträger für die Biofilmbiologie

Als Träger von Biofilmen wurden speziell für die SBR-Technologie entwickelte, spezifisch schwere (ca. 1,1 g/cm<sup>3</sup>), zylindrische Hohlkörper mit einem Durchmesser von 5 mm und einer Länge von 7 - 8mm eingesetzt.

Durch die künstliche Vergrößerung der Oberfläche (Längsriefen) beträgt die theoretisch besiedelbare Aufwuchsfläche der Körper 700 - 750 m<sup>2</sup> pro m<sup>3</sup> Schüttvolumen.

Für die Bemessung wird eine mittlere Oberfläche von 700 m<sup>2</sup> pro m<sup>3</sup> Schüttvolumen angenommen. Die Herstellung der Aufwuchskörper erfolgte aus biologisch, mechanisch und chemisch beständigem Recyclingmaterial.

Je nach Belastung, Reinigungsziel und Sauerstoffangebot siedeln sich auf den äußeren und inneren Flächen der Körper spezielle Organismen im Biofilm an.

Ein wesentlicher Vorteil der walzenförmigen Körper ist, dass der Innenring frei durchgängig ist. Dadurch bildet sich auch im Innern ein aktiver Biofilm / Biorasen aus, der ständig Kontakt mit Sauerstoff und dem zu reinigenden Abwasser hat.



Abbildung 2 - Aufwuchsträger für die Biofilmbiologie

Nach Erfahrungen mit ähnlich gestalteten, jedoch spezifisch leichten Körpern, bildet sich auf den äußeren Bewuchsflächen ein dünner Biofilm und im Innern des zylindrischen Körpers ein meist stärkerer Biofilm / Biorasen aus.

Auf der Oberfläche des stärkeren Biofilms siedeln sich aerob lebende, z.B. nitrifizierende, und in den tieferen, unzureichend mit Sauerstoff versorgten Bereichen, denitrifizierende Organismen an. Auf diese Weise wird auch im belüfteten Wirbelbett Stickstoff durch Nitrifikation / Denitrifikation teilweise eliminiert.

Die Aufwuchskörper bilden in Abhängigkeit von der Intensität der Belüftung ein mehr oder weniger intensives Wirbelbett. Nach Abschalten der Belüftung sedimentieren die Körper innerhalb von Minuten auf den Boden des Reaktors und bilden dort ein räumlich eingegrenztes, biologisch aktives Fließ/Festbett aus. In Abhängigkeit von der Dauer der unbelüfteten Phase bilden sich aerobe, anoxische oder anaerobe Milieubedingungen aus.

Am Beginn der Sedimentationsphase werden die aeroben Nitrifikationsprozesse noch nicht unterbrochen. Wird die Phase mit abgeschalteter Belüftung verlängert, dann setzen zunächst anoxische und danach anaerob-hydrolytische Prozesse ein. Dabei wird zunächst Nitrat reduziert und anschließend höhermolekulare organische Stoffe in niedermolekulare aufgespalten.

Diese Hydrolyseprodukte werden bevorzugt von Phosphor speichernden Organismen als Nährsubstrate aufgenommen. Auf diese Weise wird das Wachstum dieser speziellen Organismen begünstigt. Die Zeitdauer und der Zeitabstand von Phasen mit intensiven oder mit reduzierten Luftertrag werden in Abhängigkeit von der Reaktorbelastung und den Reinigungszielen festgelegt.

### 2.3 Abwasserzugabe

Die Versuche wurden unter praxisnahen Bedingungen durchgeführt. Es wurde ein für kleine Kläranlagen typischer Tagesgang für die Abwasserzugabe simuliert. Nach [18] ist bei Kleinkläranlagen im Tagesverlauf mit folgenden Abwassermengen zu rechnen:

Tageszeit	Tagesmenge	Tagesmenge (bei 32 EW, 0,12 m <sup>3</sup> /E*d)
06 - 09	27 %	1,02
09 - 12	15 %	0,57
12 - 15	21 %	0,81
15 - 18	3 %	0,12
18 - 21	21 %	0,81
21 - 24	13 %	0,49
24 - 3	0 %	-
<b>Summe</b>	<b>100 %</b>	<b>3,82 m<sup>3</sup>/d</b>

Tabelle 1 - Tagesgang Abwasserzufluss Kleinkläranlagen

### 2.4 Technische Erprobung

Bei der Ausrüstung und technischen Erprobung der Pilotanlage mussten folgende Probleme gelöst werden:

- Auswahl und Herstellung geeigneter Aufwuchskörper,
- Auswahl und Installation geeigneter Pumpen für Abwasserzuführung,
- Schlammmentnahme, und Entnahme der Klarphase,
- Bau, Installation und Erprobung von Vorrichtungen zur Entnahme von Schlamm und Abwasser bei gleichzeitiger Rückhaltung der Aufwuchskörper,
- Auswahl und Einbau eines für Versuche variablen Belüftungssystems, das eine ausreichende Verwirbelung der spezifisch schweren Aufwuchskörper gewährleistet,
- Bau und Installation von Einrichtungen zur Steuerung der Pumpen und Verdichter,



- Ausrüstung der kompletten Versuchsanlage auf dem Gelände einer Kläranlage,
- Installierung von Zu- und Ableitungen für Abwasser, Schlamm und Energie.

### 3. Untersuchungen Biofilmbiologie ohne Belebtschlammbiologie

Ein effektiver Einsatz verwirbelbarer Biofilmbiologie in der Abwassertechnik - allein oder kombiniert mit Belebtschlammbiologie - ist nur dann möglich, wenn entsprechende Bemessungsgrundlagen mit Aussagen zu den spezifischen Leistungen zur Verfügung stehen.

Ein wesentliches wissenschaftlich-technisches Ziel des Vorhabens war daher die Erarbeitung entsprechender Grundlagen für die Auslegung von Kläranlagen mit unterschiedlichen Reinigungszielen.

Folgende grundlegende Untersuchungen wurden durchgeführt:

- Untersuchungen zum BSB/CSB-Abbau in Abhängigkeit von der Flächenbelastung,
- Abhängigkeit der Nitrifikationsleistung von der  $\text{NH}_4\text{-N}$  - bzw. BSB/CSB-Flächenbelastung,
- Untersuchungen zum Einfluss der Temperatur auf die Abbauleistung,
- Untersuchungen zur Abhängigkeit der Schlammsyntheseraten von der BSB-Flächenbelastung,
- Zeitaufwand zur Besiedlung von Aufwuchsträgern.

Der Einfluss von Belebtschlammbiologie auf die Messwerte wurde so minimiert, dass bei den Versuchen mit Biofilmbiologie nach jedem Zyklus die suspendierte Biomasse weitgehend abgepumpt wurde. Dies erfolgte durch intermittierende Belüftung des Reaktors während der Entnahmephase. Das Schlammvolumen wurde auf diese Weise auf unter 50 ml/l reduziert.

Für folgende Reinigungsziele wurden Bemessungsgrundlagen erarbeitet:

**- Grundreinigung ohne Nitrifikation:**

$$\text{BSB}_5 \leq 40 \text{ mg/l}, \quad \text{CSB} \leq 150 \text{ mg/l},$$

**- Grundreinigung mit Nitrifikation ( $\text{NH}_4\text{-N} < 10 \text{ mg/l}$ ):**

$$\text{BSB}_5 \leq 20 \text{ mg/l}, \quad \text{CSB} \leq 90 \text{ mg/l}, \quad \text{NH}_4\text{-N} \leq 10 \text{ mg/l}$$

**- Grundreinigung mit erhöhter Nitrifikation ( $\text{NH}_4\text{-N} < 5,0 \text{ mg/l}$ ):**

$$\text{BSB}_5 \leq 20 \text{ mg/l}, \quad \text{CSB} \leq 90 \text{ mg/l}, \quad \text{NH}_4\text{-N} \leq 5 \text{ mg/l}$$

#### 3.1 Einfahrphase der Biofilmbiologie

Die Besiedlung der Aufwuchskörpern mit speziellen Mikroorganismen (z.B. Nitrifikanten) ist ein relativ zeitaufwendiger Prozess. Dieser Vorgang wurde während der Einfahrphase beobachtet. Der Reaktor

wurde zunächst mit Belebungsbiologie angeimpft und danach täglich etwa 22 Stunden belüftet. Nach etwa 30 - 35 Tagen hatte sich bei relativ niedrigen Temperaturen (Mittel 12,6 °C) und mittleren BSB-Flächenbelastungen (2,7 g BSB/m<sup>2</sup>\*d) eine nitrifizierende Biofilmbiologie ausgebildet. NH<sub>4</sub>-N wurde danach von etwa 75 mg/l stabil auf Konzentrationen < 2,0 mg/l reduziert.

