

- DENIOPT -

**Optimierung eines neuen, innovativen Denitrifikations-Verfahrens für eine effiziente und
sichere Anwendung in der marinen sowie limnischen
Kreislauf-Aquakultur**

(AZ: 31426/01)

Abschlussbericht

Bewilligungsempfänger und Projektleitung:

Dr. Jan Schröder

Gesellschaft für Marine Aquakultur mbH

Hafentörn 3

25761 Büsum

Verfasser:

Johann Torno (GMA)

Büsum, Oktober 2015

gefördert durch



www.dbu.de

Projektkennblatt
der
Deutschen Bundesstiftung Umwelt



Az	31426/01	Referat	23	Fördersumme	124.734 €
----	-----------------	---------	-----------	-------------	------------------

Antragstitel **Optimierung eines innovativen Denitrifikations-Verfahrens für eine effiziente und sichere Anwendung in der marinen sowie limnischen Kreislauf-Aquakultur**

Stichworte Aquakultur, Wasser, Verfahren, Reaktor, Stickstoff, Energieeffizienz

Laufzeit	Projektbeginn	Projektende	Projektphase(n)
12 Monate	26.08.2014	25.08.2015	1

Zwischenberichte

Bewilligungsempfänger	Gesellschaft für Marine Aquakultur mbH Hafentörn 3 25761 Büsum www.gma-buesum.de	Tel: 04834- 965 399 15 Fax 04834- 965 399 99
		Projektleitung Dr. Jan Schröder
		Bearbeiter

Kooperationspartner Kunststoff-Spranger GmbH
Reissiger Gewerbering 9
08525 Plauen

Zielsetzung und Anlass des Vorhabens

Im Rahmen des Projektes AZ 28133 konnte ein wartungsarmes, stabil arbeitendes Denitrifikations-Verfahren auf Basis der Bewegtbett-Technologie entwickelt und für den effizienten Einsatz in Süßwasser-Aquakultursystemen erprobt werden. Da sich marine und limnische Aquakultur-Kreislaufsysteme in vielerlei biotischer und abiotischer Parameter grundlegend voneinander unterscheiden, bedarf es einer verfahrenstechnischen Anpassung der entwickelten Denitrifikationsstufe an Salzwasserbedingungen. Ziel des Vorhabens ist daher die Optimierung des Verfahrens für den effizienten Einsatz in der marinen Kreislauf-Aquakultur und somit die Erschließung eines zunehmend bedeutenden Anwendungsbereiches.

Darstellung der Arbeitsschritte und der angewandten Methoden

Der im Rahmen des Projektes AZ 28133 entwickelte Selbstreinigende Inertgas Denitrifikations-Reaktor (SID-Reaktor) wird in eines der Salzwasser-Kreislaufsysteme im Technikumsmaßstab (40 m³ Wasservolumen) der Gesellschaft für Marine Aquakultur integriert und im Dauerbetrieb unter marinen Produktionsbedingungen getestet, sowie hinsichtlich seiner Betriebsparameter für einen optimierten Betrieb in Salzwasser-Systemen angepasst. Zur Beurteilung der Effekte werden relevante Wasserqualitätsparameter wie O₂, CO₂, pH, Alkalinität, Trübung, Redoxpotential, Stickstoffverbindungen (TAN, NO₂-N, NO₃-N), etc., aber auch mikrobiologische Parameter (Gesamtbakterien-Zellzahl, bakterielle Arten-zusammensetzung des Denitrifikations-Biofilms sowie des Prozesswassers), sowie Gesundheits- und Leistungsparameter der kultivierten Fischart (z.B. Krankheitsbefall, Futteraufnahme, etc.) analysiert und ausgewertet. Auf Basis dessen werden relevante Bemessungsgrundlagen wie die maximal erzielbare Denitrifikationsrate, das daraus resultierende Wasser- und Energie-Einsparungspotential, der Biomasse-Zuwachs, oder das Potential zur Rückgewinnung von Härte-Äquivalenten ermittelt und eine abschließende Beurteilung der Umweltentlastung sowie der Wirtschaftlichkeit des Verfahrens für den Einsatz in marinen Aquakultur-Kreislaufsystemen vorgenommen.

Ergebnisse und Diskussion

Nach der fachgerechten Installation des SID-Reaktors an eines der Kreislaufsysteme der GMA wurde der SID-Reaktor unter der Dokumentation relevanter Parameter in Betrieb genommen. Während der stufenweise aufgebauten Inbetriebnahme wurden erste systemspezifische Kenngrößen (Verweilzeit, hydraulische Beaufschlagung, Menge an zu-dosiertem Kohlenstoff etc.) erarbeitet und bewertet. Im Dauerbetrieb des Denitrifikationsreaktors wurden im Rahmen einer 6 Monatigen Testphase 3 unterschiedliche Retentionszeiten (2, 4 & 6 h) untersucht. Alle getesteten Retentionszeiten zeigten stabile Denitrifikationsraten von 281, 198 und 229 g NO₃-N pro Tag und m³ Aufwuchskörper, welche zu einer Nitrat Reduktion im System führten. Die potentiell effektivste Retentionszeit von 2 h wurde unter erhöhter Stickstofflast untersucht, wobei die Nitrat-Reduktion weiter erhöht werden konnte (510 g NO₃-N/d*m³). Eine maximale Denitrifikationsrate bzw. eine potentielle obere Grenze in der Denitrifikationsleistung konnte noch nicht ermittelt werden. Diese Grenze soll in weiteren Untersuchungen definiert werden. Nach einem kontrollierten Abschalten des SID-Reaktors unter der Dokumentation relevanter Betriebs- und Wasserparameter konnten diverse negative Auswirkungen auf den Betrieb der Kreislaufanlage beobachtet werden. Ein starker Abfall des Säurebindungsvermögens und des damit verbundenen pH-Wertes musste durch erhöhte Natriumbikarbonat Gaben von 0,09 auf 0,22 kg NaHCO₃ pro kg Futter und Tag erhöht werden. Das mikrobielle Monitoring des anaeroben SID-Reaktors und des aeroben Moving-Bed-Biofilm-Reaktor (MBBR) konnte zeigen, dass eine diverse Bakteriengemeinschaft zu stabilen und kontinuierlichen Denitrifikationsprozessen trotz sich ändernder Betriebsparameter führte. Durch Messungen der Bakterienaktivität konnte dokumentiert werden, dass während des Betriebs des SID-Reaktors die Bakterienaktivität im Haltungswasser im Vergleich zum Betrieb ohne SID-Reaktor reduziert war.

Öffentlichkeitsarbeit und Präsentation

Die Projektergebnisse wurden/werden bislang in 3 Fachvorträgen auf nationalen und internationalen Seminaren und Konferenzen (Institut für Tierzucht und Tierhaltung, Christian-Albrechts-Universität zu Kiel; 6. Büsumer Fischtag, mariCUBE Büsum; Aquaculture Europe 2015; EAS Rotterdam) präsentiert. Zudem wurden im Rahmen des Projektes bereits eine Projektierungsarbeit, eine Bachelorarbeit und eine Masterarbeit angefertigt.

Fazit

Die Ergebnisse aus den Untersuchungen zeigen deutlich ein hohes Potential des SID-Reaktors für die sichere und effiziente Nitrat Elimination aus kreislaufgeführten marinen Aquakulturanlagen. Jedoch besteht noch Bedarf an Optimierungen, die in der zweiten Projektphase umgesetzt werden sollen. So konnten in der ersten Projektphase die oberen Grenzen der Denitrifikationsleistung noch nicht ermittelt werden. Auch sollten einige betriebsrelevante Parameter, wie z.B. optimales Umwälzintervall und -dauer der Aufwuchskörper, näher untersucht werden. Ebenfalls wird eine Beurteilung alternativer Kohlenstoffquellen angestrebt, um einen noch sichereren Betrieb zu gewährleisten. Eine Beurteilung des SID-Reaktor Einsatzes inklusive einer ökologischen und ökonomischen Bilanzierung würde die zweite Projektphase abschließen.

Inhaltsverzeichnis

Verzeichnis der Abbildungen	I
Verzeichnis der Tabellen	II
Verzeichnis der Abkürzungen.....	III
1 Zusammenfassung	1
2 Einleitung.....	2
3 Vorhabensdurchführung und –ergebnisse	3
3.1 Tierwohl und Tiergesundheit	3
3.2 Material und Methoden.....	4
3.2.1 Aufbau des Selbstreinigenden Inertgas Denitrifikations Reaktors (SID-Reaktor) und Integration in eine bestehende Kreislaufanlage.....	4
3.2.2 Parametererfassung	6
3.3 Ergebnisse	7
3.3.1 Arbeitspaket 1 - Aufbau und Vorbereitung	7
3.3.2 Arbeitspaket 2 - Verfahrenstechnische Anpassung des SID- Reaktors für die marine Aquakultur.....	8
3.3.3 Arbeitspaket 3 - Bakteriengemeinschaft und Aktivität	20
4 Fazit	28
5 Literaturverzeichnis.....	30

Verzeichnis der Abbildungen

Abb. 1: SID-Reaktor inklusive Schemazeichnung.....	5
Abb. 2: Schemazeichnung. 40 m ³ Kreislaufanlage.	6
Abb. 3 Inbetriebnahme des SID-Reaktors. Durchfluss, Sauerstoffsättigung und ORP im SID-Reaktor Ablaufwasser. Zeitpunkte der Zugabe von Aufwuchskörpern und einer Kohlenstoffquelle (MeOH) in den SID-Reaktorraum sind durch vertikale Pfeile gekennzeichnet.	7
Abb. 4: Nitrat-N Konzentration im SID-Reaktor Zulauf und Ablauf.	12
Abb. 5: Vergleich der prozentualen Anteile der einzelnen Hauptgruppen-Populationen an der Gesamtlebendzellzahl der drei Beprobungszeitpunkte.	23
Abb. 6: Bakterienaktivität im Wasser der Haltungseinheiten und im Zulaufes und Ablauf des SID-Reaktors. Die Zahlen auf der X-Achse kennzeichnen die Retentionszeit. -SID: ohne SID-Reaktor; +SID: mit SID-Reaktor; -N: ohne zusätzliche Stickstoffquelle; +N: mit zusätzlicher Stickstoffquelle.	27

Verzeichnis der Tabellen

Tab. 1: Phase I. Zentrale Betriebsparameter des SID-Reaktors.....	10
Tab. 2: Phase I. Denitrifikationsleitung. ¹ Bezogen auf 1 m ³ Aufwuchskörperbett.....	11
Tab. 3: Phase I. Gesamt Ammoniak Stickstoff (TAN) und Nitrit Konzentrationen im Zu- und Ablaufwasser des SID-Reaktors.	13
Tab. 4: Phase I. pH-Wert und Säurebindungsvermögen (SBV).....	14
Tab. 5: Phase I. Gesamtmenge an Futter und NaHCO ₃ inklusive der NaHCO ₃ Einsparung für den aeroben Biofilter und den SID-Reaktor bei jeweiliger Retentionszeit.	14
Tab. 6: Phase II. Zentrale Betriebsparameter des SID-Reaktors.....	15
Tab. 7: Phase II. Denitrifikationsleistung unter erhöhter N-Last. ¹ Bezogen auf 1 m ³ Aufwuchskörperbett.....	16
Tab. 8: Phase II. Gesamt Ammoniak Stickstoff (TAN) und Nitrit Konzentrationen im Zu- und Ablaufwasser des SID-Reaktors.	16
Tab. 9: Phase II. pH-Wert und SBV.	17
Tab. 10: Phase II. Futtermenge pro Tag und NaHCO ₃ Gabe inklusive der NaHCO ₃ Einsparung für den SID-Reaktor bei jeweiliger Retentionszeit.....	17
Tab. 11: Phase III. Nitrat-N Konzentration im Haltungswasser. +SID = SID-Reaktor im Betrieb; -SID = SID Reaktor nicht im Betrieb; + N =Zugabe einer zusätzlichen Stickstoffquelle.	18
Tab. 12: Phase III. Gesamt Ammoniak Stickstoff (TAN) und Nitrit Konzentration im Haltungswasser. +SID = SID-Reaktor im Betrieb; -SID = SID Reaktor nicht im Betrieb; + N = Zugabe einer zusätzlichen Stickstoffquelle.	19
Tab. 13: Phase III. pH-Wert und Säurebindungsvermögen (SBV).	20
Tab. 14: Phase III. Gesamtmenge an Futter und NaHCO ₃ inklusive der NaHCO ₃ Einsparung für den aeroben Biofilter und den SID-Reaktor bei jeweiligem Reaktorbetrieb.....	20
Tab. 15: Gesamtzellzahl und Lebendzellzahl des Biofilms auf den Aufwuchskörpern (AK).....	21

