Mecklenburg Vorpommern

Landesforschungsanstalt
für Landwirtschaft und Fischerei

Abschlussbericht

Nährstoffaustragsysteme unter Brackwasserbedingungen

Forschungs-Nr.: **DRM 125**

Laufzeit: **15.11.2012- 31.10.2015**

verantw. Themenbearbeiter: **Dipl. Biologe Norman Reuter**

Beteiligte Einrichtungen: **Universität Rostock, AG Aquatische Ökologie**
Universität Hamburg, Mikrobiologie, AG Spieck

31.10.2015

_____
Themenbearbeiter

_____
Institutsleiter

Institut für Fischerei

Fischerweg 408
18069 Rostock
www.lfamv.de

GLIEDERUNG Seite

1 Zusammenfassung 1

2 Untersuchung der Wirkungsweise modifizierter Moving-Bed-Filter unter dem Einfluss von Brackwasser (Teilprojekt 1) 1

2.1 Vorbetrachtung 2

2.2 Ergebnisse und Diskussion 2

2.2.1 Moving-Bed- Filter 2

2.2.2 Filterkörperbehandlung mit Plasma 5

2.2.3 Bakteriengemeinschaft 7

2.3 Resümee 7

3 Reduzierung der Ablaufwassermengen von Kreislaufanlagen (Teilprojekt 2) 8

3.1 Bilanzierbarkeit von Nährstoffen in Einzelbecken 8

3.2 Disc-Filter 10

3.3 Denitrifikation 11

3.3.1 Offenes System 11

3.3.2 SID-Reaktoren 12

3.4 Resümee 13

4 Klärung von abfließendem Produktionswasser mittels Makrophyten unter Brackwasserbedingungen (Teilprojekt 3) 14

4.1 Ergebnisse des Untersuchungsjahres 2013 15

4.2 Ergebnisse des Untersuchungsjahres 2014 18

4.2.1 Ergebnisse und Diskussion 19

4.2.2 Parallelkultur von Wasserlinse und Weide 21

4.3 Ergebnisse des Untersuchungsjahres 2015 21

4.3.1 Ergebnisse und Diskussion 22

4.4 Messung der Schwermetallbelastung und des Proteingehalts von Kleiner Wasserlinse (*Lemna minor*) 23

4.5 Resümee 24

Tabellenverzeichnis **Seite**

Tabelle 1: Gesamtumsatz von total ammonia nitrogen (TAN) und Nitrit (NO_2^--N) pro m^{-3} FK. Oktober 2014 3

Tabelle 2: Unterschiedliche Plasmabehandlungen durch das INP Greifswald. 5

Tabelle 3: Nährstoffentzüge von Pappeln und Weiden im Kurzumtrieb auf landwirtschaftlichen Flächen (Scholz *et al.* 2006) und von *Salix alba* in aquaponischer Gewächshauskultur 2014 (rote Ziffern). Die untere Vertrauensgrenze für Werte von *S. alba*, resultierend aus Fehlerabschätzungen der Haftwasserkorrektur bzw. der Bestimmung der effektiven (einschließlich aquatischen) Wachstumsfläche, wird mit -30 % veranschlagt. Schoor (2014) 20

Tabelle 4: Biomasseertrag und Nährstoffentzug für Silberweide und Wasserlinse für 2014 und 2015. 23

Tabelle 5: Konzentrationen an Rohprotein, Blei Cadmium, Quecksilber und Arsen in *Lemna minor*für die Produktionsjahre 2014 und 2015und deren Grenzwerte für Nahrungsmittel. 23

Abbildungsverzeichnis **Seite**

Abbildung 1: Filterkörper aus herkömmlichem (links) und modifiziertem Biofilter (rechts). 3

Abbildung 2: Nitritverbrauch [µM h-1] durch Nitrit oxidierende Bakterien (NOB) der Biofilter GMA, GMB, KR1, KR2/1, KR2/2 im Oktober 2014. (Hüpeden 2014). 3

Abbildung 3: Nitritbildung [µM h-1] durch Ammoniak oxidierende Bakterien (AOB) der Biofilter GMA, GMB, Kr1, Kr2/1, Kr2/2 im Oktober 2014. (Hüpeden 2014). 4

Abbildung 4: (A) Nitritverbrauch [µM h-1] durch Nitrit oxidierende (NOB) und (B) Nitritbildung [µM h-1] durch Ammoniak oxidierende Bakterien (AOB) der Biofilter Kr1, Kr2/1, Kr2/2 im Dezember 2014 (Hüpeden 2014). 4

Abbildung 5: Mit Plasma behandelte Filterkörper (B - D) und die Kontrolle (A) nach 6 Wochen Versuchszeit. 5

Abbildung 6: Nitritbildung durch Ammoniak oxidierende Bakterien (AOB) von 3 unterschiedlich mit Plasma behandelten Füllkörpern (-9, -10, -11) im Vergleich zu unbehandelten Filterkörpern (-K). 6

Abbildung 7: Nitritabbau durch Nitrit oxidierende Bakterien (NOB) von 3 unterschiedlich mit Plasma behandelten Füllkörpern (-9, -10, -11) im Vergleich zu unbehandelten Filterkörpern (-K). 6

Abbildung 8: Klar detektierbare Akkumulation von Ammonium in Einzelbecken (9, 10) mit unterschiedlichem Schnäpelbesatz im Vergleich zum Zulaufwasser (Z) der Kreislaufanlage aus Schoor (2014). 9

Abbildung 9: Dynamik der Phosphatkonzentration in Einzelbecken (9, 10) mit unterschiedlichem Schnäpelbesatz im Vergleich mit dem Zulaufwasser (Z). Schwarze Pfeile dokumentieren empirisch den Zeitversatz des Wasseraustauschs der Einzelbecken. Rote Pfeile Rote Pfeile dokumentieren eine Nettoakkumulationsphase von Phosphat im Becken 10. (Nach Schoor, 2015) 9

Abbildung 10: (A) Disc-Filter, (B) austauschbare Filterpatrone. 10

Abbildung 11: (A) Scheiben der Filterpatrone, (B) feine Fräsungen auf den einzelnen Scheiben. 10

Abbildung 12: Absetzbecken als offener, nicht belüfteter und Sediment akkumulierender Reaktor. 11

Abbildung 13: Eliminierung gelöster N-Nährstoffe für zwei Betriebszyklen des offenen, nicht aktiv belüfteten und Sediment akkumulierenden Reaktors bei praktisch relevantem Zulauf des Entsorgungswassers eines Trommelfilters, modifiziert nach Rudolph (2014) 12