### Dauer der Einarbeitungsphase

Tag.....	0.	▶	18.	▶	26.	▶	29.	▶	35.
NH <sub>4</sub> -N mg/l.....	75	▶	50	▶	16	▶	7	▶	< 2,0

### Mittlere Zulaufkonzentrationen während der Einfahrphase

CSB	1575 mg/l	BSB <sub>5</sub>	570 mg/l	NH <sub>4</sub> -N	75 mg/l
o-P	22 mg/l	P <sub>ges.</sub>	34 mg/l	pH	7,8

### Mittlere Ablaufkonzentrationen am Ende der Einfahrphase

CSB	108 mg/l	BSB <sub>5</sub>	26 mg/l	NH <sub>4</sub> -N	< 2,0 mg/l
NO <sub>x</sub> -N	12,2 mg/l	pH	7,8		

### Versuchsbedingungen während der Einfahrphase

Abwasseraustauschmenge	3,4 m <sup>3</sup> /d
BSB-Fracht	1,94 kg CSB/d
BSB-Raumbelastung	0,38 kg BSB/m <sup>3</sup> *d
BSB-Flächenbelastung	2,7 g BSB/m <sup>2</sup> *d
NH <sub>4</sub> -N-Fracht	0,25 kg N/d
NH <sub>4</sub> -N-Volumenbelastung	0,05 kg N/m <sup>3</sup> Biofilm*d
NH <sub>4</sub> -N-Flächenbelastung	0,36 g N/m <sup>2</sup> *d
Wassertemperatur	10,4 - 16,3 °C    Mittel    12,6 °C

### 3.2 Abbauleistungen der Biofilmbiologie

Nach der Einarbeitungszeit wurde die Flächenbelastung des Biofilms stufenweise erhöht, bis die oberen Werte des Reinigungszieles *Grundreinigung* ( $BSB_5 \leq 40 \text{ mg/l}$ ,  $CSB \leq 150 \text{ mg/l}$ ) noch eingehalten wurden.

Die Nitrifikationsprozesse wurden während des Belastungsanstieges gehemmt jedoch nicht völlig unterdrückt. Bei  $BSB$ -Flächenbelastungen um  $9,0 \text{ g BSB/m}^2\text{d}$  wurde  $NH_4\text{-N}$  noch um ca. 33 % von 84 auf 56  $\text{mg/l}$  reduziert.

Nach einer Anpassungsphase von 2 Wochen mit relativ hoher Belastung, wurde die Flächenbelastung wieder stufenweise reduziert, bis die jeweils angestrebten höheren Reinigungsziele erreicht wurden. Die einzelnen Belastungsstufen wurden dann über einen Messzeitraum von mindestens zwei bis drei Wochen untersucht.

Die nachfolgend dargestellten Versuchsergebnisse wurden bei täglichen Belüftungszeiten von 22 Stunden und Sauerstoffkonzentrationen über  $4,0 \text{ mg/l}$  gemessen.

Das zu reinigende Abwasser wurde nach einem für kleine Kläranlagen typischen Tagesgang zugepumpt.

#### 3.2.1 Versuchsphase 1 - Grundreinigung ohne Nitrifikation

**Reinigungsziel:** Grundreinigung ohne Nitrifikation  
 $BSB_5 \leq 40 \text{ mg/l}$ ,  $CSB \leq 150 \text{ mg/l}$

Während der Versuchsphase wurden folgende mittlere Zu- und Ablaufwerte gemessen:

	<b>CSB</b>	<b>BSB<sub>5</sub></b>	<b>NH<sub>4</sub>-N</b>	<b>NO<sub>x</sub>-N</b>
	mg/l	mg/l	mg/l	mg/l
Zulauf	1280	577	84	-
Ablauf	143	38	56	4,0
Zielstellung	150	40	-	-

Tabelle 2 - Abwasserzusammensetzung Biofilmversuche - Versuchsphase 1

Demzufolge wurde eine Grundreinigung noch bei folgenden maximalen Flächen- bzw. Raumbelastungen erreicht:

**Flächenbelastung** (bezogen auf  $1 \text{ m}^2$  Aufwuchsfläche)  
 $BSB$   $9,0 \text{ g/m}^2\text{d}$   $CSB$   $20 \text{ g/m}^2\text{d}$

**Raumbelastung** (bezogen auf 1 m<sup>3</sup> Schüttvolumen Biofilm mit 700 m<sup>2</sup>/m<sup>3</sup>)  
 BSB 6,3 kg/m<sup>3</sup>\*d CSB 14 kg/m<sup>3</sup>\*d

### Verfahrenstechnischer Nachweis

Aufwuchskörpermenge			1,0 m <sup>3</sup>
Oberfläche von 1 m <sup>3</sup> Aufwuchskörper			700 m <sup>2</sup>
Abwasseraustauschmengen			10,9 m <sup>3</sup> /d
Zulaufkonzentration	BSB <sub>5</sub>		577 mg/l
Zulaufkonzentration	CSB		1280 mg/l
Zulauf-Fracht	BSB <sub>5</sub>	10,9 * 0,577	6,28 kg/d
Zulauf-Fracht	CSB	10,9 * 1,280	13,9 kg/d
Flächenbelastung	BSB <sub>5</sub>	6280 / 700	<b>9,0 g BSB/m<sup>2</sup>*d</b>
Flächenbelastung	CSB	13900 / 700	<b>20,0 g CSB/m<sup>2</sup>*d</b>
Belüftungszeiten			22 Stunden
Sauerstoffkonzentrationen			> 4 mg/l
pH-Wert			7,2

### Bewertung der Ergebnisse

Die Mindestanforderungen für Haus- und Kleinkläranlagen (CSB 150 mg/l, BSB<sub>5</sub> 40 mg/l) wurden noch bei BSB-Flächenbelastung von 9,0 g/m<sup>2</sup>\*d erreicht. Das Reinigungspotential von 1 m<sup>3</sup> Schüttvolumen mit einer Oberfläche von 700 m<sup>2</sup> beträgt demzufolge 700 \* 9,0 = 6,3 kg BSB/d. Dies entspricht 6300 / 60 = 105 EW. Für die Grundreinigung des Abwassers von 1 EW werden etwa 10 Liter Aufwuchskörper benötigt.

Bei den Versuchen mit Biofilmbiologie wurden jeweils die oberen Belastungsgrenzen angestrebt. Bei der Auslegung von Praxisanlagen wird jedoch aus Sicherheitsgründen empfohlen, die gemessene BSB-Flächenbelastung etwa 25 % (6,5 g BSB/m<sup>2</sup>\*d) niedriger anzusetzen.

Die Ergebnisse zeigen, dass auch bei hohen Belastungen mit einer begrenzten Nitrifikation gerechnet werden kann. Ammonium-Stickstoff wurde um ca. 30 % reduziert.

### 3.2.2 Versuchsphase 2 - Grundreinigung mit Nitrifikation

**Reinigungsziel:** Weitgehender Abbau organischer Stoffe und Nitrifikation  
 $BSB_5 \leq 20 \text{ mg/l}$ ,  $CSB \leq 90 \text{ mg/l}$ ,  $NH_4\text{-N} \leq 10 \text{ mg/l}$

Während der Versuchsphase wurden folgende mittlere Zu- und Ablaufwerte gemessen:

	<b>CSB</b>	<b>BSB<sub>5</sub></b>	<b>NH<sub>4</sub>-N</b>	<b>NO<sub>x</sub>-N</b>
	mg/l	mg/l	mg/l	mg/l
Zulauf	1118	587	75	-
Ablauf	88	9	9	41
Zielstellung	90	20	10	-

Tabelle 3 - Abwasserzusammensetzung Biofilmversuche - Versuchsphase 2

Die Reinigungsziele wurden noch bei folgenden maximalen Belastungswerten erreicht:

**Flächenbelastung** (bezogen auf 1 m<sup>2</sup> Aufwuchsfläche)  
 BSB 8 g/m<sup>2</sup>\*d      CSB 16 g/m<sup>2</sup>\*d      NH<sub>4</sub>-N 1,1 g N/m<sup>2</sup>\*d

**Raumbelastung** (bezogen auf 1 m<sup>3</sup> Schüttvolumen Biofilm mit 700 m<sup>2</sup>/m<sup>3</sup>)  
 BSB<sub>5</sub> 5,6 kg/m<sup>3</sup>\*d      CSB 11,2 kg/m<sup>3</sup>\*d      NH<sub>4</sub>-N 0,77 kg N/m<sup>3</sup>\*d

#### Verfahrenstechnischer Nachweis

Aufwuchskörpermenge      1,0 m<sup>3</sup>  
 Oberfläche von 1 m<sup>3</sup> Aufwuchskörper      700 m<sup>2</sup>  
 Abwasseraustauschmengen      10,0 m<sup>3</sup>/d

Zulaufkonzentration BSB<sub>5</sub>      587 mg/l  
 Zulaufkonzentration CSB      1118 mg/l  
 Zulaufkonzentration NH<sub>4</sub>-N      75 mg/l

Zulauf-Fracht      BSB<sub>5</sub>      10,0 \* 0,587      5,87 kg/d  
 Zulauf-Fracht      CSB      10,0 \* 1,118      11,2 kg/d  
 Zulauf-Fracht      NH<sub>4</sub>-N      10,0 \* 0,075      0,75 kg/d

Flächenbelastung      BSB      5870 / 700      **8,4 g BSB/m<sup>2</sup>\*d**  
 Flächenbelastung      CSB      11200 / 700      **16,0 g CSB/m<sup>2</sup>\*d**  
 Flächenbelastung      NH<sub>4</sub>-N      750 / 700      **1,1 g N/m<sup>2</sup>\*d**

Belüftungszeiten	22 Stunden
Sauerstoffkonzentrationen	> 4 mg/l
pH-Wert	7,3

### Bewertung der Ergebnisse

Die Reinigungsziele - erhöhter Abbau organischer Stoffe und Nitrifikation - wurden noch bei relativ hohen Flächenbelastungen (BSB<sub>5</sub> 8,0 g/m<sup>2</sup>\*d, CSB 16 g/m<sup>2</sup>\*d, NH<sub>4</sub>-N 1,1 g N/m<sup>2</sup>\*d) erreicht.