Verzeichnis der Abkürzungen

%	Prozent
AFU	arbitrary fluorescence units
CV	Variationskoeffizient
d	Tag
h	Stunde
kW	Kilowatt
L	Liter
m ³	Kubikmeter
Max	Maxima
mbar	Millibar
MBBR	Moving Bed Biofilm Reactor = Bewegbett Biofilm Reaktor
MeOH	Methanol – CH ₄ O
mg	Milligramm
Min	Minima
ml	Milliliter
mmol	Millimol
mV	Millivolt
MW	Mittelwert
N	Stickstoff
O ₂	Sauerstoff
RAS	Rezirkulierendes Aquakultur System
SBV	Säurebindungsvermögen bzw. Alkalinität
SD	Standardabweichung (Standard Deviation)
SID-Reaktor	Selbstreinigender Inertgas Denitrifikations-Reaktor
TAN	Gesamt Ammoniak Stickstoff (Total Ammonium Nitrogen)

1 Zusammenfassung

Basierend auf den Ergebnissen aus dem DBU Forschungsvorhaben AZ 28133 „Förderinitiative Aquakultur: Entwicklung eines Verfahrens zur Denitrifikation in geschlossenen Kreislaufanlagen zur Fischerzeugung unter Verwendung eines modifizierten Niedrigenergie-Moving-bed-Filters“ durchgeführt in den Jahren 2010 bis 2012 wurde der Betrieb des modifizierten Filtersystems (**S**elbstreinigender **I**nertgas **D**enitrifikations Reaktor; SID-Reaktor) im aktuellen Vorhaben für den stabilen und sicheren Einsatz in der Aquakultur-Kreislauftechnik weiterentwickelt und optimiert. Der von der Fa. Kunststoff-Spranger GmbH konstruierte SID-Reaktor wurde an der Gesellschaft für Marine Aquakultur (GMA) mbH an eine geschlossene marine Kreislaufanlage im Technikumsmaßstab angeschlossen. Dabei waren im ersten Bewilligungszeitraum besonders folgende Arbeitspunkte Gegenstand der Untersuchungen:

- Aufbau und Integration des SID-Reaktors in eine bestehende, geschlossene Kreislaufanlage inklusive technischer Voreinstellungen
- Verfahrenstechnische Anpassungen
 - o Untersuchung unterschiedlicher hydraulischer Beaufschlagungen und deren Auswirkungen auf betriebsrelevante Wasserparameter
 - o Auswirkungen unterschiedlicher Nitrat Konzentrationen im System auf die Denitrifikationsleistung
 - o Folgen der Abschaltung des SID-Reaktors unter erhöhter Stickstoff Last im System
- Monitoring der Bakteriengemeinschaft und -aktivität im aeroben Biofilter und im SID-Reaktor

Die bisherigen Untersuchungen konnten zeigen, dass die Integration des SID-Reaktors in eine bestehende Kreislaufanlage schnell und unkompliziert bewerkstelligt werden kann. Unter den drei getesteten Retentionszeiten (2, 4 und 6 h) hat sich die geringste Retentionszeit von 2 h als die effektivste Einstellung herausgestellt und konnte unter erhöhter Stickstofflast von 427,3 g/d, was einer Futterlast von 9,3 kg/d entspricht, Nitrat-Abbauraten von 510 g NO_3^- -N/d*m³ Aufwuchskörper erzielen. Auch konnte gezeigt werden, dass der SID-Reaktor einen positiven Effekt auf die Stabilität von pH-Wert und SBV hat und dadurch eine Natriumbikarbonat Einsparung von bis zu 50 % ermöglicht.

Die Abschaltung des SID-Reaktors bzw. der Betrieb einer Anlage ohne Denitrifikationsstufe hat diverse negative Auswirkungen. So konnte beispielsweise ein starker Abfall des pH-Wertes und des SBV nach Abschaltung des SID-Reaktors dokumentiert werden. Zudem wurde ein angestiegener Verbrauch an Natriumbikarbonat pro eingesetztem kg Futter, erhöhte TAN, Nitrit-N und Nitrat-N Werte (mg/L) dokumentiert.

Die Untersuchungen zur Bakteriengemeinschaft und -aktivität konnten zeigen, dass die Bakterienpopulationen sowohl im aeroben Biofilter als auch in dem SID-Reaktor äußerst divers sind und somit zum stabilen Betrieb der gesamten Kreislaufanlage beitragen. Durch das Monitoring der Bakterienaktivität konnte ein positiver Effekt des SID-Reaktors auf die bakterielle Belastung des Haltungswassers festgestellt werden. So waren die Bakterienaktivität und damit schlussfolgernd auch die Bakterienanzahl unter dem Einsatz des SID-Reaktors im Haltungswasser reduziert.

2 Einleitung

Seit Dekaden steigt die globale Fischproduktion in Aquakultur Systemen kontinuierlich an, um die wachsende Nachfrage an Fisch als Nahrungsquelle und Rohmaterial zu decken. Dieser rasante Anstieg der Fischproduktion um 3,2 % pro Jahr (FAO Fisheries and Aquaculture Department 2014) bringt diverse Umwelt, Technik und Ökonomie relevante Herausforderungen mit sich. Ein möglicher Weg, ressourcen- und umweltschonend Fisch zu produzieren, sind **Rezirkulierende Aquakultur Systeme (RAS)**. Die Hauptlimitierung in intensiven RAS ist die konstante Anreicherung an metabolischen Endprodukten wie z.B. Nitrat. Als Endprodukt der Nitrifizierung akkumuliert Nitrat im Prozesswasser und kann das Fischwachstum beeinflussen (van Bussel et al. 2012). Die Nitrat Akkumulation verhindert daher eine weitere Reduktion des Frischwasserbedarfs und somit auch die Reduktion an Energiekosten und Nährstoffaustrag. Vor allem die Stickstoffverbindungen Ammonium, Nitrit und Nitrat tragen zur Stickstoffbelastung, und somit auch zur Eutrophierung eines Gewässers bei. Ferner können die Stickstoffverbindungen durch Sickerwasser ins Grundwasser gelangen und somit letzten Endes auch die Basis für unser Trinkwasser belasten. Neben der Belastung der Umwelt, sind steigende Kosten für die Frischwasserversorgung, Abwasserentsorgung und die damit verbundenen Energiekosten sowie die gesetzlichen Anforderungen an die Qualität des Ablaufwassers aus intensiven Fischproduktionseinrichtungen weiterhin Herausforderungen der Aquakultur.

Die effiziente und sichere Nitrat Elimination durch biologische Denitrifikation ist nach wie vor eine der wichtigsten Aufgaben in der RAS Entwicklung. Existierende konventionelle Denitrifikationsprozesse bringen häufig diverse Probleme mit sich, die einen effizienten, stabilen und wartungsarmen Betrieb verhindern. Einfach zu bedienende, wartungsarme und stabil arbeitende Denitrifikationsreaktoren können hier eine Lösung darstellen.

Im aktuellen Vorhaben wurde der **Selbstreinigende Inertgas Denitrifikations Reaktor (SID-Reaktor)**, ein neuartiger biologischer Bewegbett Denitrifikations-Reaktor, untersucht und für den effizienten und sicheren Einsatz in marinen RAS optimiert, um eine sichere Nitrat Elimination zu gewährleisten.

Im Rahmen der ersten Projektphase wurden, neben verfahrenstechnischer Optimierungen des Reaktors unter der Betrachtung von technischen Aspekten, auch wasserchemische (SBV, Gesamt Ammoniak Stickstoff (TAN), Nitrit, Nitrat, Sauerstoffgehalt, pH-Wert) und mikrobiologische Auswirkungen (Bakteriengemeinschaft, Bakterienaktivität, Abbauraten) des Reaktors auf das Prozesswasser untersucht. Die erfolgreiche Anpassung des entwickelten Verfahrens an Salzwasserbedingungen kann vielversprechend zur Erschließung des Anwendungsgebietes mariner Aquakultursysteme führen.

3 Vorhabensdurchführung und -ergebnisse

3.1 Tierwohl und Tiergesundheit

Die jahrelange Erfahrung der GMA Mitarbeiter in der Aufzucht und Haltung von Fischen in RAS gestattet einen verantwortungsvollen Umgang mit den Versuchstieren, wobei Tierwohl und -gesundheit während der gesamten Versuchszeit wichtige Aspekte darstellten. Durch den an der GMA tätigen Tierschutzbeauftragten, die Tierärztin und ein Fischwirt waren zu jeder Zeit fachkundige Ansprechpartner vor Ort, die alle laufenden Versuche begleiteten. Ferner war das Modul an eine Alarmierung angeschlossen, die die zentralen Parameter im Modul überwacht und bei abweichenden Werten oder im Notfall (Stromausfall etc.) den Bereitschaftsdienst, der jederzeit erreichbar ist, alarmierte.

Generell richten sich die zentralen Wasserparameter im aktuellen Vorhaben nach Werten, die für die Haltung von Wolfsbarschen (*Dicentrarchus labrax*) empfohlen werden (Moretti et al. 1999, Dülger et al. 2012) und sollten somit versuchstechnisch nicht verändert werden. Die Temperatur des Haltungswassers wurde während des gesamten Versuchszeitraumes zwischen 24 und 25 °C gehalten. Durch die Zugabe von technischem Sauerstoff lag der Sauerstoffgehalt im Haltungswasser >100 % Sättigung und durch die Zugabe von Natriumbikarbonat (NaHCO_3) wurde ein pH-Wert von 7,5 realisiert. Alle zentralen Wasserparameter werden generell in der täglichen Tagesroutine erfasst, sodass eine schnelle Reaktion auf sich verändernde Haltungsbedingungen möglich ist. Somit können Probleme in der Haltungstechnik schnell erkannt und behoben werden. Zudem wurden täglich Futteraufnahme und regelmäßig das Wachstum der Wolfsbarsche dokumentiert, um so weitere Parameter zu erhalten, die Rückschlüsse auf das Tierwohl ermöglichen.

3.2 Material und Methoden

3.2.1 Aufbau des Selbstreinigenden Inertgas Denitrifikations Reaktors (SID-Reaktor) und Integration in eine bestehende Kreislaufanlage

Der Aufbau des SID-Reaktors basiert auf einem optimierten Bewegbett-Reaktor der Fa. Kunststoff-Spranger mit einem Reaktor-Gesamtvolumen von 0,85 m³ (Abb. 1). Dabei fasst der Reaktor 0,75 m³ Haltungswasser und 0,45 m³ schwimmende Aufwuchskörper, die mit 859 m²/m³ eine Besiedelungsfläche von 386,5 m² bieten. Im Rahmen des Denitrifikationsprozesses bildet sich inertes Stickstoffgas, welches sich im oberen Teil des Reaktors sammelt und für die Umwälzung der Aufwuchskörper durch einen zeitgesteuerten Seitenkanalverdichter (0,55 kW) genutzt wird. Um die Umwälzung der Aufwuchskörper zu initiieren, wird das Seitenkanalverdichter automatisch für kurze Zeit bei voller Last (100 mbar Druck und 120 m³/h Förderleistung) und daraufhin folgend bei einer durch einen Potentiometer stufenlos einstellbaren, verminderten Förderleistung betreiben. Hierbei kann die Umwälzzeit und das Intervall frei gewählt werden. Durch die Bewegbett-Technologie und die Zirkulation des sauerstoffarmen Inertgases (Stickstoffgas) in einem geschlossenen Reaktorraum werden Voraussetzungen für einen stabilen anoxischen Denitrifikationsprozess ermöglicht. Ferner wird für den Denitrifikationsprozess eine Kohlenstoffquelle benötigt,

die automatisch über eine Dosiereinheit dem Zulaufwasser zugegeben wird. Die Dosiermenge kann hier ebenfalls nach Belieben eingestellt werden.