Abbildung 14: SID (Selbstreinigende Inertgas Denitrifikation)- Reaktoren der Fa. Kunststoff Spranger 13

Abbildung 15: Forschungsgewächshaus in Born. 14

Abbildung 16: Silber-Weide (*Salix alba*) und Kleine Wasserlinse (*Lemna minor*) in der Aquaponikanlage in Born im Mai 2014. 15

Abbildung 17: Kultivierungsrinnen mit Weidensteckhölzern und Wasser- und Teichlinsenbesatz im Untersuchungsjahr 2013. 16

Abbildung 18: Wurzelbildung bei *Salix alba* über 9 Wochen Ende Juli 2013 trotz Strahlungsstress. 16

Abbildung 19: Wasser- bzw. Teichlinsenkultur nach Neubesatz im September 2013. 17

Abbildung 20: Rauhes Hornblatt (*Ceratophyllum demersum*) in Prozesswasser. 18

Abbildung 21: (A) Blattnekrosen an den Austrieben von *S. alba*, (B) Salzkristalle an Blattrand, (C) Austriebe an den Triebspitzen. 19

Abbildung 22: Holztrockenmasseerträge unterschiedlicher Weidenklone (Boelcke & Kahle 2008) auf typischen Böden des nordostdeutschen Tieflands und Gesamttrockenmasseertrag der aquaponischen Kultur von *S. alba* 2014. Symbole repräsentieren den Holztrockenmasseertrag, zugehörige Whisker

90 % Konfidenzintervalle. Die Vertrauensgrenze für *S. alba* resultiert aus Fehlerabschätzungen der Haftwasserkorrektur bzw. der Bestimmung der effektiven (einschließlich aquatischen) Wachstumsfläche. Typische Weidenkulturerträge terrestrischer Standorte nach Scholz *et al.* (2006, Tab. 2). Nach Schoor (2015). 20

Abbildung 23: Relativ zur Dualkultur (Weide-Wasserlinse) normierte Trockenmasseproduktion der Monokultur von Wasserlinsen 2014. Daten basieren auf der integrierten Produktion von jeweils 3, über die Versuchsgruppen alternierend angeordneten, separaten Rinnen zur Homogenisierung der Einflüsse der Lichtfeldgradienten und –abnormitäten. * starke Abweichung durch vorzeitigen Übergang von Wasserlinsen der Monokulturen in das Winterruhestadium (absinken, nicht erntefähig). Schoor (2014) 21

Abbildung 24:Holztrockenmasseerträge unterschiedlicher Weidenklone (Boelcke & Kahle 2008) auf typischen Böden des nordostdeutschen Tieflands und Gesamttrockenmasseerträge der aquaponischen Kultur von *S. alba* 2014/2015. Symbole repräsentieren den Holztrockenmasseertrag, zugehörige Whisker 90 % Konfidenzintervalle. Die Vertrauensgrenze und Prognosen für *S. alba* resultiert aus Fehlerabschätzungen der Haftwasserkorrektur bzw. der Bestimmung der effektiven (einschließlich aquatischen) Wachstumsfläche. Typische Weidenkulturerträge terrestrischer Standorte nach Scholz *et al.* (2006, Tab. 2) 22

Alle nicht anders gekennzeichneten Fotos sind vom Autor.

Abkürzungsverzeichnis

a	Jahr
AOB	Ammoniak oxidierende Bakterien
C	Kohlenstoff
CO_2	Kohlenstoffdioxid
FK	Filterkörper
g	Gramm
GMA	Großmodul A
GMB	Großmodul B
h	Stunde
ha	Hektar
Kr 1	Kreislauf 1
Kr 2	Kreislauf 2
m	Meter
N / N_2	Stickstoff
NOB	Nitrit oxidierende Bakterien
NO_2^-	Nitrit
P	Phosphor
PSU	Practical Salinity Unit
t	Tonne
TAN	total ammonia nitrogen
TM	Trockenmasse

1 Zusammenfassung

Der Entfernung von gelösten und partikulären Stoffwechselendprodukten kommt in geschlossenen Kreislaufsystemen zur Fischzucht eine zentrale Bedeutung zu. Durch Fischkot und Futterreste fallen eine Vielzahl von Nährstoffen, wie Ammonium, Nitrit, Nitrat und Orthophosphat an, die je nach Konzentration im System einen Stressfaktor darstellen, der im Extremfall toxisch wirken kann. Die Eliminierung dieser Nährstoffe kann durch Umwandlung in unschädliche Substanzen durch einen Moving-Bed-Filter (Biofilter), Verbrauch durch Organismen (Pflanzenkultur in Aquaponik) oder die Entfernung aus dem System erfolgen.

Ziel des Projektes war die Weiterentwicklung und Kombination eines Mehrkomponentensystems zur Retention von gelösten und partikulären Stoffen, bestehend aus Moving-Bed, mechanischer Reinigung (Absetzbecken mit Bürsten), Aquaponik und Ausnutzung des natürlichen Sedimentations-/ Flotationspotentials und einer daraus resultierenden Reduzierung der Abwassermengen. Die anfallenden Partikelfrachten können so ein weiteres Mal genutzt und anschließend eingedickt und entsorgt oder z.B. der Phosphorrückgewinnung zugeführt werden. In den Teilprojekten wurden deshalb modifizierte Biofilter, Denitrifikationsanlagen zur Reduzierung der Nitratkonzentrationen in den Aufzuchtkreisläufen und in der Abwasseraufbereitung gebräuchliche Filtersysteme angeschafft und in bestehende Module integriert. Im Rahmen dieses Projektteils wurde im April 2014 eine Qualifizierungsarbeit zur Stickstofftransformation im offenen, nicht belüfteten und Sediment akkumulierenden Reaktor angefertigt, die gute Grundlagen für den Betrieb von Denitrifikationsanlagen lieferte.

Neben der technischen Komponente wurden 2013, 2014 und 2015 Untersuchungen zum Nährstoffaustrag mittels Pflanzen im Gewächshaus der Versuchsanlage Born durchgeführt. Im Jahresverlauf 2014 wurde die bereits 2013 untersuchte Kombination von Kleiner Wasserlinse (*Lemna minor*) und Silberweide (*Salix alba*) in Aquaponik in Bezug auf Wachstum und Nährstoffassimilation weiter untersucht und optimiert. Von März bis Oktober konnten sowohl für *S. alba* Wachstumsraten erzielt werden, die denen von terrestrischen Weidenkulturen entsprachen. Auch in diesem Teilprojekt wurden Qualifizierungsarbeiten angefertigt, die sich mit der Nährstofftransformation autotropher Makroorganismen (*L. minor*) beschäftigt haben.