Demzufolge kann 1 m<sup>3</sup> Aufwuchsträger täglich mit etwa 5,6 kg BSB = 93 EW belastet werden.

### 3.2.3 Versuchsphase 3 - Grundreinigung mit erhöhter Nitrifikation

**Reinigungsziel:** Weitgehender Abbau organischer Stoffe und nahezu vollständige Nitrifikation.  
BSB<sub>5</sub> ≤ 20 mg/l, CSB ≤ 90 mg/l, NH<sub>4</sub>-N ≤ 5 mg/l

Während der Versuchsphase wurden folgende mittlere Zu- und Ablaufwerte gemessen:

	CSB	BSB <sub>5</sub>	NH <sub>4</sub> -N	NO <sub>x</sub> -N
	mg/l	mg/l	mg/l	mg/l
Zulauf	923	490	66	-
Ablauf	87	8	2,4	49
Zielstellung	90	20	5,0	-

Tabelle 4 - Abwasserzusammensetzung Biofilmversuche - Versuchsphase 3

Die Reinigungsziele wurden noch bei folgenden maximalen Belastungswerten erreicht:

**Flächenbelastung** (bezogen auf 1 m<sup>2</sup> Aufwuchsfläche)  
BSB<sub>5</sub> 5,0 g/m<sup>2</sup>\*d CSB 9,5 g/m<sup>2</sup>\*d NH<sub>4</sub>-N 0,7 g N/m<sup>2</sup>\*d

**Raumbelastung** (bezogen auf 1 m<sup>3</sup> Schüttvolumen Biofilm mit 700 m<sup>2</sup>/m<sup>3</sup>)  
BSB<sub>5</sub> 3,5 kg/m<sup>3</sup>\*d CSB 6,6 kg/m<sup>3</sup>\*d NH<sub>4</sub>-N 0,5 kg N/m<sup>3</sup>\*d

### Verfahrenstechnischer Nachweis

Aufwuchskörpermenge	1,0 m <sup>3</sup>
Oberfläche von 1 m <sup>3</sup> Aufwuchskörper	700 m <sup>2</sup>
Abwasseraustauschmengen	7,2 m <sup>3</sup> /d

Zulaufkonzentration	BSB <sub>5</sub>		490 mg/l
Zulaufkonzentration	CSB		923 mg/l
Zulaufkonzentration	NH <sub>4</sub> -N		66 mg/l
Zulauf-Fracht <sup>^</sup>	BSB <sub>5</sub>	7,2 * 0,490	3,53 kg/d
Zulauf-Fracht	CSB	7,2 * 0,923	6,65 kg/d
Zulauf-Fracht	NH <sub>4</sub> -N	7,2 * 0,066	0,47 kg/d
Flächenbelastung	BSB	3530 / 700	<b>5,0 g BSB/m<sup>2</sup>*d</b>
Flächenbelastung	CSB	6650/ 700	<b>9,5 g CSB/m<sup>2</sup>*d</b>
Flächenbelastung	NH <sub>4</sub> -N	470 / 700	<b>0,7 g N/m<sup>2</sup>*d</b>
Belüftungszeiten			22 Stunden
Sauerstoffkonzentrationen			> 4 mg/l
pH-Wert			7,3

### Bewertung der Ergebnisse

Die hohen Zielstellungen - weitgehender Abbau organischer Stoffe und nahezu vollständige Nitrifikation - wurden noch bei relativ hohen Flächenbelastungen (BSB<sub>5</sub> = 5,0 g/m<sup>2</sup>\*d, CSB = 9,5 g/m<sup>2</sup>\*d, NH<sub>4</sub>-N = 0,7 g N/m<sup>2</sup>\*d) erreicht. Es wurde eine stabile Nitrifikation mit NH<sub>4</sub>-Werten unter 2,0 mg/l beobachtet.

Demzufolge kann 1 m<sup>3</sup> Aufwuchsträger auch bei höheren Reinigungszielen mit etwa 3,5 kg BSB/d = 58 EW belastet werden.

## 4. Untersuchungen Verfahrenskombination Biofilmbiologie und Belebtschlammbiologie

Nach bisherigen Erkenntnissen ist eine weitergehende biologische Elimination von Phosphor nur durch Nutzung von Biofilmbiologie nicht möglich. Erfahrungen mit Durchlaufanlagen zeigen jedoch, dass durch die Kombination Belebtschlammbiologie + verwirbelbare Biofilmbiologie auch in Kläranlagen des unteren Anschlussbereiches eine weitergehende Elimination von Stickstoff und Phosphor in ähnlichem Maße wie in Großkläranlagen möglich ist [15].

Im Rahmen des Vorhabens wurde daher untersucht, ob auch in SBR-Hauskläranlagen bzw. in SBR-Kläranlagen der Größenklasse 1 mit der Verfahrenskombination Biofilmbiologie + Belebtschlammbiologie eine weitergehende biologische Elimination von Phosphor und Stickstoff ohne zusätzlichen technologischen Aufwand möglich ist.

#### 4.1 Einarbeitungsphase Biofilmbiologie + Belebtsbiologie

Da die Zu- und Ableitungen der Pilotanlage nicht frostgeschützt waren, wurde der SB-Reaktor im Winter außer Betrieb genommen. Die Anlage wurde Mitte März bei noch relativ niedrigen Temperaturen erneut mit Biofilmbiologie angefahren. Belebtschlamm wurde zunächst nach jeder Sedimentationsphase abgesaugt. Die Anlage wurde 22 Stunden am Tag belüftet. Die Zeitdauer für Sedimentation und Abwasseraustausch betrug 2 Stunden.

Nach einer Einarbeitungszeit von ca. 30 Tagen wurden bei BSB-Belastungen um 2,5 g BSB/m<sup>2</sup>\*d bzw. 0,4 g NH<sub>4</sub>-N /m<sup>2</sup>\*d, erneut eine stabile Nitrifikation erreicht (NH<sub>4</sub>-N ≤ 2,0 g/m<sup>3</sup>).

Nach Einarbeitung der Biofilmbiologie wurde die Belebtsbiologie im Reaktor belassen und teilweise durch nitrifizierenden Belebtschlamm aus der Kläranlage Bad Liebenwerda ergänzt. Das sedimentierte Schlammvolumen wurde auf 3,0 m<sup>3</sup> Schlamm, mit je 7,5 - 8,0 kg TS/m<sup>3</sup>, begrenzt.

Der Sedimentationsraum der SBR-Anlage setzte sich demzufolge aus 3,0 m<sup>3</sup> Belebtsbiologie und 1,0 m<sup>3</sup> Biofilmbiologie mit einer besiedelbaren Oberfläche von ca. 700 m<sup>2</sup> zusammen. In den Zwischenräumen der sedimentierten Biofilmbiologie reicherte sich ebenfalls Belebtsbiologie an. Die TS-Menge betrug etwa 1,0 - 1,3 kg/m<sup>3</sup>. Im Mittel betrug die Gesamt-TS-Konzentration im Reaktor ca. 24 kg.

#### 4.2 Zielstellungen der Untersuchungen Biofilm und Belebtsbiologie

Ziel der Versuche mit Biofilmbiologie und Belebtsbiologie war ein erhöhter Abbau organischer Stoffe (BSB, CSB), eine weitgehende Elimination von Stickstoff über die Verfahrensschritte Nitrifikation und Denitrifikation sowie eine erhöhte biologische Phosphatelimination. Es wurden die Mindestanforderungen von Kläranlagen der Größenklasse 4 (ab 20.000 EW) angestrebt.

Eine weitergehende biologische Elimination von Stickstoff und Phosphor ist dann zu erwarten, wenn im Reaktor nacheinander in bestimmten Zeitabständen unterschiedliche Milieuverhältnisse mit unterschiedlicher Dauer eingestellt werden, wie z.B.:

- aerobe für die Nitrifikation und CSB/BSB-Abbau,
- anoxische für Denitrifikation,
- anaerobe für eine weitergehende Phosphatelimination.

Außerdem musste die Zulaufbelastung an das Leistungspotential der suspendierten und trägerfixierten Biologie angepasst werden. Dafür waren vielfältige Versuchsreihen erforderlich, die mehrere Monate in Anspruch nahmen.



Auf den Ergebnissen von Vorversuchen aufbauend, wurden optimierte Verfahrensvarianten für Nitrifikation/Denitrifikation sowie Nitrifikation/Denitrifikation/Phosphorelimination erarbeitet und anschließend getestet.