Für die Untersuchungen wurde der SID-Reaktor in eine bestehende Kreislaufanlage an der Gesellschaft für Marine Aquakultur (GMA) mbH integriert (Abb. 2). Der SID-Reaktor kann mit seiner kompakten Bauweise und unkomplizierten Anschlusstechnik einfach und schnell in ein bestehendes System integriert werden. Zu erwähnen ist auch, dass vorhandene Wasserleitungen verwendet werden können, sodass auf zusätzliche Pumpen und somit auch zusätzliche Energieverbraucher zur Wasserförderung verzichtet werden kann.

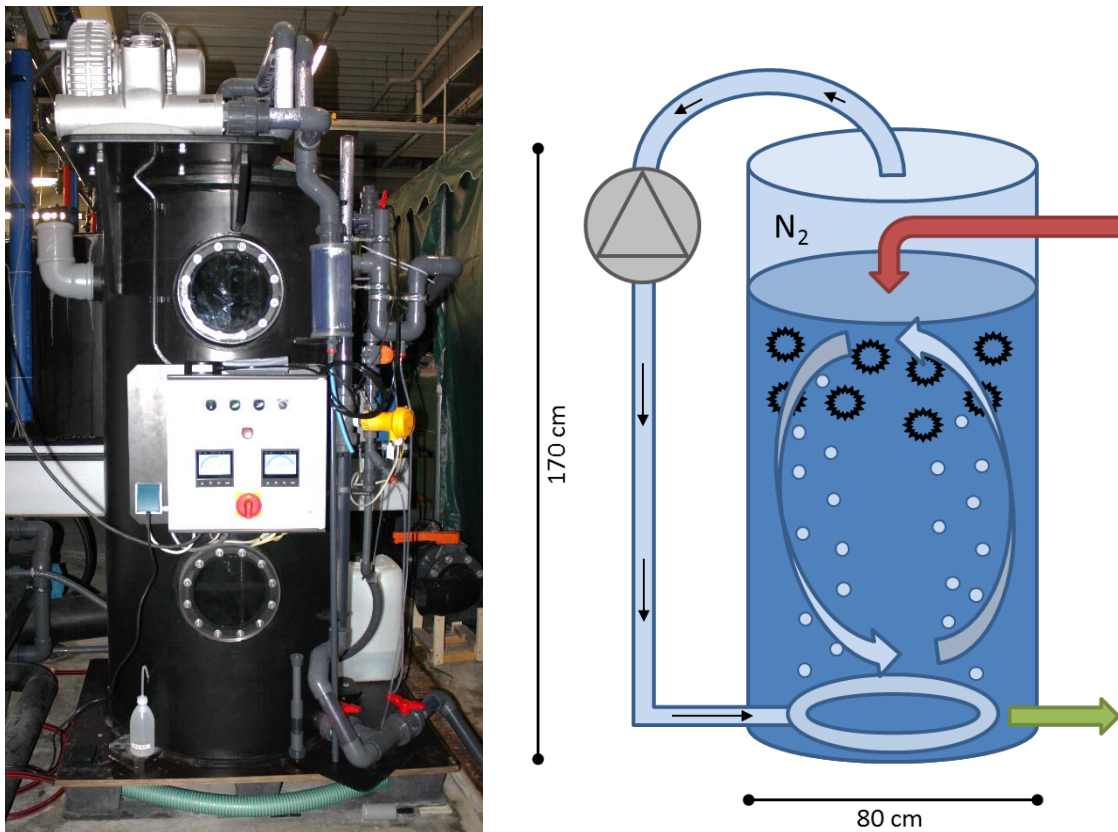


Abb. 1: SID-Reaktor inklusive Schemazeichnung.

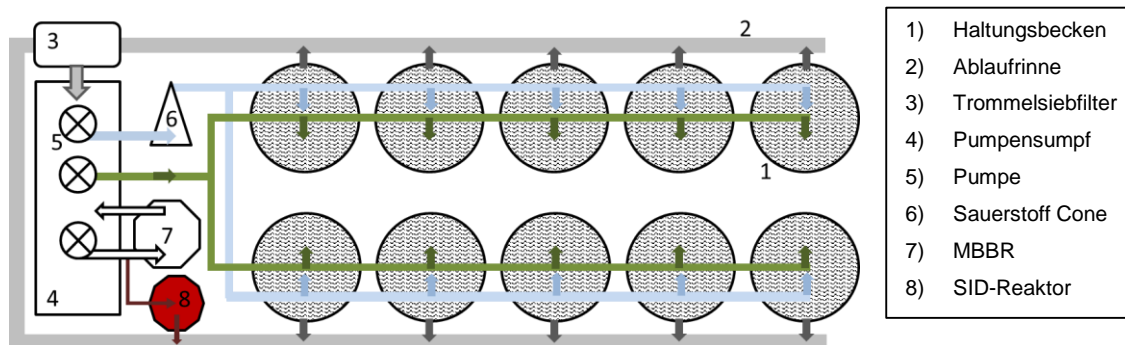


Abb. 2: Schemazeichnung. 40 m³ Kreislaufanlage.

3.2.2 Parametererfassung

Während des kontinuierlichen Einsatzes des SID-Reaktors wurden chemische, physikalische und mikrobiologische Wasserparameter erfasst und für die Beurteilung der Funktion des Reaktors ausgewertet.

Temperatur, Sauerstoffgehalt, Oxidations-/Reduktionspotential (ORP) und pH-Wert des Wassers im SID-Reaktor Zulauf und Ablauf wurden stündlich durch Handmessgeräte ermittelt. SBV, Ammonium, Nitrit und Nitrat Konzentrationen wurden drei Mal die Woche im Zulauf- und Ablaufwasser des Reaktors ermittelt. Die Erfassung von Ammonium, Nitrit, pH-Wert, Sauerstoffkonzentration, ORP und Temperatur des Haltungswassers und weiteren betriebsrelevanten Parametern wie z.B. NaHCO₃-Zugabe erfolgte zudem in der täglichen Routine. Des Weiteren wurde die Bakterienaktivität drei Mal die Woche im Wasser des Zulaufes und Ablaufes des SID-Reaktors und im Haltungswasser ermittelt. Die Zusammensetzung der Bakteriengemeinschaft wurde für den SID-Reaktor und den nitrifizierenden aeroben Filter in regelmäßigen Zeitintervallen durchgeführt.

3.3 Ergebnisse

3.3.1 Arbeitspaket 1 - Aufbau und Vorbereitung

Aufbau und Inbetriebnahme des Denitrifikationsreaktors in der Versuchsanlage Büsum (GMA)

Nach der fachgerechten Installation des SID-Reaktors an eines der Kreislaufsysteme im Technikumsmaßstab der GMA (40 m³ Wasservolumen) wurde der Reaktor schrittweise unter der Erfassung der in 3.2.2 *Parametererfassung* beschriebenen Parameter in Betrieb genommen. In den ersten zwei Wochen wurde der Reaktor ohne Aufwuchskörper betrieben. Danach wurde der Reaktor als aerober MBBR für weitere 3 Wochen genutzt. Die Umstellung des Reaktors auf anoxische Bedingungen erfolgte nach der 5. Versuchswoche.

Abb. 3 zeigt, dass während der einleitenden Inbetriebnahme (insges. 5 Wochen) des SID-Reaktors die alleinige Reduktion der hydraulischen Beaufschlagung keine anoxischen Bedingungen zur Folge hat. Erst die Zugabe einer externen Kohlenstoffquelle (Methanol) hatte schon wenige Tage später eine Sauerstoffsättigung um die 0 % und negative ORP Werte, eine Voraussetzung für die Denitrifikation, zur Folge. Diese blieben während der gesamten Versuchsphase konstant niedrig.

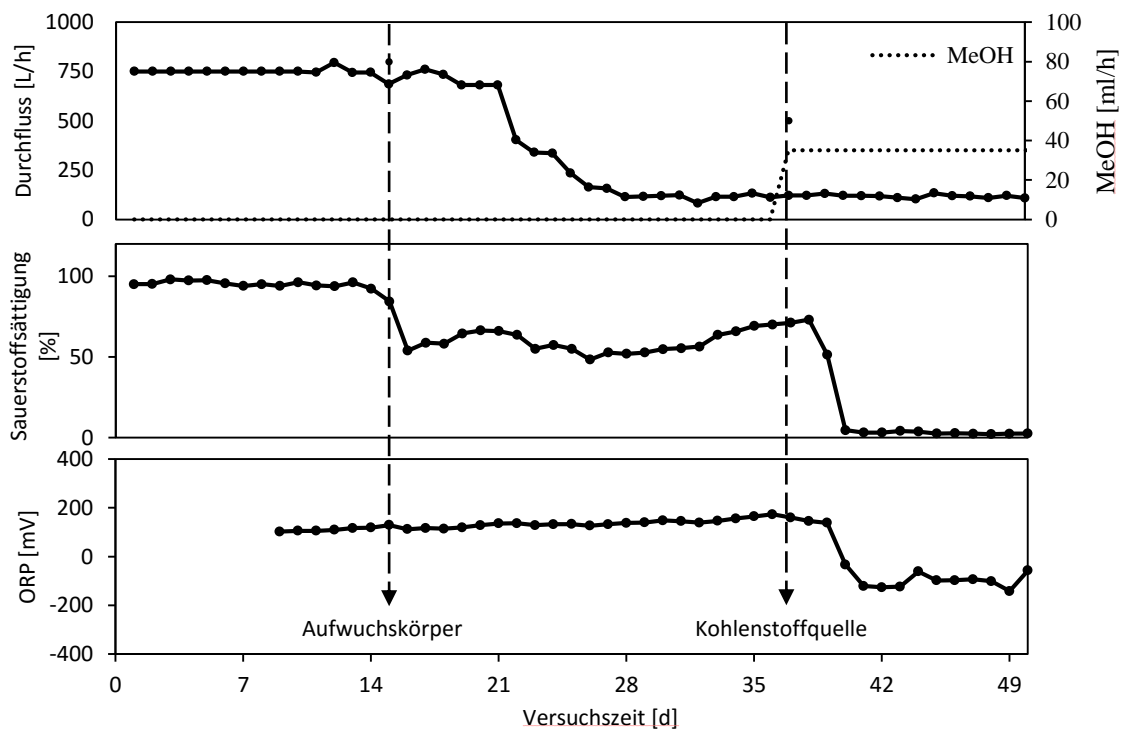


Abb. 3 Inbetriebnahme des SID-Reaktors. Durchfluss, Sauerstoffsättigung und ORP im SID-Reaktor Ablaufwasser. Zeitpunkte der Zugabe von Aufwuchskörpern und einer Kohlenstoffquelle (MeOH) in den SID-Reaktorraum sind durch vertikale Pfeile gekennzeichnet.

In der aeroben Anfangsphase (ersten 36 Tage), sowie zu Beginn der anoxischen Phase (ab Tag 36) wurden erste systemspezifische Kenngrößen (Verweilzeit, hydraulische Beaufschlagung, Menge an zu-dosiertem Kohlenstoff, etc.) erarbeitet und bewertet. Die anfänglichen Testläufe dienten maßgeblich der Ermittlung der Einstellungen im weiteren Versuchsablauf.

3.3.2 Arbeitspaket 2 - Verfahrenstechnische Anpassung des SID-Reaktors für die marine Aquakultur

Um eine bestmögliche Anpassung des SID-Reaktors an das Anwendungsgebiet mariner Aquakultursysteme zu gewährleisten wurde der Reaktor unter Salzwasserbedingungen im Dauerbetrieb getestet. Insgesamt dauerte diese Testphase 6 Monate. Dabei wurde das zweite Arbeitspaket in drei Untersuchungsschwerpunkte (Phasen) mit unterschiedlichen Zielsetzungen unterteilt.

Phase I: Parametererfassung unter 3 unterschiedlichen hydraulischen Beaufschlagungen, um die Auswirkung von unterschiedlichen Retentionszeiten des Wassers (2, 4 & 6 h) auf die Effizienz und NO_3^- -N Elimination zu erfassen.