Der vorliegende Abschlussbericht gibt Ergebnisse wieder, die in Born oder in Zusammenarbeit mit den Kooperationspartnern (Universität Rostock, Universität Hamburg) erzielt wurden. Da bestimmte Untersuchungen durch die jeweiligen Kooperationspartner durchgeführt wurden und diese zu Ende der Projektlaufzeit einen Abschlussbericht verfassen müssen, werden die Methoden und Ergebnisse in diesem Abschlussbericht nur zusammengefasst bzw. können detailliert in dem jeweiligen Bericht nachgelesen werden. Die Abschlussberichte der jeweiligen Partner befinden sich im Anhang. Die im Rahmen des Projektes angefertigten Qualifizierungsarbeiten werden dem Bericht als CD beigelegt, da sie den Umfang dieses Berichtes überschreiten würden.

2 Untersuchung der Wirkungsweise modifizierter Moving-Bed-Filter unter dem Einfluss von Brackwasser (Teilprojekt 1)

Der Abbau toxischer Stoffwechselendprodukte und die damit einhergehende Verbesserung der Wasserqualität in geschlossenen Fischkreisläufen ist ein permanentes Ziel der Aquakulturforschung. Biologische Bewegtbett-Filter, sogenannte Moving-Beds, stellen aktuell den technischen Standard dar. Für die Versuchsanlage in Born wurden im Projektrahmen zwei modifizierte Biofilter angeschafft, die sich sowohl in Bauform als auch Funktion von den bereits in Betrieb befindlichen unterscheiden. Beide haben einen geringeren Durchmesser, eine verstellbare Einblastiefe (Belüftung) und können über den permanenten Betrieb hinaus im Intervall belüftet werden. Eine periodische, zeitlich begrenzte Belüftung könnte durch die dadurch verlängerten Ruhephasen und beruhigtere Bewegung der Filterkörper zu einer besseren Aktivität und damit Umsatzrate der Bakterien im Mikrofilm führen. In Zusammenarbeit mit der Mikrobiologie der

Universität Hamburg wurde mittels verschiedener Untersuchungen hinsichtlich Aktivität, Umsatzrate, Bestimmung der Bakteriengesellschaft etc. intensiv an einem optimalen Betrieb dieser Filtersysteme gearbeitet. Die Arbeiten fanden im Rahmen einer Promotion und einer Bachelorarbeit statt.

2.1 Vorbetrachtung

Im Zeitraum 2013- 2015 fanden fortlaufend alle 1- 3 Monate Aktivitätstests an Biofiltern unterschiedlicher Fischhaltungssysteme und damit Fischarten statt (vgl. Anhang II). Für die Prüfung der modifizierten Biofilter wurden zwei baugleiche Kreisläufe installiert, die mit gleicher Temperatur und Durchfluss betrieben wurden und im Folgenden als Kr1 bzw. Kr2 bezeichnet werden. Kr1 setzt sich aus vier Komponenten zusammen: Grundbecken, drei Fischbecken (a 5 m^3), einer mechanischen Reinigungsstufe und einem Moving-Bed-Biofilter (3 m^3). Kr2 ist bis auf den Biofilter baugleich aufgebaut. Hier wurde der große Biofilter (3 m^3) durch zwei kleinere (1,5 m^3) ersetzt. Diese sind parallel geschaltet, mit der gleichen Menge Filterkörper gefüllt und münden in dasselbe Grundbecken. Sie werden im Text als Kr2/1 und Kr2/2 bezeichnet. Sowohl Einblastiefe als auch Belüftungsintervall wurden anfänglich nicht verändert, um die neuen Biofilter mit dem bereits bestehenden in Kr1 bei andauerndem Betrieb vergleichen zu können. In einer zweiten Phase sollte eine Intervallschaltung der Belüftung getestet werden. Im Zuge eines Ausfalls der Belüftungsgebläse wurde allerdings deutlich, dass dies mit Problemen behaftet war. Beide Systeme waren mit Sibirischen Stören (*Acipenser baerii*) in gleicher Anzahl und Klassifikation besetzt (Startgewicht: 300 kg je Kreislauf; Gewicht: Ø 1,8 kg). Die eingesetzte Störart wurde in diesem Fall als reiner Besatzfisch gewählt, um die nötige Belastung mit Stoffwechselmetaboliten für die Biofilter zu erreichen. In Born wurden über den Projektzeitraum insgesamt fünf Biofilter mittels monatlicher Aktivitätstests und Messung der physikalischen und chemischen Parameter (Sauerstoff, pH, PSU, Temperatur) untersucht. Des Weiteren ergab sich im Zuge eines wissenschaftlichen Austauschs mit Mitarbeitern des INP Greifswald (Leibniz-Institut für Plasmaforschung und Technologie e. V.) die Möglichkeit Filterkörper mittels Plasma in ihrer Oberflächenbeschaffenheit so zu verändern, dass sich die Absorptionsfähigkeit erhöht. Dies wurde in Hinblick auf mögliche nachfolgende Projekte aufgegriffen und in einem Vorversuch getestet. Eine solche Oberflächenbehandlung könnte zukünftig die Ansiedlung von Mikroorganismen verbessern und so die Anlaufphase von Biofiltern mit neuen Filterkörpern erheblich verkürzen. Darüber hinaus fand durch die AG Spieck der Universität Hamburg eine Charakterisierung der an der Nitrifikation beteiligten Bakteriengesellschaft statt. Durch die Universität Hamburg wurde ein separater Abschlussbericht angefertigt aus dem im folgenden Punkt die wichtigsten Ergebnisse zusammengefasst wurden. Die detaillierten Ergebnisse sind dem Endbericht des Kooperationspartners AG Spieck, Universität Hamburg, (Anhang II) zu entnehmen.

2.2 Ergebnisse und Diskussion

2.2.1 Moving-Bed- Filter

Die neu angeschafften Biofilter wurden nach einer Umbauphase Anfang 2014 in Betrieb genommen und konnten nach Ablauf der Inkubationszeit ab Juni 2014 in den Beprobungszyklus integriert werden. Bei Betrachtung der Filterkörper (FK) in den modifizierten Biofiltern (Kr2/1 & Kr2/2) war rein optisch ein sehr gut ausgebildeter Biofilm zu erkennen, der eine dementsprechend hohe Umsatzrate suggeriert (Abbildung 1). Tatsächlich konnte in Kr2/1 und Kr2/2 bei konstantem Betrieb eine sehr hohe Umsatzrate von bis zu 15 g NO_2^--N h^{-1} m^{-3} und 14 g TAN h^{-1} m^{-3} gemessen werden. In Kr1 waren es dagegen nur 8 g NO_2^--N h^{-1} m^{-3} bzw. 4 g TAN h^{-1} m^{-3} (Tabelle 1). Die durchgeführten Labortests im Oktober 2014 zeigten eindeutig eine höhere Aktivität der ammonifizierenden (AOB) und nitrifizierenden (NOB) Bakterien in Kreislauf 2 (Abbildung 2 & 3). Auch im Dezember 2014 waren deutlich höhere Aktivitäten der ammonifizierenden und nitrifizierenden Bakterien in den modifizierten Biofiltern (Kr2/1 & Kr2/2) zu verzeichnen (Abbildung 4). Sie schafften eine doppelt so hohe Nitritbildung, d.h. Ammonifizierung (Abbildung

4B) und verbrauchten in einem Zeitraum von vier Stunden doppelt so viel Nitrit (Nitrit -> Nitrat) wie die Bakterien in Kr1 (Abbildung 4A).