Die Ergebnisse der beiden Verfahrensvarianten werden nachfolgend dargestellt.

#### 4.2.1 Versuchsphase 1 - Grundreinigung mit Nitrifikation und Denitrifikation

**Reinigungsziel:** Erhöhte Grundreinigung mit Nitrifikation und Denitrifikation  
 $BSB_5 \leq 20 \text{ mg/l}$      $CSB \leq 90 \text{ mg/l}$ ,     $NH_4\text{-N} \leq 10 \text{ mg/l}$ ,  
 $\Sigma N_{\text{anorg.}} \leq 18 \text{ mg/l}$

##### 4.2.1.1 Zoneneinteilung SBR-Versuchsreaktor

Das Nutzvolumen des SB-Versuchsreaktors wurde wie folgt aufgeteilt:

	Volumen	Schichthöhe	Vol.%
	m <sup>3</sup>	cm	%
Biofilmbiologie, sedimentiert	1,0	20	10
Belebtsbiologie, sedimentiert	3,0	60	31
Austauschzone	4,3	90	44
Sicherheitszone	1,5	30	15
<b>Gesamt:</b>	<b>9,8</b>	<b>200</b>	<b>100</b>

Tabelle 5 - Zoneneinteilung SBR-Versuchsreaktor (Biofilm+Belebtschlammversuche)

- Oberfläche von 1 m<sup>3</sup> Aufwuchskörper 700 m<sup>2</sup>
- Trockensubstanz Belebtsbiologie ca. 24 kg TS
- Austauschmengen 0,12 m<sup>3</sup>/EW \* 32 EW 3,8 m<sup>3</sup>/d

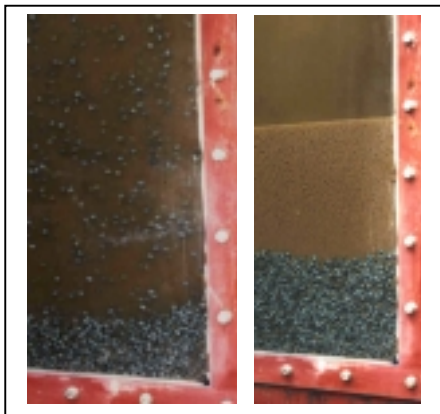


Abbildung 3 - Zoneneinteilung SBR-Versuchsreaktor (Biofilm+Belebtschlammversuche)

4.2.1.2 Tagesganglinie Abwasserzugabe

Bezug: festgesetzte Austauschmenge 3,8 m³/d

<b>Tageszeit</b>	<b>Zugabe</b>	<b>Tageszeit</b>	<b>Zugabe</b>
06 - 07	9 % 0,34 m³/h	16 - 17	1 % 0,04 m³/h
07 - 08	9 % 0,34 m³/h	17 - 18	1 % 0,04 m³/h
08 - 09	9 % 0,34 m³/h	18 - 19	7 % 0,27 m³/h
09 - 10	5 % 0,19 m³/h	19 - 20	7 % 0,27 m³/h
10 - 11	5 % 0,19 m³/h	20 - 21	7 % 0,27 m³/h
11 - 12	5 % 0,19 m³/h	21 - 22	5 % 0,19 m³/h
12 - 13	7 % 0,27 m³/h	22 - 23	5 % 0,19 m³/h
13 - 14	7 % 0,27 m³/h	23 - 24	3 % 0,11 m³/h
14 - 15	7 % 0,27 m³/h	24 - 03	0 % 0,0
15 - 16	1 % 0,04 m³/h	03 - 06	0 % 0,0 Sedimentation/Austausch
<b>Summe</b>		<b>100 %</b>	<b>3,8 m³/d</b>

Die Tagesganglinie nach ist in nachfolgender Abbildung dargestellt. Die prozentuale Verteilung der Abwasserzuführung erfolgte in Anlehnung an die Empfehlung „Zulassungsprüfung Kleinkläranlagen“ [18].

**Tagesgang Abwasserzugabe (Gesamt: 3,8 m³/d)**

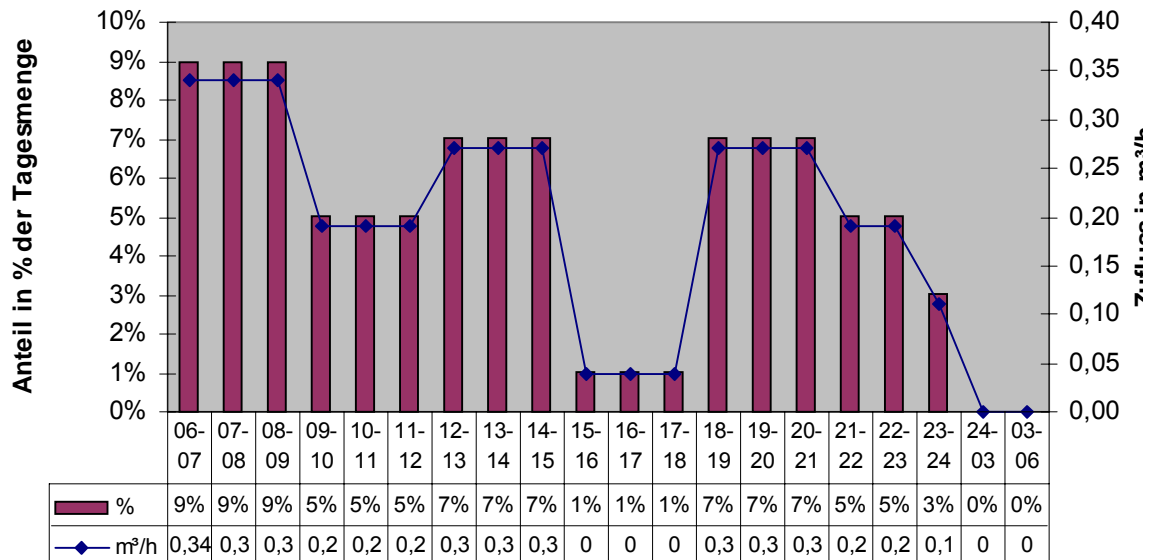


Abbildung 4 - Tagesgang Abwasserzugabe (Biofilm+Belebtschlammbiologie)

#### 4.2.1.3 Abwasserzusammensetzung

Zulaufkonzentration	BSB <sub>5</sub>		550 mg/l
Zulaufkonzentration	CSB		1287 mg/l
Zulaufkonzentration	NH <sub>4</sub> -N		77 mg/l
Zulauf-Fracht	BSB	3,8 * 0,550	2,1 kg/d
Zulauf-Fracht	CSB	3,8 * 1,287	4,9 kg/d
Zulauf-Fracht	NH <sub>4</sub> -N	3,8 * 0,077	0,29 kg/d

#### 4.2.1.4 Raumbelastungen

Bezug: Beckenvolumen von 9,8 m<sup>3</sup>

Raumbelastung	CSB	4,9 / 9,8 m <sup>3</sup>	0,50 kg CSB/m <sup>3</sup> *d
Raumbelastung	BSB	2,1 / 9,8 m <sup>3</sup>	0,21 kg BSB/m <sup>3</sup> *d
Raumbelastung	NH <sub>4</sub> -N	0,29 / 9,8 m <sup>3</sup>	0,03 kg NH <sub>4</sub> -N /m <sup>3</sup> *d

#### 4.2.1.5 SBR-Zyklen und Phasen

Gesamtdauer pro Zyklus	24,0 h
Sedimentationzeit	1,5 h
Abwasseraustausch	1,5 h
Belüftungszeit, Nitrifikation	12,0 h
unbelüftete Zeit, Denitrifikation	9,0 h

#### 4.2.1.6 Zyklusprotokoll N-Elimination

Tageszeit	Denitrifikation	Nitrifikation	Abwasser	BSB <sub>5</sub> -Fracht
	h	h	m <sup>3</sup> /h	kg / h
06 - 07	1,0	-	0,34	0,157
07 - 08	1,0	-	0,34	0,157
08 - 09	1,0	-	0,34	0,157
09 - 10	-	1,0	0,19	0,087
10 - 11	-	1,0	0,19	0,087
11 - 12	-	1,0	0,19	0,087
12 - 13	1,0	-	0,27	0,112
13 - 14	1,0	-	0,27	0,112
14 - 15	-	-	0,27	0,112

Tageszeit	Denitrifikation	Nitrifikation	Abwasser	BSB <sub>5</sub> -Fracht
15 - 16	-	1,0	0,04	0,018
16 - 17	-	1,0	0,04	0,018
17 - 18	-	1,0	0,04	0,018
18 - 19	1,0	-	0,27	0,122
19 - 20	1,0	-	0,27	0,122
20 - 21	-	1,0	0,27	0,122
21 - 22	-	1,0	0,19	0,087
22 - 23	1,0	-	0,19	0,087
23 - 24	1,0	-	0,11	0,050
24 - 01	-	1,0	0	0
01 - 02	-	1,0	0	0
02 - 03	-	1,0	0	0

Tabelle 6 - Zyklusprotokoll Biofilm+Belebtschlammversuche - Versuchsphase 1

- Sedimentationsphase: 03:00 - 04:30 (1,5 h)
- Entnahmephase: 04:30 - 06:00 (1,5 h)
- Reaktionszeiten:
  - Denitrifikation 9 h = 43 %
  - Nitrifikation 12 h = 57 %
- $V_D / V_{BB}$  9 h / 21 h 43%

Der SB-Reaktor wurde in der beschriebenen Form über einen Zeitraum von 6 - 7 Wochen betrieben. Die mittleren Ergebnisse sind nachfolgend dargestellt.