Phase II: Die potentiell effektivste hydraulische Beaufschlagung (Retentionszeit von 2 h) wurde unter erhöhter Stickstofflast detaillierter untersucht. Dabei wurde zusätzlich zum normalen Fütterungsregime durch die Zugabe von nasschemischen N-Quellen (Harnstoff und Ammoniak) die erhöhte Stickstofflast erzielt.

Phase III: Abschaltung des Denitrifikationsreaktors um Vergleichswerte zu einem RAS ohne Denitrifikationsstufe zu generieren.

3.3.2.1 Phase I - Unterschiedliche hydraulische Beaufschlagungen

Einen großen Effekt auf die potentiell höchste NO_3^- -N Elimination hat die hydraulische Beaufschlagung bzw. die Retentionszeit des Wassers im SID-Reaktor. Je geringer die Retentionszeit, also die Aufenthaltszeit des Modulwassers im Reaktor, desto mehr Anlagenwasser kann pro Tag behandelt werden und somit auch potentiell mehr NO_3^- -N durch Denitrifikationsprozesse aus dem System entfernt werden. Jedoch besteht bei einer geringen Retentionszeit die Gefahr, dass der SID-Reaktor durch die hohe hydraulische Beaufschlagung mit sauerstoffreichem Wasser nicht mehr im anoxischen Bereich arbeiten kann und somit auch keine oder nur unvollständige

Denitrifikationsprozesse stattfinden. Daher galt es im anfänglichen Betrieb des SID-Reaktors unterschiedliche Retentionszeiten zu testen und diverse Betriebsparameter (3.2.2 *Parametererfassung*) zu dokumentieren und auszuwerten, um somit die potentiell vielversprechendste Retentionszeit für einen effizienten Betrieb des Denitrifikationsreaktors zu finden und weiterhin zu optimieren.

Zentrale Betriebsparameter

In Tab. 1 sind die zentralen Betriebsparameter aus der ersten Phase dargestellt. Die Temperatur lag bei allen drei getesteten Retentionszeiten mit geringen Schwankungen zwischen 24 und 25 °C, sodass davon auszugehen ist, dass die Temperatur keinen Einfluss auf Unterschiede in der Denitrifikationsleistung hatte. Der Sauerstoffgehalt (mg/L) bzw. die Sauerstoffsättigung (%) befand sich bei den drei Retentionszeiten im nahezu komplett anoxischen Bereich. Die leicht erhöhten Werte von 0.6 mg/L bzw. 8.5 % für die Retentionszeit von 6 Stunden sind auf die anfängliche Umstellung des Reaktors auf anaerobe Betriebsweise zurückzuführen. Ab der Zugabe der Kohlenstoffquelle (MeOH) dauerte die Umstellphase ca. 3 Tage (Abb. 3) wobei die ermittelten Wasserwerte in diesen Tagen mit in die Berechnungen einfließen und somit zu erhöhten Mittelwerten bei Sauerstoffgehalt (mg/L) und -sättigung (%) führten. Nach der 3 tägigen Umstellphase blieb sowohl Sauerstoffgehalt als auch ORP bei einer Retentionszeit von 6 Stunden ähnlich niedrig wie bei einer Retentionszeit von 4 oder 2 Stunden. Generell boten der geringe Sauerstoffgehalt als auch das negative Redoxpotential gute Voraussetzungen für stabile Denitrifikationsprozesse.

Tab. 1: Phase I. Zentrale Betriebsparameter des SID-Reaktors.

Retentionszeit [h]		Temperatur [°C]	Sauerstoff [mg/L]	Sauerstoff [%]	ORP [mV]
6	MW	24,2	0,6	8,5	-181
	Min	23,7	0,1	1,1	-473
	Max	25,1	5,3	73,0	160
	SD	0,3	1,0	14,5	139
	CV	0,01	1,71	1,70	0,77
4	MW	24,8	0,2	2,9	-152
	Min	24,4	0,1	1,3	-399
	Max	26,1	0,7	9,2	-61
	SD	0,3	0,2	2,2	96
	CV	0,01	0,78	0,77	0,63
2	MW	25,0	0,3	3,7	-145
	Min	24,4	0,1	1,3	-370
	Max	26,3	0,6	8,1	-43
	SD	0,5	0,1	1,9	83
	CV	0,02	0,51	0,50	0,57

Denitrifikationsleistung

Tab. 2 zeigt die Denitrifikationsleistung des SID-Reaktors unter drei unterschiedlichen Retentionszeiten. Betrachtet man nur die Nitrat-N Reduktion in Prozent, so lässt sich sagen, dass die höchste getestete Retentionszeit von 6 Stunden mit 83 % die prozentual höchste Nitrat-N Reduktion aufzeigt. Wird der SID-Reaktor mit geringeren Retentionszeiten betrieben so sinkt die prozentuale Nitrat-N Reduktion auf 64 und 61 % bei jeweils 4 und 2 Stunden Retentionszeit. Es sollte jedoch beachtet werden, dass bei einer geringen Retentionszeit eine höhere Gesamtmenge an Anlagenwasser pro Tag behandelt werden kann und somit auch potentiell mehr Nitrat-N aus dem System entfernt werden kann auch wenn die Nitrat-N Reduktion im Vergleich zu höheren Retentionszeiten nicht gleich effektiv abläuft. Folglich kann bei einer Retentionszeit von 2 h im Vergleich zu einer Retentionszeit von 6 h in der selben Zeit die dreifache Menge an Anlagenwasser behandelt werden und somit auch bei geringeren Reduktionsraten effektiv mehr Nitrat-N aus dem System entfernt werden.

Berücksichtigt man zusätzlich zur Retentionszeit das Volumen des Aufwuchskörperbettes erschließt sich aus Tab. 2, dass die geringste Retentionszeit von 2 h mit 281 g NO₃⁻-N/d*m³ Aufwuchskörperbett im Vergleich zu 229 und 198 g NO₃⁻-N/d*m³ Aufwuchskörperbett, bei einer Retentionszeit von 6 und 4 h, die höchste

NO₃⁻-N Reduktion zur Folge hat. Grundsätzlich lässt sich somit aus diesen Daten eine niedrige Retentionszeit von 2 Stunden für den Betrieb des SID-Reaktors empfehlen.

Es sollte jedoch beim Betrachten der Daten in Tab. 2 beachtet werden, dass die Nitrat-N Konzentration im Reaktor Zulauf mit geringerer Retentionszeit versuchsbedingt ebenfalls geringer ausfällt. Dies ist dadurch zu erklären, dass der SID-Reaktor in der Versuchsanlage im Dauerbetrieb eingesetzt wurde und durch die stabilen Denitrifikationsraten trotz Stickstoffzufuhr durch Futtergaben kontinuierlich zur Abnahme von Nitrat-N im System führte (Abb. 4).

Es ist davon auszugehen, dass bei höheren Nitrat-N Konzentrationen im System potentiell auch mehr Nitrat-N entfernt werden kann, sodass die in Tab. 2 gezeigten Werte für die Nitrat-N Reduktion noch höher ausfallen können. Diese Annahme wurde im zweiten Untersuchungsschwerpunkt überprüft (3.3.2.2 Phase II - Erhöhte Stickstoff-Last).

Tab. 2: Phase I. Denitrifikationsleitung. ¹Bezogen auf 1 m³ Aufwuchskörperbett

Retentionszeit [h]		NO ₃ ⁻ -N Zulauf [mg/L]	NO ₃ ⁻ -N Ablauf [mg/L]	NO ₃ ⁻ -N Reduktion		
				[%]	[mg NO ₃ ⁻ -N/L/h]	[g/d*m ³] ¹
6	MW	45	10	83	36,3	229
	Min	31,9	2,6	3,2	1,5	11
	Max	61,2	47,0	100	51,1	325
	SD	8,8	12,9	23,6	11,3	72
	CV	0,20	1,26	0,29	0,31	0,32
4	MW	33	11	64	21,3	198
	Min	24,8	2,2	47,9	12,2	114
	Max	42,3	19,0	94,1	34,7	343
	SD	6,7	5,6	39,4	8,5	83
	CV	0,21	0,49	0,62	0,40	0,42
2	MW	24	10	61	14,4	281
	Min	16,2	2,2	29,0	5,0	95
	Max	34,4	19,0	100	28,9	543
	SD	6,4	5,8	23,3	6,5	126
	CV	0,27	0,58	0,38	0,45	0,45

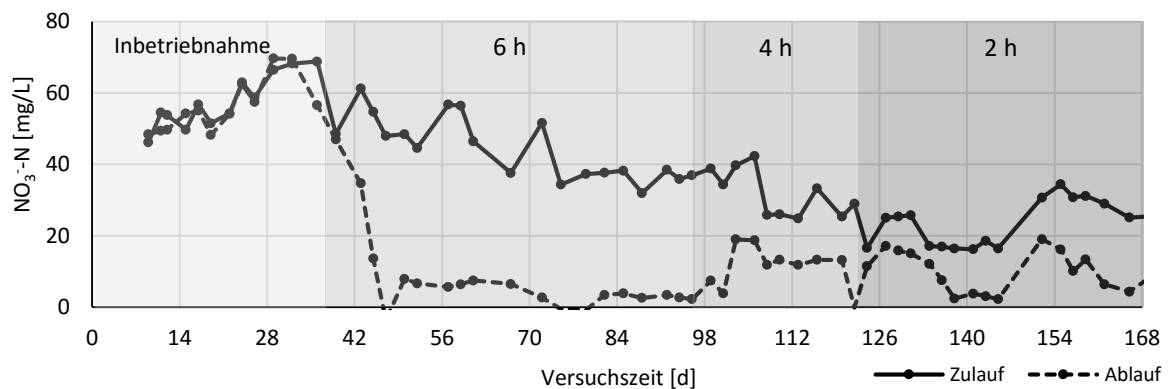


Abb. 4: Nitrat-N Konzentration im SID-Reaktor Zulauf und Ablauf.

Ammonium und Nitrit

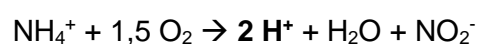
Wie schon in anderen Arbeiten beschrieben (Sauthier et al. 1998, Lee et al. 2000) kann sich während des Denitrifikationsprozesses, der nicht immer vollständig abläuft, Nitrit im Reaktorablaufwasser anreichern. Bei allen drei getesteten Retentionszeiten war die durchschnittliche Nitrit-N Konzentration im Ablaufwasser des SID-Reaktors höher als im Zulaufwasser (Abb. 3), sodass davon ausgegangen werden kann das auch in den hier beschriebenen Versuchen die Denitrifikationsprozesse nicht komplett abliefen. Bei den TAN Werten ist zu sehen, dass bei einer Retentionszeit von 4 & 6 h die Konzentration im Ablaufwasser höher war. Dies könnte auf mikrobiologische Prozesse wie die Nitratammonifikation zurückzuführen sein. Bei der Nitratammonifikation handelt es sich um eine Form der Nitratatmung, bei der Nitrat über Nitrit und Hydroxylamin zu Ammonium reduziert wird. Bei einer Retentionszeit von 2 h ist die Konzentration an TAN im Ablaufwasser des SID-Reaktors geringer als im Zulaufwasser.

Tab. 3: Phase I. Gesamt Ammoniak Stickstoff (TAN) und Nitrit Konzentrationen im Zu- und Ablaufwasser des SID-Reaktors.

Retentionszeit [h]		Zulauf		Ablauf	
		TAN [mg/L]	NO ₂ ⁻ -N [mg/L]	TAN [mg/L]	NO ₂ ⁻ -N [mg/L]
6	MW	0,26	0,11	1,42	1,27
	Min	0,2	0,1	0,0	0,0
	Max	0,4	0,2	26,0	4,6
	SD	0,1	0,0	6,0	1,2
	CV	0,29	0,29	4,19	0,91
4	MW	0,17	0,09	0,32	0,83
	Min	0,0	0,0	0,0	0,2
	Max	0,3	0,1	1,1	2,7
	SD	0,1	0,0	0,4	0,8
	CV	0,34	0,24	1,23	0,92
2	MW	0,20	0,10	0,06	1,28
	Min	0,1	0,1	0,0	0,1
	Max	0,3	0,2	0,5	4,0
	SD	0,1	0,0	0,1	1,2
	CV	0,32	0,21	1,90	0,95

pH-Wert, SBV und Kalkeinsparung

Bei der Nitrifikation wird Ammonium unter H⁺-Abspaltung zu Nitrit unter folgender Reaktionsgleichung oxidiert:



In Tab. 4 ist zu sehen, dass die bei der Nitrifikation entstehende H⁺-Ionen in einem aeroben Biofilter zur Senkung des pH-Wertes beitragen und damit einhergehend auch zur Senkung des SBV. Um den pH-Wert bei einem Wert von 7,5 zu stabilisieren wurde Natriumhydrogencarbonat (NaHCO₃) dem System zugegeben. Die Zugabe von Alkalinitäts-Supplementen findet routinemäßig in RAS statt und stellt einen nicht unwesentlichen Kostenfaktor in einem produzierenden Betrieb dar.