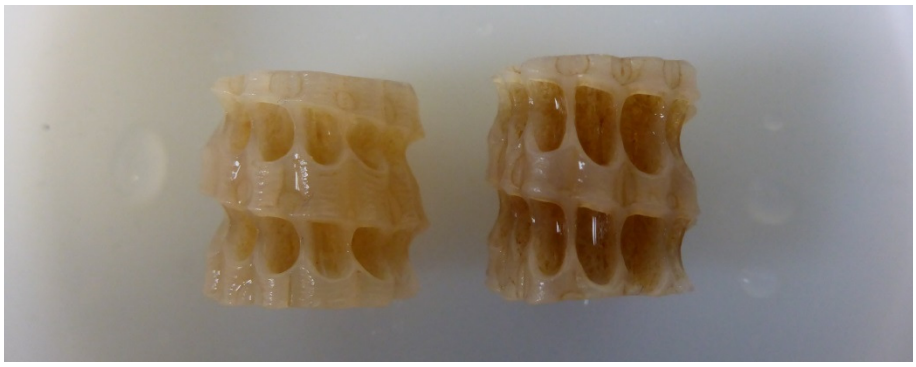


Abbildung 1: Filterkörper aus herkömmlichem (links) und modifiziertem Biofilter (rechts).

Tabelle 1: Gesamtumsatz von total ammonia nitrogen (TAN) und Nitrit (NO_2^--N) pro m^{-3} FK. Oktober 2014

	Kr1	Kr2/1	Kr2/2
TAN [g h^{-1} m^{-3}]	3,81	13,99	13,79
NO_2^-- N [g h^{-1} m^{-3}]	8,25	13,98	14,99

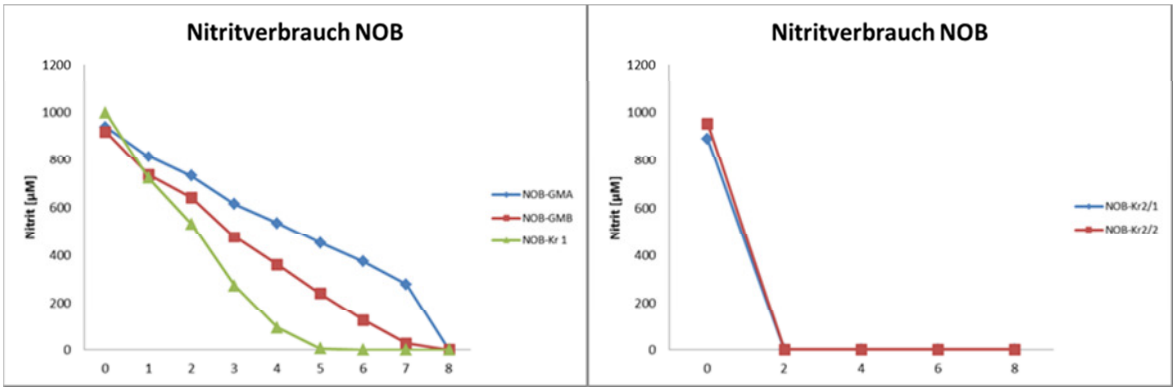


Abbildung 2: Nitritverbrauch [µM h-1] durch Nitrit oxidierende Bakterien (NOB) der Biofilter GMA, GMB, KR1, KR2/1, KR2/2 im Oktober 2014. (Hüpeden 2014).

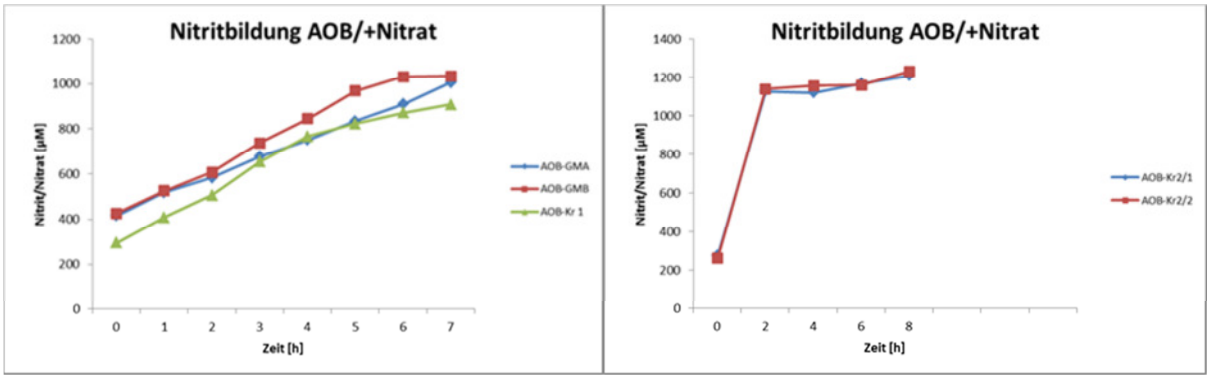


Abbildung 3: Nitritbildung [µM h-1] durch Ammoniak oxidierende Bakterien (AOB) der Biofilter GMA, GMB, Kr1, Kr2/1, Kr2/2 im Oktober 2014. (Hüpeden 2014).