#### 4.2.1.7 Versuchsergebnisse

		CSB	BSB <sub>5</sub>	NH <sub>4</sub> -N	NO <sub>2</sub> -N	NO <sub>3</sub> -N	N <sub>ges.</sub>
Zulauf	mg/l	1287	550	77	0	0	77
Ablauf	mg/l	47	8	< 2	0,03	5,8	7,8
<b>Abbau</b>		<b>96%</b>	<b>99%</b>	<b>97,4%</b>	-	-	<b>89,9%</b>

Tabelle 7 - mittlere Ablaufwerte Biofilm+Belebtschlammversuche - Versuchsphase 1

Die mittleren Ablaufwerte zeigen, dass die angestrebten Reinigungsziele, erhöhte Grundreinigung mit Nitrifikation und Denitrifikation, nahezu problemlos und stabil erreicht wurden.

#### 4.2.1.8 Bewertung der Versuchsphase

Mit der Verfahrenskombination verwirbelbare Biofilmbiologie + Belebibiologie kann das Abwasser auch in dezentralen Haus- und Kleinkläranlagen mit geringem technologischen Aufwand in ähnlichem Maße wie in Großkläranlagen gereinigt werden.

#### 4.2.2 Versuchsphase 2 - Grundreinigung mit Nitrifikation, Denitrifikation und Bio-P

**Reinigungsziel:** Erhöhte Grundreinigung mit Nitrifikation, Denitrifikation und biologischer Phosphorelimination

$BSB_5 \leq 20 \text{ mg/l}$        $CSB \leq 90 \text{ mg/l}$  /  $NH_4\text{-N} \leq 10 \text{ mg/l}$ ,

$N_{\text{anorg.}} \leq 18 \text{ mg/l}$        $P \quad 3 - 4 \text{ mg/l}$

Bei den bisherigen Versuchen konnte nachgewiesen werden, dass mit der Verfahrenskombination verwirbelbare Biofilmbiologie + Belebibiologie die organischen Inhaltsstoffe und Stickstoff auch in dezentralen Haus- und Kleinkläranlagen in ähnlichem Maße wie in Großkläranlagen abgebaut werden können. In der anschließenden Versuchsserie wurde zusätzlich auch eine weitergehende biologische Elimination von Phosphor angestrebt.

Biologische Prozesse mit weitergehender Phosphorelimination sind dann zu erwarten, wenn in den Verfahrensablauf Versäuerungsstufen integriert werden. In dem anaeroben Milieu dieser Stufen werden höhermolekulare organische Stoffe hydrolytisch in niedermolekulare Verbindungen aufgespalten. Diese Nährstoffe werden in dem anaeroben Milieu von phosphorspeichernden Mikroorganismen aufgenommen. Auf diese Weise wird das Wachstum dieser speziellen Organismen begünstigt.

#### Die Verfahrensführung wurde folgendermaßen verändert:

- Die Zeitdauer für Nitrifikation (Belüftung) wurde reduziert.
- Die unbelüftete Phase nach dem Abwasseraustausch wurde verlängert.
- Die Denitrifikationsstufen wurden verlängert

Durch diese verfahrenstechnischen Änderungen wurden Versäuerungsprozesse und somit eine weitergehende biologische Elimination begünstigt.

In nachfolgender Tabelle sind die Schaltzeiten des Reaktors bei der Zielstellung erhöhte Grundreinigung mit Nitrifikation, Denitrifikation und biologischer Phosphorelimination dargestellt.

## 4.2.2.1 Zyklusprotokoll N-Elimination + Bio-P

Tageszeit	Denitrifikation	Bio-P	Nitrifikation	Abwasser	BSB <sub>5</sub> -Fracht
	h	h	h	% - m <sup>3</sup> /h	kg / h
06 - 07	1,0	-	-	9 - 0,34	0,157
07 - 08	1,0	-	-	9 - 0,34	0,157
08 - 09	-	1,0	-	9 - 0,34	0,157
09 - 10	-	0,5	0,5	5 - 0,19	0,087
10 - 11	-	-	1,0	5 - 0,19	0,087
11 - 12	-	-	1,0	5 - 0,19	0,087
12 - 13	1,0	-	-	7 - 0,27	0,112
13 - 14	1,0	-	-	7 - 0,27	0,112
14 - 15	-	1,0	-	7 - 0,27	0,112
15 - 16	-	0,5	0,5	1 - 0,04	0,018
16 - 17	-	-	1,0	1 - 0,04	0,018
17 - 18	-	-	1,0	1 - 0,04	0,018
18 - 19	1,0	-	-	7 - 0,27	0,112
19 - 20	1,0	-	-	7 - 0,27	0,112
20 - 21	-	1,0	-	7 - 0,27	0,112
21 - 22	-	-	1,0	5 - 0,19	0,087
22 - 23	1,0	-	-	5 - 0,19	0,087
23 - 24	1,0	-	-	3 - 0,11	0,050
24 - 01	-	-	1,0	0 - 0	0
01 - 02	-	-	1,0	0 - 0	0
02 - 03	-	-	1,0	0 - 0	0

Tabelle 8 - Zyklusprotokoll Biofilm+Belebtschlammversuche - Versuchsphase 2

- Sedimentationsphase 03:00-04:30 (1,5 h)
- Entnahmephase 04:30-06:00 (1,5 h)
- Reaktionszeiten:
  - Denitrifikation 8 h = 38 %
  - Versäuerungsstufe (Bio-P) 4 h = 19 %
  - Nitrifikationsstufe 9 h = 43 %
- Sedimentation/Entnahme 3 h
- $V_D / V_{BB}$  8 h / 21 h = 38 %
- $V_D + V_{Bio-P} / V_{BB}$  12 h / 21 h = 57 %

Der SB-Reaktor wurde in der beschriebenen Form über einen Zeitraum von mehreren Wochen betrieben. Die mittleren Ergebnisse sind nachfolgend dargestellt.

#### 4.2.2.2 Versuchsergebnisse

		<b>CSB</b>	<b>BSB<sub>5</sub></b>	<b>NH<sub>4</sub>-N</b>	<b>P<sub>ges.</sub></b>
Zulauf	mg/l	1287	550	77	18,7
Ablauf	mg/l	48	12	< 2,0	5,9
<b>Abbau</b>		<b>96%</b>	<b>98%</b>	<b>97%</b>	<b>68%</b>

Tabelle 9 - mittlere Ablaufwerte Biofilm+Belebtschlammversuche - Versuchsphase 2

#### 4.2.2.3 Bewertung der Versuchsphase

Die organischen Stoffe (CSB = 48 mg/l, BSB = 12 mg/l) wurden in hohem Maße eliminiert. Nahezu vollständig wurde NH<sub>4</sub>-N oxidiert. Die Elimination von Phosphor war mit 68 % hoch, entsprach jedoch nicht den Erwartungen von 3 - 4 mg/l.

Zur weiteren Optimierung der biologischen Phosphorelimination wären weitere Anpassungsversuche erforderlich gewesen. Diese konnten aus Zeitgründen jedoch nicht mehr durchgeführt werden. Aus den Ergebnissen ist erkennbar, dass durch weitere Verkürzung der aeroben und Verlängerung der anoxisch-anaeroben Phasen, die bereits guten Eliminationsraten noch erhöht werden können.

Einzelwerte deuten an, dass Eliminationsraten zwischen 75 - 80 % erreichbar sind. Werden Ablaufwerte von 2 - 3 mg P/l angestrebt, dann müssen die Aufwuchskörpermenge und der anoxisch-anaerobe Anteil erhöht und die Zulaufbelastung reduziert werden.

## 5. Versuchsphase Winterbetrieb ( $t_w < 10 \text{ °C}$ )

Da in Belebstanlagen bei niedrigen Temperaturen der Austrag an Nitrifikanten höher als deren Reproduktionsrate ist, kommt es im Winter zu einem Leistungsabfall bei der Stickstoffelimination. Bei Biofilmbiologie werden die Organismen, u.a. auch Nitrifikanten, unabhängig von Temperatur und Reproduktionsgeschwindigkeit mit den Aufwuchskörpern im Reaktor zurückgehalten.

Durch den Einsatz von Biofilmbiologie in Belebstanlagen besteht somit die Möglichkeit den Temperaturbedingten Leistungsabfall bei der Stickstoffelimination zu verhindern oder zumindest zu mindern. Diese Annahme sollte durch Fortführung der Versuche bis in den Temperaturbereich unter 10 °C geprüft werden.