Wird ein RAS mit einer Denitrifikationsstufe betrieben, werden bei den Denitrifikationsprozessen Carbonate rückgebildet, die wiederum den pH-Wert und das SBV stabilisieren. Bezieht man die Menge an zugegebenem Natriumhydrogencarbonat auf die eingesetzte Futtermenge, die letzten Endes die Stickstoffquelle in einem RAS darstellt, so kann man in Tab. 5 sehen, dass durch den SID-Reaktor der Einsatz von

Natriumhydrogencarbonat um bis zu 50 % reduziert werden kann. Der positive Effekt ist ebenfalls im Ablaufwasser des SID-Reaktors messbar. Sowohl der pH-Wert als auch das SBV ist bei allen drei getesteten Retentionszeiten im Vergleich zum Zulauf erhöht (Tab. 4).

Tab. 4: Phase I. pH-Wert und Säurebindungsvermögen (SBV).

	Retentionszeit [h]		pH Zulauf	pH Ablauf	SBV Zulauf [mmol/L]	SBV Ablauf [mmol/L]
Aerober Biofilter		MW	7,5	7,2	2,0	1,9
		Min	7,4	7,0	1,6	1,6
		Max	7,6	7,6	2,6	2,4
		SD	0,1	0,1	0,4	0,3
		CV	0,01	0,02	0,18	0,15
	6	MW	7,5	7,7	2,4	5,7
		Min	7,2	7,1	1,7	4,5
		Max	7,7	8,1	3,2	8,5
		SD	0,1	0,3	0,5	1,2
		CV	0,01	0,04	0,19	0,22
SID-Reaktor	4	MW	7,5	7,6	2,9	5,0
		Min	7,4	7,5	2,4	6,3
		Max	7,6	7,7	3,3	8,9
		SD	0,1	0,0	0,3	0,8
		CV	0,01	0,01	0,10	0,16
	2	MW	7,5	7,6	3,1	4,3
		Min	7,2	7,1	2,0	5,3
		Max	7,6	7,9	4,0	10,8
		SD	0,1	0,2	0,5	1,4
		CV	0,01	0,03	0,17	0,33

Tab. 5: Phase I. Gesamtmenge an Futter und NaHCO₃ inklusive der NaHCO₃ Einsparung für den aeroben Biofilter und den SID-Reaktor bei jeweiliger Retentionszeit.

	Retentionszeit [h]	Futtermenge [kg/d]	NaHCO ₃ [kg/d]	NaHCO ₃ /Futter [kg/kg*d]	NaHCO ₃ Einsparung [%]
Aerober Biofilter		4,2	0,7	0,17	Referenz
SID-Reaktor	6	4,7	0,5	0,10	41
	4	4,4	0,4	0,09	50
	2	5,0	0,6	0,12	29

3.3.2.2 Phase II - Erhöhte Stickstoff-Last

Durch die stabile und kontinuierliche Denitrifikationsleistung des SID-Reaktors reichten der Fischbesatz und die damit einhergehende Futterlast im System nicht aus, um die oberen Grenzen der Denitrifikationsleistung zu bestimmen. Daher wurden im zweiten Untersuchungsschwerpunkt (Phase II) Stickstoffquellen nasschemisch dem System zu dosiert. Durch die Zugabe von Harnstoff (20 %) und Ammoniak (80 %) wurden die stickstoffhaltigen Ausscheidungsprodukte von Fischen dem natürlichen Mischungsverhältnis nachempfunden. Die Berechnung der nasschemischen Stickstoff Zugabe beruhte auf der Stickstoffbasis einer äquivalenten Zugabe eines kommerziellen Wolfsbarschfuttermittels. Zudem wurde die Dosierung der Stickstoffquellen im wöchentlichen Abstand von zusätzlichen 3 kg über 5 kg bis zu 10 kg Futteräquivalent erhöht, um die punktuelle Belastung des Biofilters möglichst gering zu halten und eine langsame Adaption des Biofilters zu ermöglichen.

Zentrale Betriebsparameter

Tab. 6 zeigt die zentralen Betriebsparameter aus Phase II, die mit den Werten aus Phase I vergleichbar (Tab. 1) sind. Die Temperatur lag hier ebenfalls durchschnittlich bei 25 °C, Sauerstoffgehalt und -sättigung bei 0,3 mg/L bzw. 3,5 % und das Redoxpotential bei -123,9 mV. Somit waren auch in Phase II der Untersuchungen die Bedingungen für Denitrifikationsprozesse gegeben.

Tab. 6: Phase II. Zentrale Betriebsparameter des SID-Reaktors.

Retentionszeit [h]		Temperatur [°C]	Sauerstoff [mg/L]	Sauerstoff [%]	ORP [mV]
2	MW	24,7	0,3	3,5	-123,9
	Min	23,3	0,1	1,0	-269,3
	Max	26,6	0,6	7,9	-45,3
	SD	0,8	0,2	2,6	43,3
	CV	0,03	0,73	0,73	0,35

Denitrifikationsleistung

Vergleicht man die Nitrat-N Reduktion bei gleicher Retentionszeit aber unter unterschiedlichem Stickstoffeintrag bzw. unterschiedlichen Nitrat Konzentrationen im System, so kann man sehen, dass bei höherer Stickstofflast ebenfalls mehr Nitrat aus dem System entfernt werden kann. Liegt die NO_3^- -N Last im Durchschnitt bei 24 mg/L bei einer täglichen Futtermenge von 5 kg (Tab. 2 & Tab. 5) und einer Retentionszeit

von 2 h werden im Durchschnitt 281 g NO_3^- -N/d*m³ Aufwuchskörperbett entfernt. Die Werte für die Denitrifikationsleistung in Tab. 7 zeigen, dass die NO_3^- -N Last im Durchschnitt bei 43 mg NO_3^- -N/L bei einer täglichen Futtermenge von 9,4 kg liegt und die NO_3^- -N Reduktion mit 510 g NO_3^- -N/d*m³ Aufwuchskörper deutlich höher ist. Es ist somit davon auszugehen, dass die Dimensionierung des SID-Reaktors für noch weitaus höhere Nitrat Lasten im System geeignet ist. In weiteren Untersuchungen soll daher die Nitrat Last im System weiterhin erhöht werden, um die potentiellen oberen Grenzen der Denitrifikationsleistung des SID-Reaktors zu bestimmen.

Tab. 7: Phase II. Denitrifikationsleistung unter erhöhter N-Last. ¹Bezogen auf 1 m³ Aufwuchskörperbett

Retentionszeit [h]		NO_3^- -N Zulauf [mg/L]	NO_3^- -N Ablauf [mg/L]	NO_3^- -N Reduktion		
				[%]	[mg NO_3^- -N/L/h]	[g/d*m ³] ¹
2	MW	43	16	63,1	27,0	510
	Min	25,5	6,9	44,7	16,4	326
	Max	53,7	29,4	82,8	43,6	829
	SD	8,6	7,1	13,5	7,9	161
	CV	0,20	0,45	0,21	0,29	0,32

Ammonium und Nitrit

Durch die nasschemische N-Zugabe sind im Zulauf leicht erhöhte TAN Werte zu beobachten (Tab. 8). Dies wird auf eine sich noch nicht komplett auf die neue Stickstofflast eingestellte Bakteriengemeinschaft zurückzuführen sein. Im ähnlichen Rahmen sind auch die Nitrit Werte im Ablaufwasser des Reaktors erhöht, was ebenfalls auf eine noch nicht vollständig adaptierte Bakteriengemeinschaft im SID-Reaktor zurückzuführen sein könnte. Die Vermutung, dass die Bakteriengemeinschaft auf die neuen Umweltbedingungen noch nicht komplett adaptiert war, konnte im Rahmen der Bakterienpopulationsanalysen (3.3.3.1 Bakteriengemeinschaft) bestätigt werden.

Tab. 8: Phase II. Gesamt Ammoniak Stickstoff (TAN) und Nitrit Konzentrationen im Zu- und Ablaufwasser des SID-Reaktors.

Retentionszeit [h]		Zulauf		Ablauf	
		TAN [mg/L]	NO_2^- -N [mg/L]	TAN [mg/L]	NO_2^- -N [mg/L]
2	MW	0,67	0,37	0,29	6,10
	Min	0,3	0,1	0,0	0,5
	Max	1,9	0,6	1,5	26,2
	SD	0,5	0,2	0,4	8,3
	CV	0,81	0,48	1,49	1,36

pH-Wert, SBV und Kalkeinsparung

Wie schon im ersten konnte auch im zweiten Untersuchungsschwerpunkt die Stabilisierung bzw. eine pH-Wert und eine SBV Erhöhung im Reaktorablaufwasser festgestellt werden (Tab. 9). Zudem konnte durch die Stickstoff Zu-Dosierung die relative NaHCO_3 Einsparung bei gleicher Retentionszeit von 29 % (Tab. 5) auf 49 % (Tab. 10) erhöht werden. Dies ist durch die schon beschriebene erhöhte Denitrifikationsleistung des Reaktors bei einer Stickstoff Zu-Dosierung zu erklären. Je mehr Nitrat im Rahmen der Denitrifikation umgesetzt wird, desto mehr Härterückbildner können gebildet werden.

Stöchiometrisch werden bei der Nitrifikation 7,14 mg $\text{CaCO}_3/\text{mg NH}_4^+\text{-N}$ verbraucht, wobei bei der Denitrifikation 3,57 mg $\text{CaCO}_3/\text{mg NO}_3^-\text{-N}$ gebildet werden (van Rijn et al. 2006). Dies entspricht 50 % Kalkeinsparung durch den Betrieb einer Denitrifikationsstufe. Die hier erzielte Einsparung von 49 % spiegelt dieses Potential sehr gut wieder. Das Kalkeinsparpotential des SID-Reaktors ist jedoch weitaus höher einzuschätzen, da Müller-Belecke et al. (2013) zeigen konnten, dass eine Kalkeinsparung von 83 % mit einer Denitrifikationsstufe möglich ist.

Tab. 9: Phase II. pH-Wert und SBV.

Retentionszeit [h]		pH Zulauf	pH Ablauf	SBV Zulauf	SBV Ablauf
2	MW	7,3	7,9	2,5	4,7
	Min	7,0	7,4	1,8	5,5
	Max	7,5	8,3	2,9	7,7
	SD	0,1	0,2	0,4	0,8
	CV	0,01	0,03	0,16	0,16

Tab. 10: Phase II. Futtermenge pro Tag und NaHCO_3 Gabe inklusive der NaHCO_3 Einsparung für den SID-Reaktor bei jeweiliger Retentionszeit.

Retentionszeit [h]	Futtermenge [kg/d]	nasschemisches Futteräquivalent [kg/d]	NaHCO_3 [kg/d]	$\text{NaHCO}_3/\text{Futter}$ [kg/kg*d]	NaHCO_3 Einsparung [%]
2	4,1	5,3	0,8	0,09	49

3.3.2.3 Phase III - Abschaltung des SID-Reaktors

Um neben den Referenzwerten die unter 3.3.1 erhoben wurden, Betriebsparameter unter erhöhter Stickstofflast zu erhalten, wurde der SID-Reaktor nach dem zweiten Untersuchungsschwerpunkt abgeschaltet. Dabei wurde weiterhin zusätzlich zur Fütterung der Fische eine Stickstoffquelle nasschemisch zu dosiert, sodass die Stickstofflast im System hoch blieb und damit erhöhte Nitrat-N Werte im Modul erzielt werden konnten (Tab. 11).