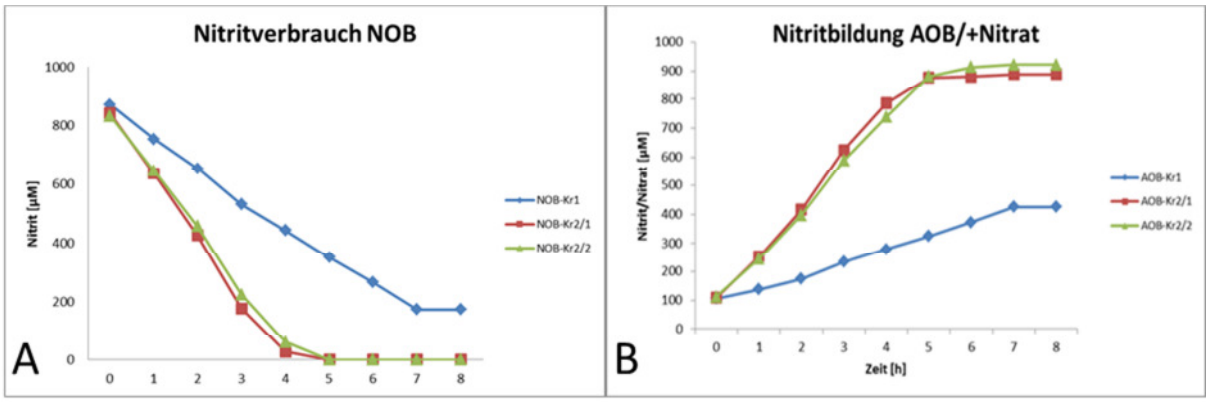


Abbildung 4: (A) Nitritverbrauch [µM h-1] durch Nitrit oxidierende (NOB) und (B) Nitritbildung [µM h-1] durch Ammoniak oxidierende Bakterien (AOB) der Biofilter Kr1, Kr2/1, Kr2/2 im Dezember 2014 (Hüpeden 2014).

Die erhöhte Umsatzrate in den Biofiltern in Kr2 war sehr wahrscheinlich eine Folge der reduzierten Bewegung der Filterkörper in der Wassersäule. Die verminderte Zirkulationsgeschwindigkeit der FK lässt sich durch die veränderte Bauart (Zylinder mit geringerem Durchmesser, Bodenablauf) und das installierte Gebläsesystem erklären, was die Wirkungsweise des Filters angesichts der Messergebnisse verbessert. Eine daraus möglicherweise resultierende verminderte CO_2- Entgasung des Systems gilt es zu prüfen, ist nach momentanen Gesichtspunkten aber nicht zu erwarten. Die anfänglich im Projekt geplante Intervallschaltung des Gebläses war im Realbetrieb mit Problemen verbunden, da sich die aufschwimmenden Filterkörper an der Oberfläche sammelten und bei erneut einsetzender Belüftung nur schwer bis gar nicht in Bewegung zu bringen waren. Dies würde zukünftig sehr starke Gebläse erfordern, die einer möglichen durch die Intervallschaltung angestrebten Energieersparnis entgegenwirken.

Die monatlichen Untersuchungen der verschiedenen Biofilter haben gezeigt, dass die Aktivität und Leistungsfähigkeit von Biofiltern im Moving-Bed-Verfahren verschiedenen Faktoren unterliegen (Hüpeden 2015). Zum einen wurde festgestellt, dass die Aktivität der Mikroorganismen nach längerem Stillstand eines Systems trotz erneutem Fischbesatz sehr gering ist. Nach 8 - 12 Wochen Stillstand stellte sich eine Reduzierung der Aktivität der Mikroorganismen ein, die eine sehr lange Anlaufphase bis zu 4 Wochen bis zur vollen Leistungsfähigkeit des Biofilters zur Folge hatte. Für einen optimalen Betrieb von Moving-Bed-Biofiltern sollte ein Leerstand des Systems unbedingt vermieden werden. Zum anderen konnte ein positiver Einfluss eines geringen Salzgehaltes von 0,5 % (5 PSU) NaCl festgestellt werden. In Laborversuchen der Universität

Hamburg zeigte sich bedingt durch die geringe Salinität eine Steigerung der Aktivität von 15 % bei den Ammonifikanten und sogar 35 % bei den Nitrifikanten (Hüpeden 2015).

Die Aktivitätstests und nasschemischen Wasseranalysen zeigten darüber hinaus in allen Systemen eine eindeutige Abhängigkeit von Aktivität und pH-Wert an. Dies war zu erwarten, da jeder Bakterienstamm seinen spezifischen pH- Bereich hat. Die ammonifizierenden und speziell die nitrifizierenden Mikroorganismen reagieren sehr empfindlich auf pH-Wert-Änderungen (± 0,5) im Medium des Biofilters. Der pH Wert sollte konstant auf 7,8 – 8 gehalten werden. Zu starke Anstiege oder Abfälle führen zu einer Depression im Umsatz. Dementsprechend sind hohe pH-Wert Schwankungen für den sicheren Betrieb von biologischen Moving-Bed-Filtern unbedingt zu vermeiden. Hier ist in nachfolgenden Projekten zu untersuchen, inwieweit eine automatische pH – Wert Regulierung zu realisieren ist. Die detaillierten Ergebnisse sind dem Endbericht der Universität Hamburg zu entnehmen.

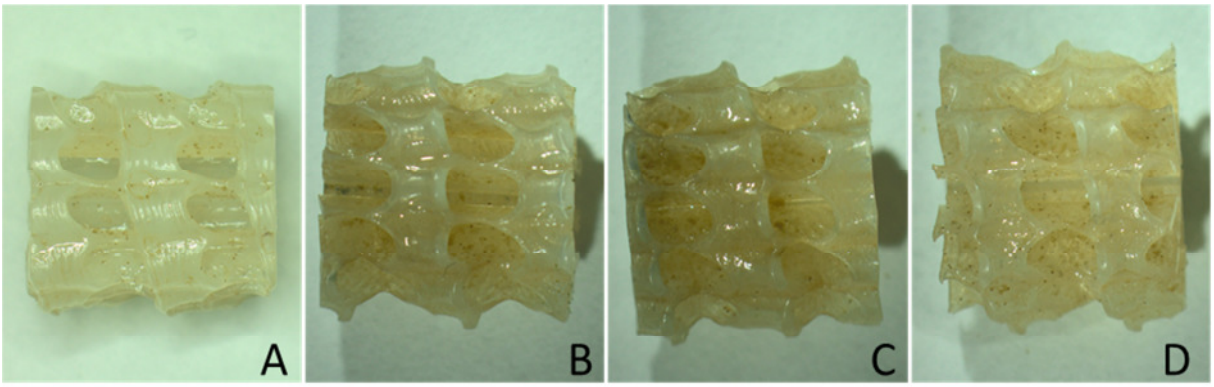
2.2.2 Filterkörperbehandlung mit Plasma

Für die Untersuchung zur Verbesserung der Adhäsionskraft wurden Filterkörper im INP Greifswald drei unterschiedlichen Plasmabehandlungen unterzogen (Tabelle 2).

Tabelle 2: Unterschiedliche Plasmabehandlungen durch das INP Greifswald.