In nachfolgender Tabelle sind mittlere Ablaufwerte bei unterschiedlichen Temperaturbereichen dargestellt:

Temperatur	CSB	NH <sub>4</sub> -N	N <sub>ges.</sub>	o-P
°C	mg/l	mg/l	mg/l	mg/l
15 - 18	47	2,0	5,8	4,7
12 - 15	50	2,0	9,0	3,2
8,6 - 9,5	54	2,0	11,0	6,5

Tabelle 10 - mittlere Ablaufwerte bei T < 10°C

### Entwicklung NH<sub>4</sub>-N in Abhängigkeit der Abwassertemperatur

(Meßbereich der NH<sub>4</sub>-N Küvettentestkits: 2,0-47 mg/l)

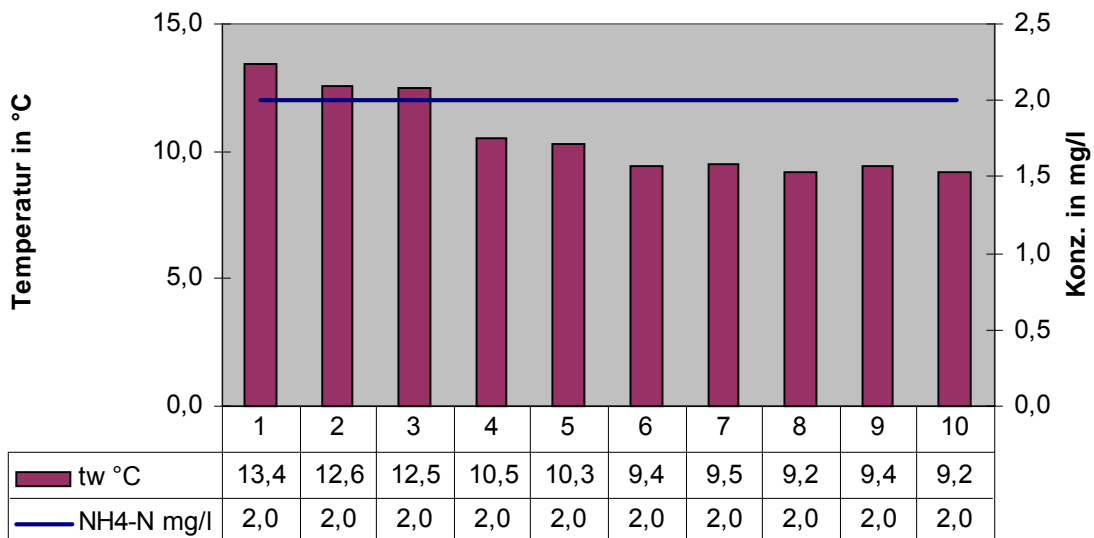


Abbildung 5 - Korrelation Ablauf NH<sub>4</sub>-N - Temperatur

### Entwicklung N<sub>anorg.</sub> in Abhängigkeit der Abwassertemperatur

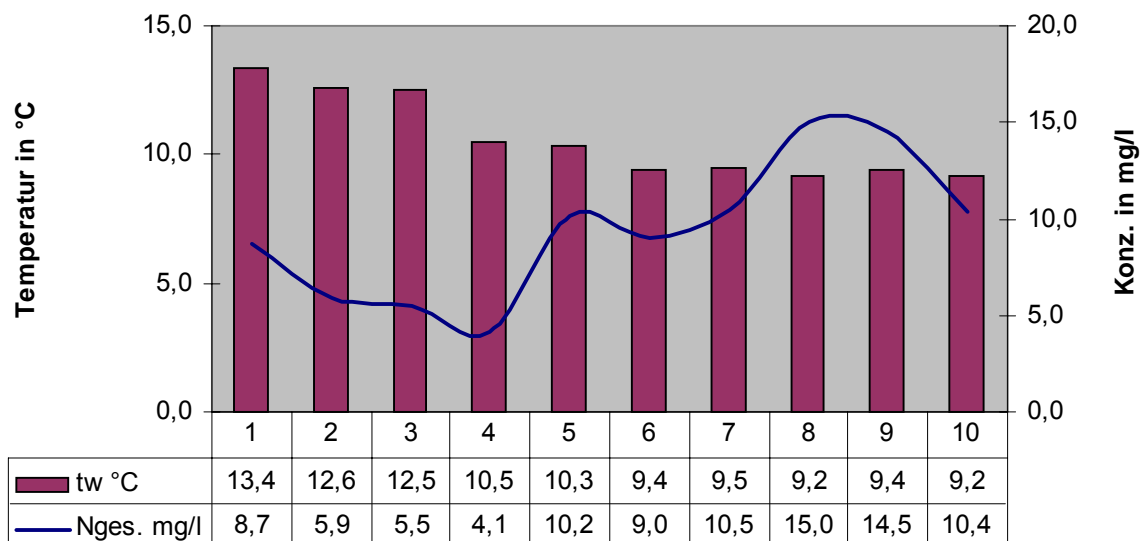


Abbildung 6 - Korrelation Ablauf N<sub>anorg.</sub> - Temperatur



### Entwicklung o-P in Abhängigkeit der Abwassertemperatur

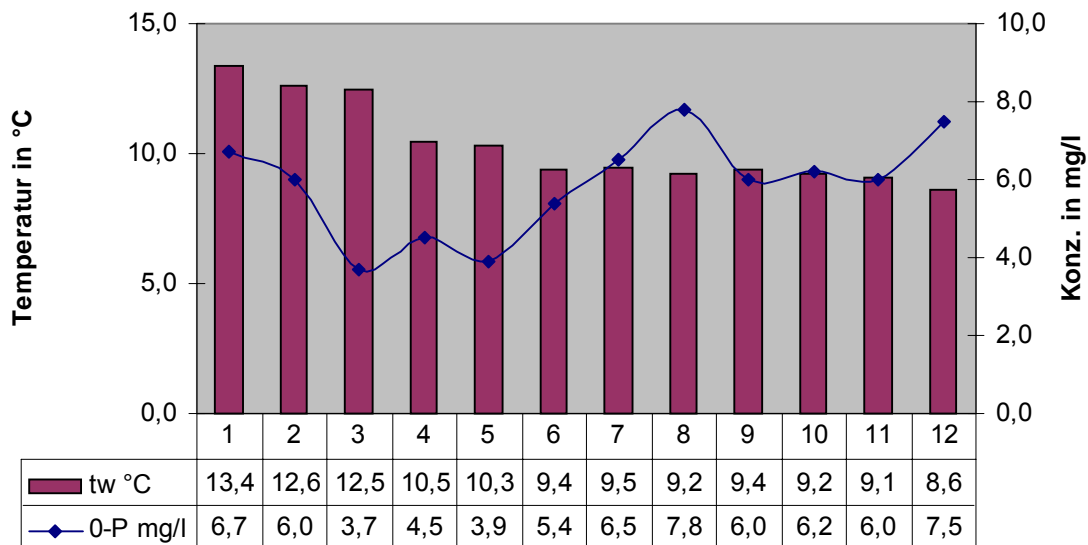


Abbildung 7 - Korrelation Ablauf o-P - Temperatur

Die Gegenüberstellung der bei verschiedenen Temperaturbereichen gemessenen Ablaufwerte zeigt, dass die Temperatur keinen deutlichen Einfluss auf die Nitrifikation und den Abbau organischer Stoffe hat. Die Summe der anorganischen Stickstoffverbindungen steigt bei niedrigen Temperaturen geringfügig an. Der für Großkläranlagen festgelegte Grenzwert ( $N_{\text{anorg.}} = 18 \text{ mg/l}$ ) wird jedoch nicht annähernd erreicht.

Es kann angenommen werden, dass durch die Verfahrenskombination Biofilm- und Belebtechnologie in Kläranlagen aller Anschlussgrößen eine ganzjährige, weitergehende Elimination von Stickstoff möglich wird.

## 6. Schlammanfall, Schlammstabilisierung

Es wurden bezüglich Schlammsynthese von Biofilmbiologie zwei Belastungsstufen ausgewertet.

### 6.1 Schlammsynthese Biofilmversuche bei BSB-Flächenbelastungen um $5 \text{ g BSB/m}^2\cdot\text{d}$

Reinigungsziel: Grundreinigung mit weitgehender Nitrifikation

- Nutzvolumen SB-Reaktor	9,3 m <sup>3</sup>
- Abwasseraustauschmenge	8,7 m <sup>3</sup> /d
- BSB <sub>5</sub> -Konzentration, Zulauf	0,465 kg/m <sup>3</sup>
- abfiltr. Stoffe, Zulauf	0,376 kg/m <sup>3</sup>

-	BSB <sub>5</sub> -Fracht, Zulauf	0,465 * 8,7 m <sup>3</sup>	4,04 kg BSB/d
-	BSB <sub>5</sub> -Fracht, Ablauf	0,015 * 8,7 m <sup>3</sup>	0,13 kg BSB/d
-	BSB <sub>5</sub> -Abbau	4,04 - 0,13	3,91 kg BSB/d
-	abfiltr. Stoffe nach Neufüllung	912 g/m <sup>3</sup> * 9,3	8,48 kg TS
-	abfiltr. Stoffe nach 22 h Belüftung	1190 g/m <sup>3</sup> * 9,3	11,06 kg TS
-	Zuwachs an abfiltr. Stoffen	11,06 - 8,48	<b>2,58 kg TS/d</b>

**Schlammssyntheserate**                      2,58 kg abf.St. / 3,91 kg BSB    **0,66 kg TS/kg BSB<sub>5</sub>**

Danach sind bei Einsatz verwirbelbarer Biofilmbiologie bei BSB-Flächenbelastungen um **4-5 g BSB<sub>5</sub>/m<sup>2</sup>\*d** pro 1 kg abgebauten BSB<sub>5</sub> **0,6 - 0,7 kg Schlamm (TS)** zu erwarten.