Tab. 11: Phase III. Nitrat-N Konzentration im Haltungswasser. +SID = SID-Reaktor im Betrieb; -SID = SID Reaktor nicht im Betrieb; + N =Zugabe einer zusätzlichen Stickstoffquelle.

Retentionszeit [h]		NO ₃ ⁻ -N [mg/L]		
		+SID	+ SID + N	-SID +N
2	MW	24,0	43,0	100,0
	Min	16,2	25,5	61,1
	Max	34,4	53,7	165,5
	SD	6,4	8,6	57,1
	CV	0,27	0,20	0,57

Ammonium und Nitrit

Vergleicht man die TAN Werte in Tab. 12 unter den unterschiedlichen Betriebsweisen des Moduls, so ist zu erkennen, dass die TAN Werte ohne die Zugabe einer zusätzlichen Stickstoffquelle im Durchschnitt bei 0,20 mg/L liegen. Wird eine zusätzliche Stickstoffquelle dem System zugegeben so erhöhen sich die TAN Werte im Haltungswasser durchschnittlich auf 0,67 mg/L. Mit einem durchschnittlichen Wert von 2,02 mg/L bei zusätzlicher Stickstoffzugabe ist die Konzentration von TAN ohne SID-Reaktor 10 bzw. 3-mal so hoch wie mit SID-Reaktor. Das Verhältnis zwischen Ammonium und Ammoniak hängt vom pH-Wert ab, wobei bei hohen pH-Werten relativ mehr Ammoniak vorliegt als bei niedrigen pH-Werten. Ammoniak ist für Fische wesentlich giftiger als Ammonium und greift die Schleimhäute insbesondere die der Kiemen an. Eine Ammoniakvergiftung kann dabei zu einem Fischsterben führen, wenn nicht Gegenmaßnahmen ergriffen werden.

Bei der Nitrit-N Konzentration im Haltungswasser ist gleiches wie bei der TAN Konzentration beim Abschalten des SID-Reaktors zu sehen. Durch die Zugabe einer zusätzlichen Stickstoffquelle wurde der Ausgangswert von 0,10 mg/L NO₂⁻-N auf 0,37 mg/L fast vervierfacht. Mit der zusätzlichen Stickstoffquelle aber ohne SID-Reaktor werden 15-fach erhöhte Nitrit-N Konzentrationen im Modul erreicht. Nitrit liegt mit salpetriger Säure (HNO₂) ebenfalls in einem vom pH-Wert abhängigem Gleichgewicht

vor. Je niedriger der pH-Wert, desto höher der Anteil der salpetrigen Säure. Salpetrige Säure verändert den Blutfarbstoff Hämoglobin in den roten Blutkörperchen der Fische. Dabei wird aus dem Hämoglobin, das den Sauerstoff an sich bindet, zu Methämoglobin, das keinen Sauerstoff an sich binden kann. Letzten Endes führt die salpetrige Säure zu Leber- und Blutzellschädigungen, die sich in bräunlich verfärbten Kiemen äußert und zu Fischsterben führen kann.

Tab. 12: Phase III. Gesamt Ammoniak Stickstoff (TAN) und Nitrit Konzentration im Haltungswasser. +SID = SID-Reaktor im Betrieb; -SID = SID Reaktor nicht im Betrieb; + N = Zugabe einer zusätzlichen Stickstoffquelle.

Retentionszeit		TAN [mg/L]			NO ₂ ⁻ -N [mg/L]		
		+SID	+ SID + N	-SID +N	+SID	+ SID + N	-SID +N
2	MW	0,20	0,67	2,02	0,10	0,37	1,55
	Min	0,1	0,3	1,0	0,1	0,1	0,5
	Max	0,3	1,9	3,5	0,2	0,6	3,5
	SD	0,1	0,5	1,3	0,0	0,2	1,6
	CV	0,32	0,81	0,65	0,21	0,48	1,06

pH-Wert, SBV und Kalkeinsparung

Im Vergleich zum Betrieb des Moduls mit SID-Reaktor konnte nach der Abschaltung des SID-Reaktors beobachtet werden, dass der pH-Wert durch die Nitrifikationsprozesse stärker abnahm und einen durchschnittlichen Wert von 7 erreichte (Tab. 13). Auch das SBV erreichte mit 1,2 mmol/L den geringsten durchschnittlichen Wert seit Versuchsbeginn.

Um eine vermehrte Bildung von salpetriger Säure, die wie schon beschrieben zu einem Fischsterben führen kann, zu vermeiden, wurde der starken Abnahme des pH-Wertes und des SBV durch erhöhte NaHCO₃ Zugabe entgegengewirkt. Dies führte, im Vergleich zum Referenzbetrieb zu Versuchsbeginn, zu einem 29 % höherem NaHCO₃ Verbrauch pro kg Futter führte (Tab. 14).

Da bei niedrigen pH-Werten vermehrt toxische salpetrige Säure vorliegt und bei hohen pH-Werten vermehrt toxisches Ammoniak vorliegt, ist es äußerst wichtig den pH-Wert möglichst stabil in einem Bereich zu halten bei dem sich beide Stoffe in einem für Fische unbedenklichen Gleichgewichtsverhältnis befinden.

Tab. 13: Phase III. pH-Wert und Säurebindungsvermögen (SBV).

Retentionszeit		pH			SBV [mmol/L]		
		+SID	+SID +N	-SID +N	+SID	+SID +N	-SID +N
2	MW	7,5	7,3	7,0	3,1	2,5	1,2
	Min	7,2	7,0	6,6	2,0	1,8	1,8
	Max	7,6	7,5	7,2	4,0	2,9	1,3
	SD	0,1	0,1	0,2	0,5	0,4	0,1
	CV	0,01	0,01	0,03	0,17	0,16	0,12

Tab. 14: Phase III. Gesamtmenge an Futter und NaHCO₃ inklusive der NaHCO₃ Einsparung für den aeroben Biofilter und den SID-Reaktor bei jeweiligem Reaktorbetrieb.

Retentionszeit [h]	Futtermenge [kg/d]	nasschemisches Futteräquivalent [kg/d]	NaHCO ₃ [kg/d]	NaHCO ₃ /Futter [kg/kg*d]	NaHCO ₃ Einsparung [%]
Aerober Biofilter	4,2	0	0,7	0,17	Referenz
2	+SID	5,0	0	0,6	29
	+SID +N	4,1	5,3	0,8	49
	-SID +N	5,1	7,9	2,9	-29

3.3.3 Arbeitspaket 3 - Bakteriengemeinschaft und Aktivität

3.3.3.1 Bakteriengemeinschaft

Die Bestimmung der Bakteriengemeinschaft erfolgte durch die vermicon AG (München, Deutschland). Hierzu wurden Proben, bestehend aus Biofilm an Aufwuchskörpern, in 80 % Ethanol konserviert und für die Analysen verschickt. Durch die kultivierungsunabhängige VIT® Gensondentechnologie können in der Regel 95 - 98 % der in Abwasserreinigungsanlagen vorkommenden Bakterien in sogenannte Hauptgruppen eingeteilt werden. Die Einteilung in funktionelle Bakteriengruppen (Nitrifikanten, Denitrifikanten und ANAMMOX-Bakterien) erfolgte durch spezifische Analysen. Ferner wurden mittels DAPI-Färbung die Gesamtzellzahlen und die Lebendzellzahlen unter Einsatz einer umfassenden Bakterien-spezifischen Gen Sonde ermittelt. Die Quantifizierung der einzelnen Populationen in Relation zur vitalen Gesamtpopulation erfolgte im Rahmen der Fluoreszenzmikroskopie.

Da die Bestückung des SID-Reaktors bei Versuchsstart mit Aufwuchskörpern aus dem aerob arbeitenden MBBR erfolgte, wurde eine Probe der Aufwuchskörper als Startwert für beide Reaktoren, SID-Reaktor und aerober MBBR, verwendet. Im weiteren Betrieb wurden Proben sowohl aus dem aeroben MBBR wie auch dem anaeroben SID-Reaktor einzeln analysiert.

Gesamtzellzahl und Lebendzellzahl

Zu Versuchsstart wurde eine Probe aus dem aeroben MBBR entnommen und auf die Gesamtzellzahl und Lebendzellzahl untersucht (Tab. 15). Die Gesamtzellzahl betrug dabei $2,7 \times 10^7$ Zellen pro Aufwuchskörper und die Lebendzellzahl $1,6 \times 10^7$ Zellen pro Aufwuchskörper. Der prozentuale Anteil an lebenden Zellen betrug somit 60 %, wobei die gemessenen Zellzahlen laut Analyseinstitut Mindestwerte darstellen. Grund dafür ist die komplex gestaltete Struktur der Aufwuchskörper, die eine vollständige Erfassung der Mikroorganismen erschwert.

Nach einem 3 monatigen Betrieb beider Reaktoren wurden weitere Aufwuchskörper analysiert. Hier konnten deutlich erhöhte Gesamtzellzahlen von $7,2 \times 10^8$ für den SID-Reaktor und $4,8 \times 10^8$ Zellen/Aufwuchskörper für den aeroben MBBR ermittelt werden (Tab. 15). Die Lebendzellzahlen lagen bei $4,7 \times 10^8$ und $3,2 \times 10^8$ Zellen/Aufwuchskörper für den SID-Reaktor und den MBBR. Somit lag der prozentuale Anteil an lebenden Zellen mit Werten von 65 % (SID-Reaktor) und 66 % (MBBR) etwas höher als zu Versuchsbeginn.

Im weiteren Versuchsverlauf (Probennahme nach 6 Monaten) haben sich die Gesamtzellzahl und Lebendzellzahl weiterhin erhöht, sodass in der Probe des SID-Reaktors Gesamtzellzahlen von $1,0 \times 10^9$ und Lebendzellzahlen von $6,0 \times 10^8$ Zellen/Aufwuchskörper gemessen werden konnten. Wobei der Lebendanteil mit 59 % etwas reduzierter ausfiel. In der Probe des Biofilters haben sich sowohl die Gesamtzellzahl als auch Lebendzellzahl auf jeweils $6,9 \times 10^8$ und $4,5 \times 10^8$ Zellen/Aufwuchskörper erhöht. Der prozentuale Anteil an lebenden Zellen betrug somit 65 % und war damit vergleichbar zu dem Lebendanteil der Probe nach einem 3 monatigem Betrieb.

Tab. 15: Gesamtzellzahl und Lebendzellzahl des Biofilms auf den Aufwuchskörpern (AK).

	SID-Reaktor		Biofilter	
	Gesamtzellzahl [Zellen/AK]	Lebendzellzahl [Zellen/AK]	Gesamtzellzahl [Zellen/AK]	Lebendzellzahl [Zellen/AK]
Start	$2,7 \times 10^7$	$1,6 \times 10^7$	$2,7 \times 10^7$	$1,6 \times 10^7$
3 Monate Betrieb	$7,2 \times 10^8$	$4,7 \times 10^8$	$4,8 \times 10^8$	$3,2 \times 10^8$
6 Monate Betrieb	$1,0 \times 10^9$	$6,0 \times 10^8$	$6,9 \times 10^8$	$4,5 \times 10^8$

Hauptgruppen

Die Gensondenergebnisse aus den Hauptgruppen-Analysen sind in Abb. 5 dargestellt. Schon zu Versuchsbeginn besteht eine wünschenswerte Diversität an verschiedenen Hauptgruppen sowie ein Gleichgewicht ohne vorherrschende Dominanz einzelner Gruppen. Die hohe Diversität der einzelnen Populationen deutet auf eine stabile Gesamtbiozönose hin.

Auch bei der Analyse der Proben aus dem SID-Reaktor und MBBR nach 3 monatigem Betrieb war eine wünschenswerte Diversität an verschiedenen Hauptgruppen sowie eine relative Ausgewogenheit ohne vorherrschende Dominanz einzelner oder nur weniger Gruppen in beiden Proben zu erkennen. Bei der Probe aus dem SID-Reaktor war jedoch das Fehlen der Nitrospirae, die wichtigsten und meist dominanten Nitrit-oxidierenden Bakterien in Wasseraufbereitungsanlagen, auffällig. Dies ist durch den Wechsel zu anaeroben Bedingungen zu erklären, da in der Probe aus dem aeroben MBBR Nitrospirae weiterhin vorzufinden waren.