Plasmabehandlungen der Filterkörper	
FK 09	Plasmafunktionalisierung
FK 10	Plasmamodifizierung
FK 11	Plasmaaktivierung

Diese wurden anschließend mit einer zusätzlichen Kontrollgruppe jeweils in Netzbeuteln relativ frei flotierend in einen Biofilter eingesetzt. Nach einer vierwöchigen Versuchszeit zeigte sich bereits optisch ein besserer Bewuchs im Vergleich zu der Kontrolle. Nach sechs Wochen wurde dieser optische Eindruck noch stärker wobei sich die drei Behandlungen sowohl von der Kontrolle als auch untereinander unterschieden (Abbildung 5). Die Hamburger Mikrobiologen konnten diese optischen Eindrücke durch Aktivitätsmessungen auch messen. Bei den Ammoniak oxidierenden Bakterien war die Nitritbildung (Ammoniumabbau) auf den mit Plasma behandelten Filterkörpern mit 600 µM (über 8 h) fast doppelt so hoch wie die der Kontrolle (Abbildung 6)



.

Abbildung 5: Mit Plasma behandelte Filterkörper (B - D) und die Kontrolle (A) nach 6 Wochen Versuchszeit.

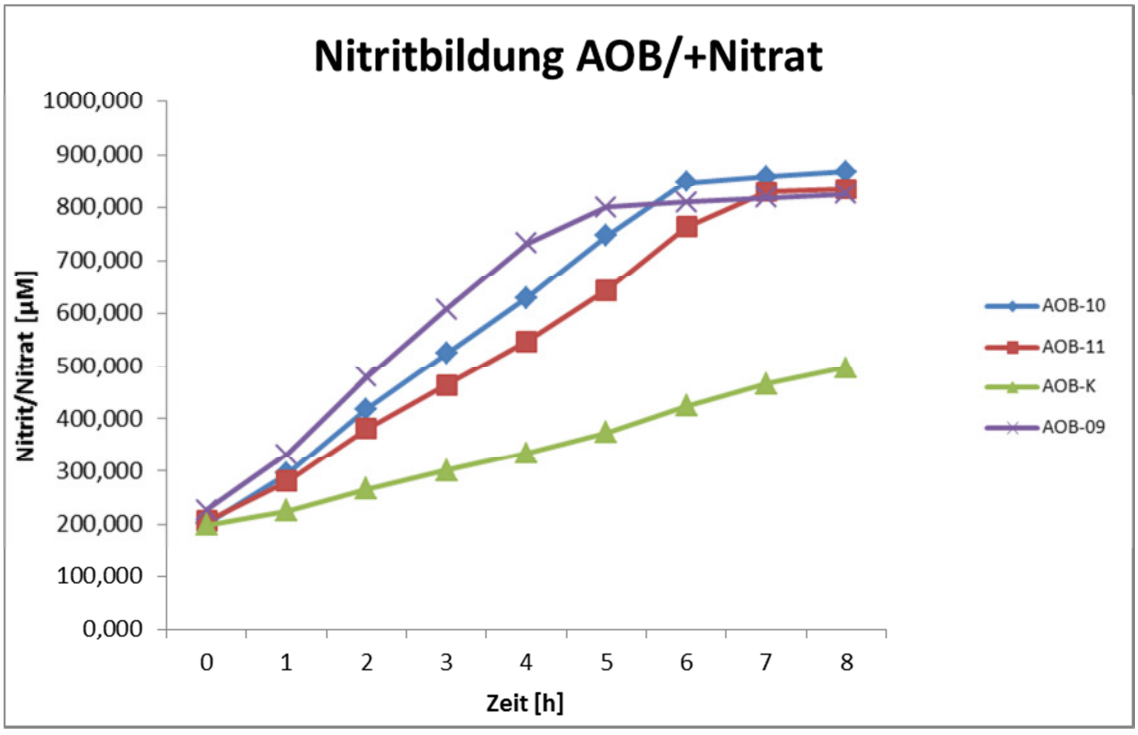


Abbildung 6: Nitritbildung durch Ammoniak oxidierende Bakterien (AOB) von 3 unterschiedlich mit Plasma behandelten Füllkörpern (-9, -10, -11) im Vergleich zu unbehandelten Filterkörpern (-K).

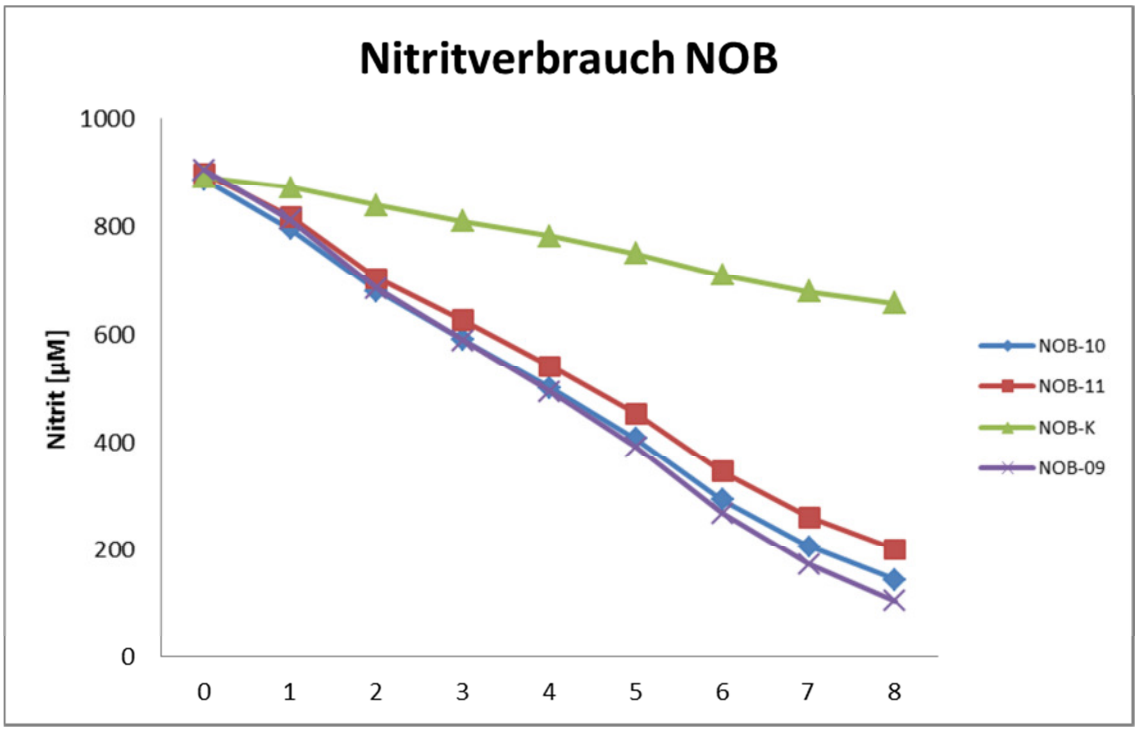


Abbildung 7: Nitritabbau durch Nitrit oxidierende Bakterien (NOB) von 3 unterschiedlich mit Plasma behandelten Füllkörpern (-9, -10, -11) im Vergleich zu unbehandelten Filterkörpern (-K).