## 6.2 Schlammssynthese Biofilmversuche bei BSB-Flächenbelastungen um 9 g BSB/m<sup>2</sup>\*d

Reinigungsziel: Grundreinigung ohne Nitrifikation

-	Nutzvolumen SB-Reaktor		11,0 m <sup>3</sup>
-	Abwasseraustauschmenge		10,3 m <sup>3</sup> /d
-	BSB <sub>5</sub> -Konzentration, Zulauf		0,596 kg/m <sup>3</sup>
-	abfiltr. Stoffe, Zulauf		0,343 kg/m <sup>3</sup>
-	BSB <sub>5</sub> -Fracht, Zulauf	0,596 * 10,3 m <sup>3</sup>	6,14 kg BSB/d
-	BSB <sub>5</sub> -Fracht, Ablauf	0,019 * 10,3 m <sup>3</sup>	0,20 kg BSB/d
-	BSB <sub>5</sub> -Abbau	6,14 - 0,20	5,94 kg BSB/d
-	abfiltr. Stoffe nach Neufüllung	0,343 * 11 m <sup>3</sup>	3,77 kg TS
-	abfiltr. Stoffe nach 22 h Belüftung	0,768 * 11 m <sup>3</sup>	8,45 kg TS
-	Zuwachs an abfiltr. Stoffen	8,45 - 3,77	<b>4,68 kg TS/d</b>

**Schlammssyntheserate**                      4,68 kg abf.St. / 5,94kg BSB    **0,79 kg TS/kg BSB**

Danach werden bei Einsatz von Biofilmbiologie mit relativ hohen BSB-Flächenbelastungen um **9,0 g BSB<sub>5</sub>/m<sup>2</sup>\*d**) pro 1 kg abgebauten BSB<sub>5</sub> etwa **0,8 kg Schlamm (TS)** produziert.

## 6.3 Schlammssynthese Biofilm + Belebtschlamm

Entsprechende Untersuchungen mit Biofilmbiologie + Belebtsbiologie zum Schlammanfall über einen Zeitraum von 16 Tagen ergaben folgende mittlere Syntheseraten:

-	Abwasser-Austauschmengen		3,80 m <sup>3</sup> /d
-	BSB-Konzentration		0,55 kg/m <sup>3</sup>
-	BSB-Fracht Zulauf pro Tag	3,8 m <sup>3</sup> * 0,55	2,10 kg BSB/d
-	BSB <sub>5</sub> -Fracht, Ablauf	3,8 m <sup>3</sup> * 0,05	0,19 kg BSB/d
-	BSB <sub>5</sub> -Abbau	2,10 - 0,19	<b>1,91 kg BSB/d</b>
-	abfiltr. Stoffe, Zulauf		0,370 kg/m <sup>3</sup>
-	abfiltr. Stoffe, Ablauf		0,020 kg/m <sup>3</sup>
-	Fracht abfiltr. Stoffe, Zulauf	3,8 m <sup>3</sup> * 0,370	1,40 kg TS/d
-	Fracht abfiltr. Stoffe, Ablauf	3,8 m <sup>3</sup> * 0,020	0,08 kg TS/d
-	abfiltr. Stoffe im Schlamm	1,40 - 0,08	<b>1,32 kg TS/d</b>
-	Schlammanfall (Mittel 16 Tage)		0,158 m <sup>3</sup> /d
-	TS Schlamm pro m <sup>3</sup>		11,4 kg TS/m <sup>3</sup>
-	TS Schlamm pro Tag	0,158 * 11,4	<b>1,8 kg TS/d</b>
-	TS Schlamm aus BSB-Abbau	1,91 - 1,32	0,59 kg TS/d
-	Schlammanfall pro kg BSB	0,59 / 1,91	<b><u>0,31 kg TS/kg BSB</u></b>

#### 6.4 Schlammstabilität

Die Prüfung auf Geruchsstabilität des Überschussschlammes erfolgte in der Weise, dass Schlammproben (ca. 500 ml) bei Zimmertemperatur in geschlossenen Glasflaschen über einen mehrmonatigen Zeitraum gelagert wurden. In nahezu allen Proben blieb die Flüssigkeit über der Schlammschicht klar. Gasblasen, die auf nachträgliche Faulprozesse hinweisen, wurden selten beobachtet.

## 7. Denitrifikationstests

Um Kennwerte für die Denitrifikation von Aufwuchskörpern zu ermitteln, wurde im Winterhalbjahr ein kleintechnischer Denitrifikations-Versuchsreaktor gebaut und mit diesem orientierende Versuche durchgeführt.

#### Aufbau und Ausrüstung des DN-Reaktors

-	Nutzvolumen gesamt	0,70 m <sup>3</sup>
-	Aufwuchskörper	0,210 m <sup>3</sup>
-	Oberfläche Aufwuchskörper	ca. 150 m <sup>2</sup>

- Höhe des Schwebebettes ca. 40 cm
- Ausrüstungen Umwälzeinrichtung, Dosierpumpen

Dem langsam umgewälzten, getauchten Schwebebett wurden von oben mit Nitrat angereichertes Wasser und Methanol als C-Quelle, gleichmäßig über den Tag verteilt, zugeführt.

N g pro m <sup>2</sup> *d	N pro Tag	N pro h	Methanol / d	Methanol /h
1,0	153 g	6,4 g	460 g	19 g
1,5	230 g	10 g	690 g	30 g
2,0	306 g	13 g	920 g	38 g
2,5	382 g	16 g	1140 g	48 g

Tabelle 11 - Denitrifikationsversuche mit Methanol

Die Versuche wurden nur bei relativ niedrigen Temperaturen durchgeführt. Bei diesen Bedingungen wurde eine weitgehende Denitrifikation bei N-Flächenbelastungen von etwa 1,5 - 2,0 g N/m<sup>2</sup>\*d erreicht.

## 8. Betriebs- und Investitionskosten

### 8.1 Betriebskosten

Im Vergleich zu konventionellen SBR-Anlagen mit Belebtschlammbiologie, sind keine zusätzlichen Ausrüstungen erforderlich die einer Wartung bedürfen. Auch der Energiebedarf für Sauerstoffeintrag und Medientransporte ist nicht höher.

Bei der Schlamm Entsorgung sind durch niedrige Syntheseraten etwas geringere Kosten zu erwarten. Im Vergleich mit biologischen Haus- und Kleinkläranlagen mit Schlammrückführung liegen die Betriebskosten deutlich niedriger.

Durch den erhöhten Abbau von CSB, Stickstoff und Phosphor vermindern sich im Vergleich mit konventionellen Belebungsanlagen die kostenpflichtigen Schadeinheiten und somit die Betriebskosten insgesamt.

### 8.2 Investitionskosten

Durch die verfahrenstechnische Kopplung von zwei biologischen Verfahren kann der SB-Reaktor bei vergleichbaren Reinigungszielen deutlich höher belastet werden. Dies hat eine Einsparung an Beckenvolumen zur Folge. Diese Kosteneinsparung wird jedoch zum Teil durch die Herstellungskosten für Aufwuchsträger vermindert.

Im Vergleich mit konventionellen, nach DIN 4261 oder A 122 bemessenen biologischen Kläranlagen, ergeben sich durch den Wegfall der Nachkläreinrichtung deutlich geringere Investkosten.

---

## 9. Einschätzung zum Stand der Technik

Z. Zt. werden auf dem Markt keine Kläranlagen im unteren Anschlussbereich mit vergleichbaren Reinigungsleistungen angeboten. Eine weitergehende Stickstoffelimination durch Nitrifikation / Denitrifikation wird erst bei Kläranlagen ab einer Anschlussgröße von 5000 EW gefordert. Die weitergehende biologische Elimination von Phosphor ist Stand der Technik bei Kläranlagen ab der Anschlussgröße 20.000 EW.

Mit der zu erwartenden Übernahme der EU-Normen bei der Einleitung von Abwasser in Gewässer, werden künftig vor allem in „empfindlichen Gebieten“ deutlich höhere Anforderungen an die Reinigungsleistung von Kläranlagen des unteren Anschlussbereiches gestellt.

Die dann erforderlichen Reinigungsleistungen - einschließlich einer weitergehenden biologischen Elimination von Phosphor und Stickstoff - können mit der im Rahmen des F/E-Vorhabens entwickelten, modifizierten SBR-Technologie auch bei Kläranlagen im unteren Anschlussbereich gewährleistet werden.