Nach einem 6 monatigen Betrieb wiesen die Proben des SID-Reaktors und des MBBR eine relative Ausgewogenheit ohne vorherrschende Dominanz einzelner oder nur weniger Gruppen auf. Im Vergleich zur Probe aus dem SID-Reaktor nach 3 monatigem Betrieb fiel nach 6 Monaten besonders das beinahe vollständige Fehlen von Nitrifikanten-typischen Clustern auf, was als weitergehende Folge der anoxischen Bedingungen zu sehen ist.

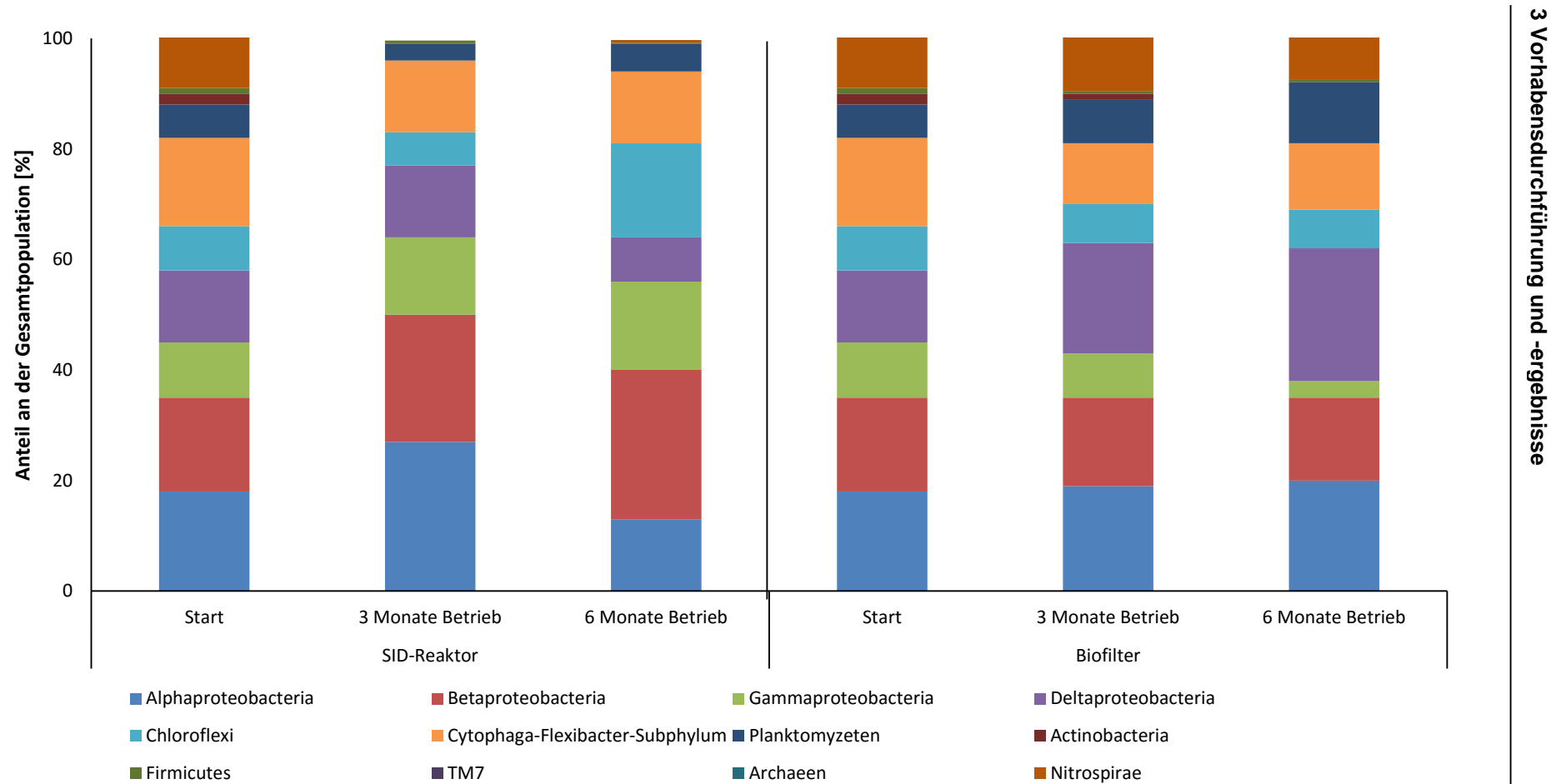


Abb. 5: Vergleich der prozentualen Anteile der einzelnen Hauptgruppen-Populationen an der Gesamtlebendzellzahl der drei Beprobungszeitpunkte.

Nitrifikanten

Mit der hier angewandten Nitrifikanten-Analyse konnten die beiden funktionellen Gruppen, Ammoniumoxidierer (AOB) und Nitritoxidierer (NOB), in den Proben nachgewiesen werden. Zu den AOBs gehören vorwiegend Betaproteobacteria, aber auch Nitrosococcus (Gammaproteobacteria). Zu den Nitritoxidierern gehören hingegen Vertreter der Alphaproteobacteria (Nitrobacter spp.), der Gammaproteobacteria (Nitrococcus mobilis), der Betaproteobacteria (Nitrotoga spp.) sowie die Gruppen der Nitrospirae (Nitrospira spp.) und Deltaproteobacteria (Nitrospina gracilis). Insgesamt konnte in der Startprobe eine hohe Diversität an Nitrifikanten festgestellt werden, die fünf Hauptgruppen (Betaproteobacteria, Gammaproteobacteria, Deltaproteobacteria, Nitrospirae & Alphaproteobacteria) zugewiesen wurden.

Denitrifikanten

Die Gruppe der Denitrifikanten ist äußerst divers und beinhaltet Mitglieder der Alphaproteobacteria, Betaproteobacteria und Cytophaga-Flexibacter-Subphylums.

Bei der Start Beprobung konnten im Rahmen der Denitrifikanten-Analyse Saprospiraceae, die zur Gruppe des Cytophaga-Flexibacter-Subphylums gehören, mit einem Anteil von 16 % an der Gesamtlebendzellzahl nachgewiesen werden. Neben dem Cytophaga-Flexibacter-Subphylum konnten auch Denitrifikanten, die zu den Alphaproteobacteria, Betaproteobacteria und zum Azoarcus/Thauera-Cluster zugehörig sind, nachgewiesen werden.

Nach einem 3 monatigem Betrieb konnten die gleichen Vertreter an Denitrifikanten in beiden Proben nachgewiesen werden. Es konnten sich noch keine klaren Denitrifikantenpopulationen (z.B. Accumulibacter spp.) herauskristallisieren, die nicht auch unter aeroben Bedingungen in der MBBR Probe vorhanden waren.

Bei der Beprobung nach 6 monatigem Betrieb zeigte sich, dass sich in der Probe aus dem SID-Reaktor eine der üblicherweise in Kläranlagen vorhandenen Denitrifikantenpopulationen (Acidovorax spp.) seit der letzten Untersuchung vermehrt hatte. Ferner konnten weitere Denitrifikanten, die auch schon in der letzten Beprobung identifiziert worden waren, wieder festgestellt werden.

ANAMMOX

Die sogenannten ANAMMOX-Bakterien können unter anaeroben Verhältnissen Nitrit zusammen mit Ammonium zu molekularem Stickstoff abbauen. Dieser Prozess kann als zusammenfassende Reaktion aus Nitrifikation und Denitrifikation bezeichnet werden. Unter Verwendung spezifischer Gensonden konnten jedoch in den untersuchten Biofilmen keine ANAMMOX-Bakterien (Mitglieder der Planktomyzeten) nachgewiesen werden. Somit ist davon auszugehen, dass der Ammoniumabbau aus den mehrstufigen Prozessen der Nitrifikation und Denitrifikation besteht.

Fazit

Die Startprobe wies Anteile von 22 % für die identifizierbaren Nitrifikanten und 28 % für Denitrifikanten an der Gesamtlebendzellzahl auf den Aufwuchskörpern auf. Da die Aufwuchskörper für den SID-Reaktor zu Versuchsanfang aus einem laufenden aeroben MBBR, der eine diverse Populationsstruktur an Mikroorganismen aufwies, entnommen wurde, konnte wie in 3.3.1 und Abb. 3 dargestellt, der SID-Reaktor innerhalb weniger Tage auf anaeroben Betrieb umgestellt werden.

Nach einem 3 monatigen Betrieb hat sich, wie in Abb. 5 deutlich zu sehen ist, die Populationsstruktur der Biofilme auf den Aufwuchskörpern der beiden Reaktoren, offensichtlich in Abhängigkeit der Prozessführung, in gewissem Umfang auseinander entwickelt. Beide Reaktoren haben deutlich um mehr als eine Zehnerpotenz sowohl an Lebend- als auch an Gesamt-Zellzahlen zugenommen. Ferner konnten sich in der SID-Reaktor Probe noch keine klaren Denitrifikantenpopulationen herauskristallisieren, die nicht auch unter aeroben Bedingungen in der MBBR Probe vorhanden waren. In der MBBR Probe konnten sich nach 3 monatigem Betrieb alle mittels spezifischer Gensonde nachweisbaren Nitrifikanten stabilisieren.

Nach einem 6 monatigen Betrieb des SID-Reaktors hat sich die Populationsstruktur der Biofilme auf den Aufwuchskörpern in gewissem Umfang weiterentwickelt und verändert. Erwartungsgemäß ist der größte Teil an Nitrifikanten weiter zurückgegangen und bewegt sich an der Nachweisgrenze, wobei das mikrobielle Denitrifikanten-Gleichgewicht auf den Aufwuchskörpern des SID-Reaktors noch nicht komplett eingestellt scheint.

Es ist davon auszugehen, dass die versuchsbedingten immer wiederkehrenden Änderungen im Betrieb des SID-Reaktors ebenfalls zu Umstellungen der Bakteriengemeinschaft führten. Ein stabiler Betrieb mit konstanten Einstellungen könnte zu stabileren Bakterienpopulationen führen. Hier scheint es von Vorteil zu sein, dass die Diversität der Bakterienpopulationen eine schnelle Umstellung des Reaktors ermöglicht und zu nur sehr kurzen Unterbrechungen im Denitrifikationsprozess führt.

3.3.3.2 Bakterienaktivität

Die Ermittlung der Bakterienaktivität erfolgte durch die Nutzung des BACTIQUANT® WATER Testkits (Mycometer A/S, Horsholm, Dänemark). Das Messprinzip beruht auf der Detektion der enzymatischen Aktivität in Bakterien. Das detektierte Enzym gehört zu den Hydrolasen und ist in allen großen taxonomischen Gruppen, einschließlich gram negativer, gram positiver, aerober und anaerober Bakterien vertreten. Die Analyse ist dabei nicht von Trübung, Leitfähigkeit, Härte oder pH-Wert des Wassers beeinflusst, was eine zuverlässige Messung erlaubt. Somit lässt sich durch die Bakterienaktivität in der Wasserprobe auf die tatsächliche Belastung des Wassers durch lebende Bakterien schließen.

In Abb. 6 ist die Bakterienaktivität, ausgedrückt als Hydrolase Aktivität in AFU, im Wasser der Haltungseinheiten und im Zulauf- und Ablauf-Wasser des SID-Reaktors, dargestellt. Ohne den SID-Reaktor ist die Bakterienaktivität im Haltungswasser mit ca. 150.000 AFU relativ hoch. Nach der Inbetriebnahme des SID-Reaktors reduziert sich die Bakterienaktivität auf durchschnittliche Werte von 43 786 - 88 058 AFU im Haltungswasser und 35 058 – 58 430 AFU im Zulauf des Reaktors. Zwar sieht man hier eine deutliche Reduktion der Bakterienaktivität im Vergleich zum Betrieb des Moduls ohne SID-Reaktor, jedoch scheint die Retentionszeit keinen deutlichen Einfluss auf die Aktivitätsraten zu haben. Auch wenn die Hydrolase Aktivität der Bakterien im Ablaufwasser des SID-Reaktors mit abnehmender Retentionszeit ebenfalls abnimmt, kann dies unter Umständen auf Verdünnungseffekte zurückzuführen sein, da bei einer geringen Retentionszeit mehr Anlagenwasser durch den Reaktor geführt wird. Nichtsdestotrotz ist in Abb. 6 zu sehen, dass bei zusätzlicher Stickstoff Zufuhr (+N) ohne SID-Reaktor (-SID) die Bakterienaktivität im Haltungswasser erhöht ist. Somit hat der SID-Reaktor durch die Reduktion der Bakterienaktivität im Haltungswasser einen positiven Effekt auf die Wasserqualität bezüglich der bakteriellen Belastung.