Bei den Nitrit oxidierenden Bakterien war die Abbaurate auf den behandelten Filterkörper mit 700 µM (über 8 h) sogar dreimal höher als bei der Kontrolle (Abbildung 7). Es ist deutlich zu

sehen, dass die mit Plasma behandelten Filterkörper eine kürzere Phase der Mikrofilmbildung besitzen und schon nach kurzer Zeit eine bessere Abbauleistung aufweisen.

2.2.3 Bakteriengemeinschaft

Auf den Filterkörpern der Biofilter entstehen Kolonien aus Ammonium oxidierenden (AOB) und Nitrit oxidierenden Bakterien (NOB), die in Koexistenz mit heterotrophen Bakterien einen dichten Biofilm bilden. Mit Hilfe molekularbiologischer Analysen (PCR) wurden die Bakterien detektiert, die für die einzelnen Stufen der Nitrifikation verantwortlich sind (Hüpeden *et al*. 2014, 2015). Als vorrangiges AOB wurde eindeutig *Nitrosomonas spec*. bestimmt. Bei den NOB kommen *Nitrospira defluvii*, *Nitrotoga arctica* und *Nitrobacter spec*. vor. Besonderheiten stellen dabei *Nitrotoga arctica* mit einem Temperaturoptimum von 13 °C und *Nitrospira marina*, eine marine Art, dar.

2.3 Resümee

Eine leichte Salinität (0,5 %) (5 PSU) erhöht die Aktivität der ammonifizierenden und nitrifizierenden Bakterien.

Die Aktivität der Mikroorganismen, speziell der Nitrifikanten, hängt stark vom pH-Wert ab. Das Optimum läge bei pH 7,6 – 8.

Eine verminderte Bewegung der Filterkörper in der Wassersäule hat einen positiven Effekt auf die Umsatzrate der Mikroorganismen in den getesteten Biofiltern.

Durch Oberflächenbehandlung mit Plasma lässt sich die Bewuchsdauer neuer Filterkörper reduzieren und es wird damit eine höhere Abbauleistung zu einem früheren Zeitpunkt erreicht.

3 Reduzierung der Ablaufwassermengen von Kreislaufanlagen (Teilprojekt 2)

Nach der mechanischen Reinigung des zirkulierenden Wassers in geschlossenen Kreislaufanlagen befindet sich noch eine Vielzahl an Schwebstoffen im Medium, die durch Zersetzung und Rücklösung zu einer neuen Quelle für schädliche Stoffe werden können. Hohe Nährstoffwerte werden nicht nur durch Rücklösung aus dem Sediment und Schwebstoffen verursacht. Aufgrund der Ergebnisse der Nährstoffbilanzierungen im DRM 107 (2009-2012) wurde als wahrscheinlich angenommen, dass hohe Nährstoffpeaks auch durch Akkumulation in den Fischbecken verursacht werden. Mittels einer Untersuchung zur Bilanzierbarkeit der Nährstoffe von Einzelbecken, die 2014 durchgeführt wurde, konnte diese Vermutung bestätigt werden. Auch das bei der biologischen Umwandlung von Ammonium und Nitrit entstehende Nitrat aus dem Biofilter kann in den Fischbecken eine für den Organismus kritische Konzentration erreichen. Um diese möglicherweise toxisch wirkenden Substanzen zu eliminieren, muss in den meisten Fällen ein kostenintensiver Wasseraustausch durchgeführt werden. Eine Reduzierung der Ablaufwassermengen führt dementsprechend zu einer Kostenminimierung. Für die Verringerung der Ablaufwassermengen in Systemen der Aquakultur bedarf es geeigneter Filtersysteme, die in der Lage sind auch feine Partikel aus dem Wasser zu entfernen. Im Fall des Nitrats reicht diese Technik nicht aus. Die Nitrat-Reduktion ist nur durch Denitrifikation möglich. In Born wurden eine mechanische und eine chemisch-biologische Komponente der Wasseraufbereitung getestet. Im Folgenden Abschnitt werden Funktion und Aufbau der Filtertypen dargestellt.

3.1 Bilanzierbarkeit von Nährstoffen in Einzelbecken

Die Untersuchungen wurden im 24 h- Zyklus mit 0,5 h Auflösung durch simultane Beprobung im zentralen Zulauf und den Abflüssen zweier unterschiedlich besetzter Fischbecken (Besatz: Ostseeschnäpel) durchgeführt (Schoor, 2015). Die Analyse der Wasserproben aus dem zentralen Zulauf des Systems GMB (Biofilterauslauf) und den direkten Ausläufen zweier Einzelbecken zeigte eine eindeutige Akkumulation von Ammonium in den Becken. Die Ammoniumkonzentration erreichte Peaks von 14 µmol l^{-1} in Becken 10 während zeitgleich im Zulauf nur maximal 7 µmol l^{-1} gemessen wurden (Abbildung 8). Bei der Bestimmung der Phosphorkonzentration war zeitweise ein ähnliches Ergebnis zu sehen. In Becken 10 wurde zwischen 8 Uhr und 13 Uhr eine P-Akkumulation gemessen. Zwischen 19 Uhr und 22 Uhr war darüber hinaus ein Zeitversatz zwischen Zulauf und Ablauf der Becken von 1,5- 2 Stunden (Abbildung 9) zu verzeichnen, der einen verzögerten Wassertausch zeigte. Das aus dem Biofilter über die Zulaufrinne in die Becken fließende Wasser verteilte sich demnach nicht gleichmäßig im System. Becken 10 reagierte als letztes Becken in der modular aufgebauten Anreihung der Becken träger als das benachbarte Becken 9. Dementsprechend ist eine bauliche Veränderung hinsichtlich der Ausrichtung von Zu- und Abläufen der Becken zu überdenken, um eine toxisch wirkende Akkumulation speziell von Ammonium zu verhindern.