Es wird daher vor allem von künftigen EU-Staaten ein erhöhtes Interesse zur Nachnutzung der Technologie über Lizenzen erwartet. Nach Erfahrungen von internationalen Messen besteht ein weltweiter Bedarf an technologisch einfachen, kleinen Kläranlagen mit weitergehender biologischer Abwasserreinigung. Es sind insbesondere auch jene Systeme gefragt, die eine separate Erfassung und Behandlung unterschiedlich verschmutzter Teilströme ermöglichen.

## 10. Literatur, Patente

- |     |   |  |
|-----|---|--|
| 1.  | Teichgräber, B.:  | "Belebungsanlagen mit Aufstaubetrieb - Bemessung und Anwendung". Korrespondenz Abwasser, 45. Jahrgang, Nr. 5, Mai 1998, Seite 886 ff.  |
| 2.  | Verschiedene:   | "Anlagen und Komponenten zur biologischen Abwasserbehandlung mit SBR-Anlagen (Aufstauanlagen)".<br>VDMA-Einheitsblatt 24427, 5. Entwurf  |
| 3.  | Wilderer, P. A.,<br>Morgenroth, E.:                                   | "Kontinuierliche und schubweise beschickte Belebungsanlagen: Gemeinsames und Gegensätzliches". 4. Abwassertagung des Verbandes Deutscher Maschinen- und Anlagenbau e.V..<br>Frankfurt/Main, November 1997                        |
| 4.  | Stania, K.,<br>Lehner, M.,<br>Haberl, R.:                             | "Denitrifikation in intermittierend betriebenen Belebungsanlagen (SBR)". Korrespondenz Abwasser, 44. Jahrgang, Nr. 1, Januar 1997, Seite 61 ff.  |
| 5.  | Döllerer, J.,<br>Kriebitzsch, K.,<br>Morgenroth, E.,<br>Wilderer, P.: | "SBR-Technologie". Erste internationale IAWQ-Konferenz über SBR-Technologie im März 1996 in München. Korrespondenz Abwasser, 43. Jahrgang, Nr. 6, Juni 1996, Seite 990 ff.   |
| 6.  | Schäfer, M.:  | "Kompakte Aufstauanlagen bis 5000 Einwohnerwerte".<br>Korrespondenz Abwasser, 44. Jahrgang, Nr. 12, Dezember 1997, Seite 2202 ff.  |
| 7.  | Verschiedene:   | "Belebungsanlagen mit Aufstaubetrieb". ATV-Regelwerk Abwasser-Abfall, Merkblatt M 210, September 1997.   |
| 8.  | Holm, N.C. et.al.:  | "Betriebs- und großtechnische Versuchsergebnisse mit dem DIC-SBR-Verfahren auf der Kläranlage Bruchmühlen". Korrespondenz Abwasser, 47. Jahrgang, Nr. 1, Januar 2000, Seite 73 ff.   |
| 9.  | EvU <sup>®</sup> -GmbH:   | "Einbeckenkläranlage". Patentschrift DE 196 21 447 C 2. Patentinhaber EvU <sup>®</sup> -Entwicklung von Umwelttechnik GmbH   |
| 10. | Verschiedene:   | "ATV A 131- Bemessung von einstufigen Belebungsanlagen". Gesellschaft zur Förderung der Abwassertechnik e.V. St. Augustin 1999   |
| 11. | Verschiedene:   | "Arbeitsbericht der ATV-Arbeitsgruppe 2.2.6, Biologische Phosphorentfernung". Korrespondenz Abwasser, Nummer 3, März 1989.   |
| 12. | Verschiedene:   | 6. Arbeitsbericht der Arbeitsgruppe 2.6.3. „Tropf- und Tauchkörper“, Korrespondenz Abwasser, 11, 1996.   |
| 13. | Verschiedene:   | Rahmen-Abwasser-VwV., Anhang 1, 1990, Mindestanforderungen an das Einleiten von Abwasser in Gewässer.  |
| 14. |   | DIN 4261, Teil 2, Kleinkläranlagen mit Abwasserbelüftung   |
| 15. | Koch, T.:   | Arbeitsbericht: Testung einer Einbecken-Kläranlage nach dem SBR-Prinzip mit Belebtschlamm- und verwirbelbare Biofilmbiologie. Förderung: Deutsche Gesellschaft für Chemische Technik und Biotechnologie, 1999, unveröffentlicht. |
| 16. | Müller, O.,<br>Emme H.:   | Zur Leistungsfähigkeit von Kläranlagen bis 500 EW im ländlichen Raum Korrespondenz Abwasser, 1, 1996   |

- 
- |     |                        |   |
|-----|------------------------|---|
| 17. | Peukert, V.:           | Weitergehende Abwasserreinigung in Haus- und Kleinkläranlagen, KA-Wasserwirtschaft, Abwasser, Abfall 12, 2001 |
| 18. | Verschiedene:          | Abwassertagesganglinie, Zulassungsprüfung Kleinkläranlagen, Korrespondenz Abwasser, 10, 2000, S. 1475.        |
| 19. | EvU <sup>®</sup> -GmbH | Informationsmaterial Aufwuchskörper, EvU-GmbH, 2002   |
-

## 11. Anhang

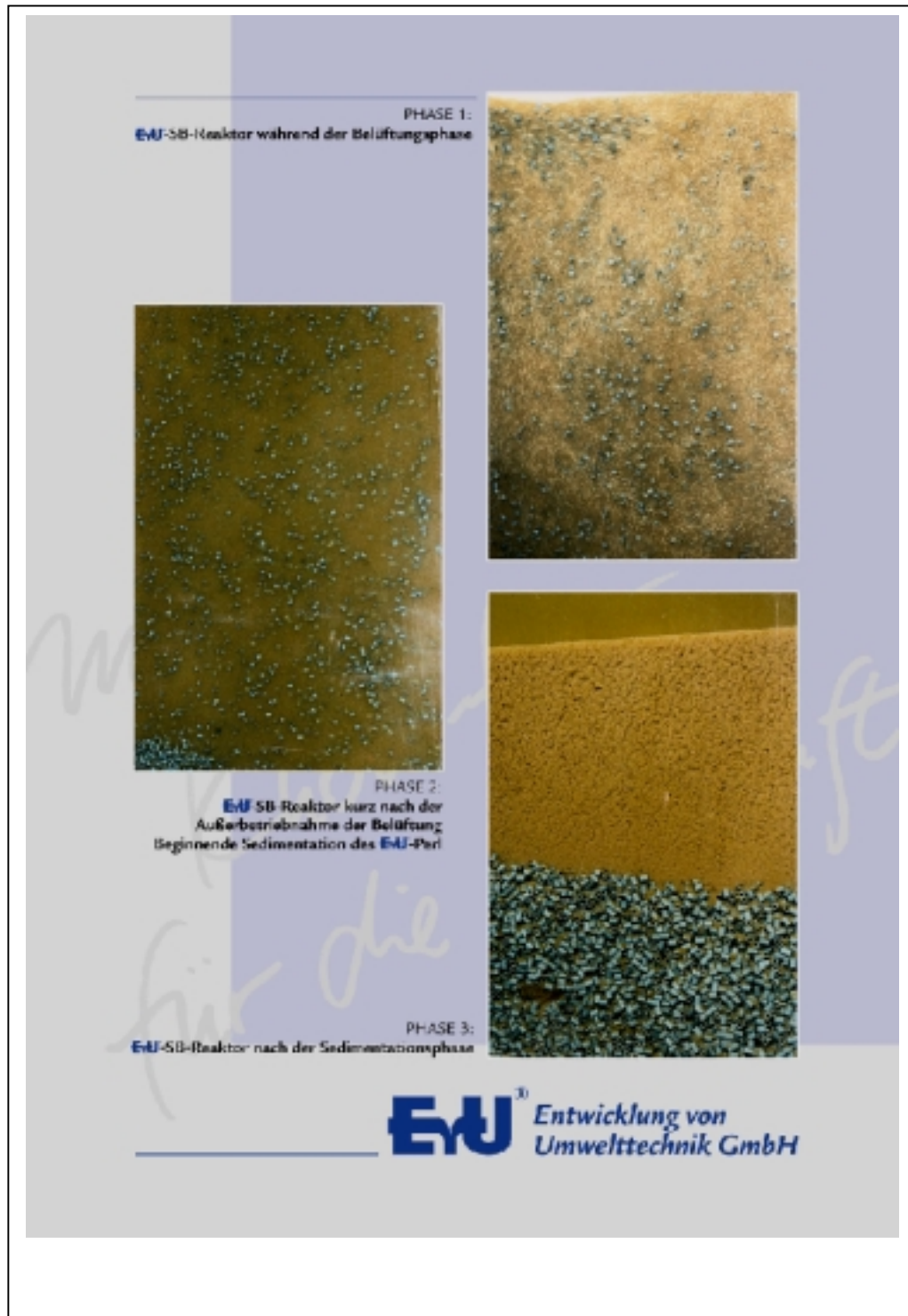


Abbildung 8 - Infoblatt SBBR-Verfahren