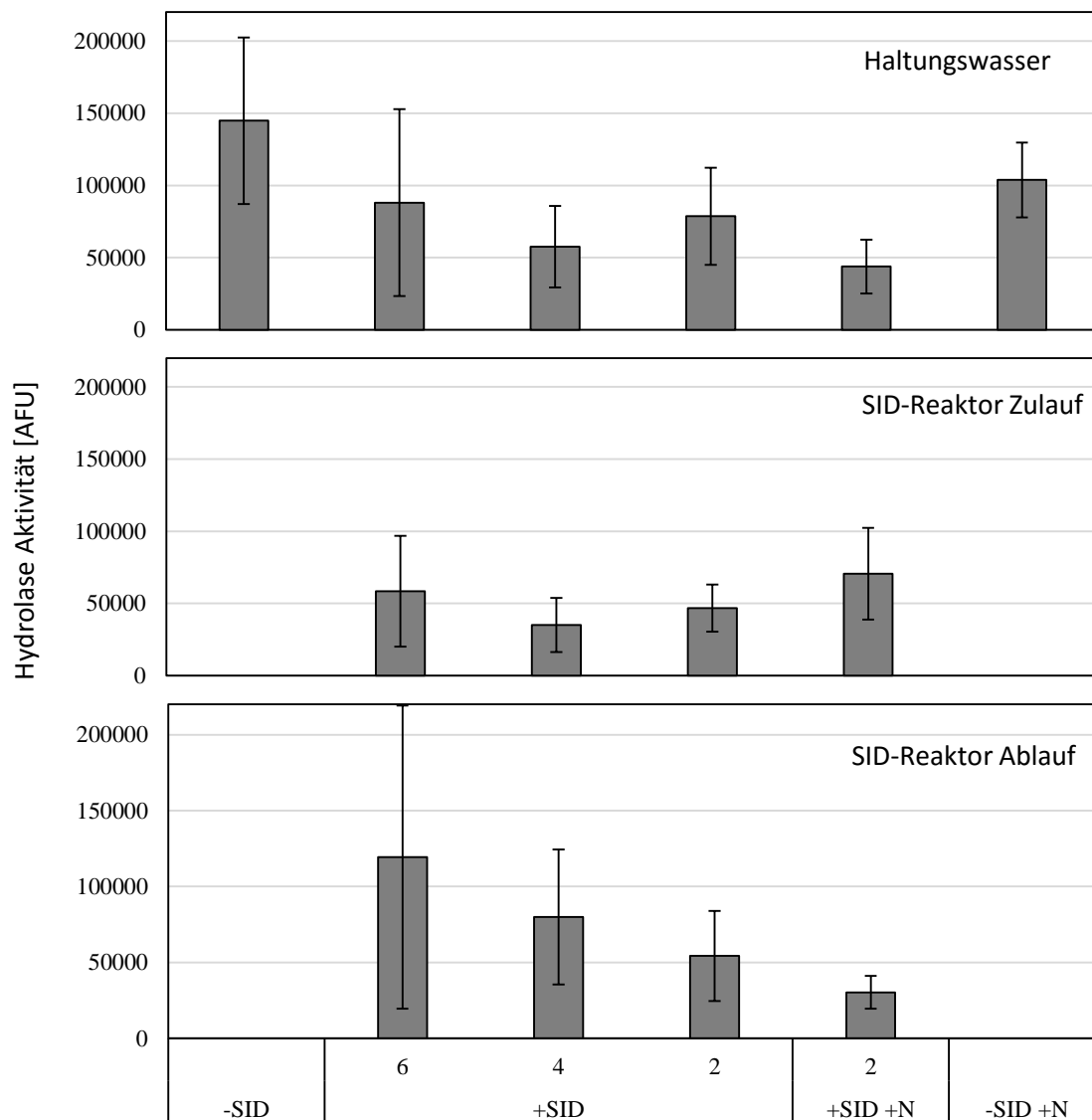


Abb. 6: Bakterienaktivität im Wasser der Haltungseinheiten und im Zulaufes und Ablauf des SID-Reaktors. Die Zahlen auf der X-Achse kennzeichnen die Retentionszeit. -SID: ohne SID-Reaktor; +SID: mit SID-Reaktor; -N: ohne zusätzliche Stickstoffquelle; +N: mit zusätzlicher Stickstoffquelle.

4 Fazit

Die Integration des **Selbstreinigenden Inertgas Denitrifikations** Reaktors (SID-Reaktor) in eine bestehende geschlossene Kreislaufanlage konnte ohne Probleme durchgeführt werden. Die Umstellung des SID-Reaktors von aeroben auf anoxischen Betrieb konnte innerhalb von wenigen Tagen durchgeführt werden. Ferner konnte ein wartungs- und betreuungsarmer Betrieb des Reaktors festgestellt werden, sodass ein kontinuierlicher Betrieb des Reaktors stattfinden konnte und zu anhaltender Nitrat Elimination aus dem System führte.

Alle getesteten Retentionszeiten zeigten stabile Denitrifikationsraten, die zu einer Nitrat Reduktion im System beisteuerten. Hier wurde gezeigt, dass die Nitrat Reduktion zum einen von der hydraulischen Beaufschlagung und zum anderen von der Nitrat Grundlast im System bzw. der Stickstoffzufuhr durch die Futtermengen abhängig ist. Im aktuellen Vorhaben konnte mit der geringsten Retentionszeit von 2 Stunden die höchsten Nitrat Entfernungsraten von $510 \text{ g NO}_3^- \text{-N/d} \cdot \text{m}^3$ ermittelt werden.

Wurde das Modul ohne Denitrifikationseinheit betrieben konnten negative Auswirkungen auf Betriebskosten, Wasserparameter und damit auch auf die Fische festgestellt werden. So konnte ein starker Abfall des pH-Wertes und des Säurebindungsvermögens (SBV) inklusive des damit einhergehenden steigenden Verbrauchs an Natriumbikarbonat (NaHCO_3) festgestellt werden. Wie in Kapitel 3.3.2.3 *Phase III - Abschaltung des SID-Reaktors* beschrieben, erhöht ein niedriger pH-Wert die Bildung von salpetriger Säure, die zu einem Fischsterben führen kann. Auch waren die TAN (mg/L) und Nitrit Werte (mg/L) ohne Denitrifikationseinheit im Modul höher. Sowohl erhöhte TAN Werte wie auch Nitrit Werte wirken sich negativ auf die Fischgesundheit aus. Zusammenfassend kann man also sagen, dass der SID-Reaktor direkt diverse Wasserparameter positiv beeinflusst und sich dadurch indirekt positiv auf das Fischwohl und die Fischgesundheit auswirkt.

Die mikrobiologischen Untersuchungen haben gezeigt, dass sich eine stabile Bakterienpopulation im SID-Reaktor nicht eingestellt hat bzw. durch die versuchsbedingten Änderungen an der Betriebsweise des Reaktors nicht eingestellt haben. Jedoch konnten durch die vorherrschende diverse Bakteriengemeinschaft die Denitrifikationsprozesse trotz sich ändernder Betriebsparameter stabil und kontinuierlich stattfinden.

Das Monitoring der Bakterienaktivität konnte zeigen, dass der SID-Reaktor die Bakterienaktivität und somit schlussfolgernd auch die Bakterienbelastung im Haltungswasser reduziert.

Zukünftig sollten weiterhin Tests unter erhöhter Nitrat Last durchgeführt werden, um genauere Aussagen über die oberen Leistungsgrenzen des SID-Reaktors treffen zu können. Durch die Bestimmung von Leistungsgrenzen wären anlagenspezifische Dimensionierungen des SID-Reaktors möglich.

Der Einsatz von Methanol hat sich, wie schon in anderen Studien gezeigt, als geeignet für den Betrieb einer Denitrifikationsstufe erwiesen. Methanol kann jedoch auch Risiken für Fische und Anlagenbetreiber mit sich bringen, daher sind bezüglich der einzusetzenden Kohlenstoffquelle weitere Untersuchungen geplant. Zum einen scheint die Schlammrückführung bzw. die Gewinnung einer Kohlenstoffquelle aus dem Anlagenabwasser eine potentielle Möglichkeit zu sein, den Einsatz einer externen Kohlenstoffquelle zu reduzieren. Zum anderen könnten biologisch abbaubare Kunststoffe (Boley et al. 2000) im Denitrifikationsreaktor eingesetzt werden. Diese werden von den Bakterien sowohl als Aufwuchskörper, wie auch als Kohlenstoffquelle genutzt. Hierbei nutzen die Bakterien die Menge an Kohlenstoff, die sie für ihre Stoffwechselprozesse brauchen, was eine Unter- oder Überdosierung ausschließen sollte.

Abschließend soll eine den Untersuchungen in der zweiten Projektphase folgende ökonomische und ökologische Betrachtung, unter einem praxisorientierten Betrieb des Denitrifikationsreaktors, das Potential zur Umweltentlastung und der Verbesserung der Wirtschaftlichkeit erfassen. Dabei sollen unter anderem das Wasser- und Energie Einsparpotential erfasst werden. Auch der tägliche Betreuungsaufwand, potentielle Fehlerquellen im Betrieb und eventuelle Verbesserungen in der Konstruktion des Reaktors sollen bewertet werden.

5 Literaturverzeichnis

- BOLEY, A.; MÜLLER, W. R.; HAIDER, G. (2000). *Biodegradable polymers as solid substrate and biofilm carrier for denitrification in recirculated aquaculture systems*. *Aquacultural Engineering* 22(1-2):75–85.
- DÜLGER, N.; KUMLU, M.; TÜRKMEN, S.; ÖLÇÜLÜ, A.; TUFAN EROLDOĞAN, O.; ASUMAN YILMAZ, H.; ÖÇAL, N. (2012). *Thermal tolerance of European Sea Bass (*Dicentrarchus labrax*) juveniles acclimated to three temperature levels*. *Journal of Thermal Biology* 37(1):79–82.
- FAO FISHERIES AND AQUACULTURE DEPARTMENT. (2014). *The State of World Fisheries and Aquaculture 2014*.
- LEE, P. G.; LEA, R. N.; DOHMANN, E.; PREBILSKY, W.; TURK, P. E.; YING, H.; WHITSON, J. L. (2000). *Denitrification in aquaculture systems: an example of a fuzzy logic control problem*. *Aquacultural Engineering* 23:37 – 59.
- MORETTI, A.; FERNANDEZ-CRIADO, M. P.; CITTOLIN, G.; RUGGERO GUIDASTRI. (1999). *Manual on Hatchery Production of Seabass and Gilthead Seabream, Volume 1*. Organization:194.
- SAUTHIER, N.; GRASMICK, A.; BLANCHETON, J. P. (1998). *Biological denitrification applied to a marine closed aquaculture system*. *Water Research* 32(6):1932–1938.
- MÜLLER-BELECKE, A.; ZIENERT, S.; THÜRMER, C.; KAUFHOLD, S.; SPRANGER, U. (2013). *The “self cleaning inherent gas denitrification-reactor” for nitrate elimination in RAS for pike perch (*Sander lucioperca*) production*. *Aquacultural Engineering* 57:18–23.
- VAN BUSSEL, C. G. J.; SCHROEDER, J. P.; WUERTZ, S.; SCHULZ, C. (2012). *The chronic effect of nitrate on production performance and health status of juvenile turbot (*Psetta maxima*)*. *Aquaculture* 326-329:163–167.
- VAN RIJN, J.; TAL, Y.; SCHREIER, H. J. (2006). *Denitrification in recirculating systems: Theory and applications*. *Aquacultural Engineering* 34(3):364–376.