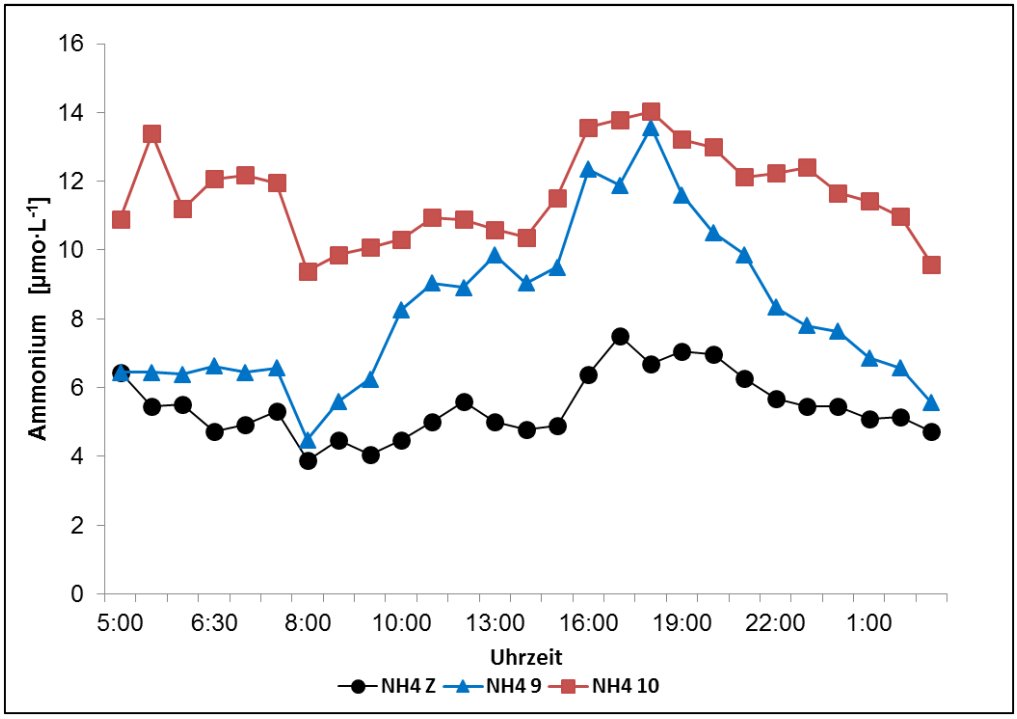


Abbildung 8: Klar detektierbare Akkumulation von Ammonium in Einzelbecken (9, 10) mit unterschiedlichem Schnäpelbesatz im Vergleich zum Zulaufwasser (Z) der Kreislaufanlage aus Schoor (2014).

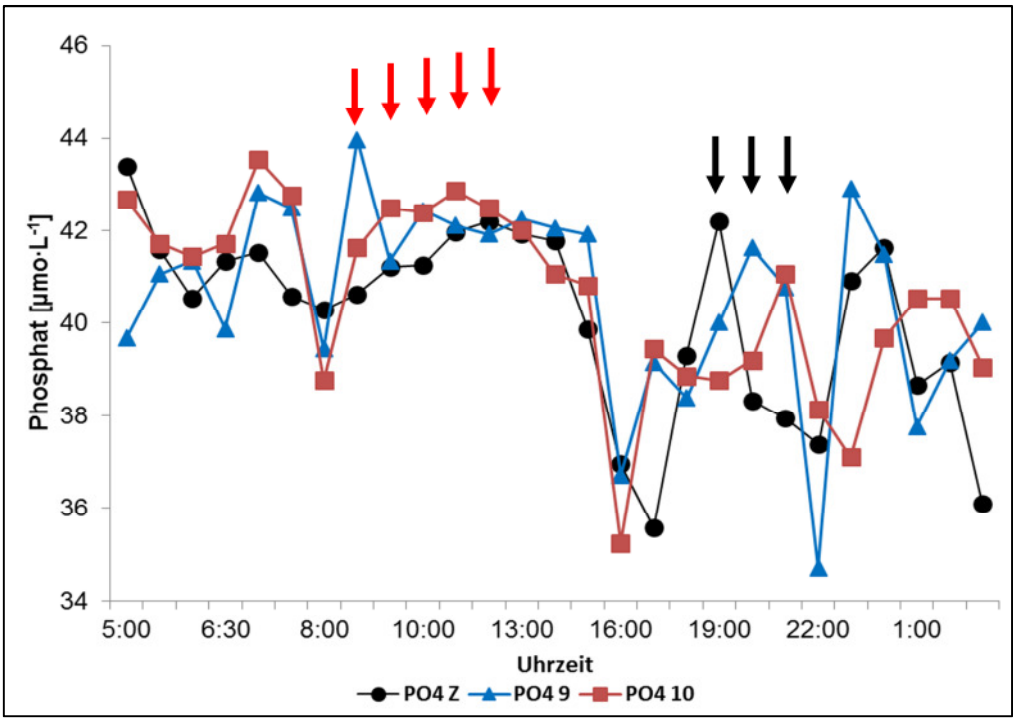


Abbildung 9: Dynamik der Phosphatkonzentration in Einzelbecken (9, 10) mit unterschiedlichem Schnäpelbesatz im Vergleich mit dem Zulaufwasser (Z). Schwarze Pfeile dokumentieren empirisch den Zeitversatz des Wasseraustauschs der Einzelbecken. Rote Pfeile Rote Pfeile dokumentieren eine Nettoakkumulationsphase von Phosphat im Becken 10. (Nach Schoor, 2015)

3.2 Disc-Filter

Im zweiten Halbjahr 2014 wurden zwei Disc-Filter-Systeme mit austauschbaren Filterpatronen und automatischer Rückspülung angeschafft, um deren Tauglichkeit zur Schwebstoffeliminierung im geschlossenen Kreislauf zu prüfen. Die angeschafften Disc- Filter werden baugleich in der industriellen Abwasseraufbereitung genutzt (Abbildung 10). Die Filterpatronen bestehen aus einzelnen Scheiben, in deren Oberfläche Rillen gefräst sind (Abbildung 11). Die jeweilige Größe der Rillen entscheidet über die Filterleistung, d.h. die Partikelgröße, die zurück gehalten wird (Abbildung 11B). Dieser Teil konnte bisher nicht abschließend bearbeitet werden, da sich die Anpassung der auf dem Markt verfügbaren Filterkomponenten an die in Born genutzten Systeme als nicht ganz trivial herausgestellt hat. Es wurde sich für ein System mit einer Wasserrückspülung der Filterscheiben entschlossen. Dies setzt aber einen ausreichenden Wasserdruck voraus. Die Einbindung der Filter führte immer wieder zu technischen Problemen, so dass keine konstante Untersuchung durchgeführt werden konnte.

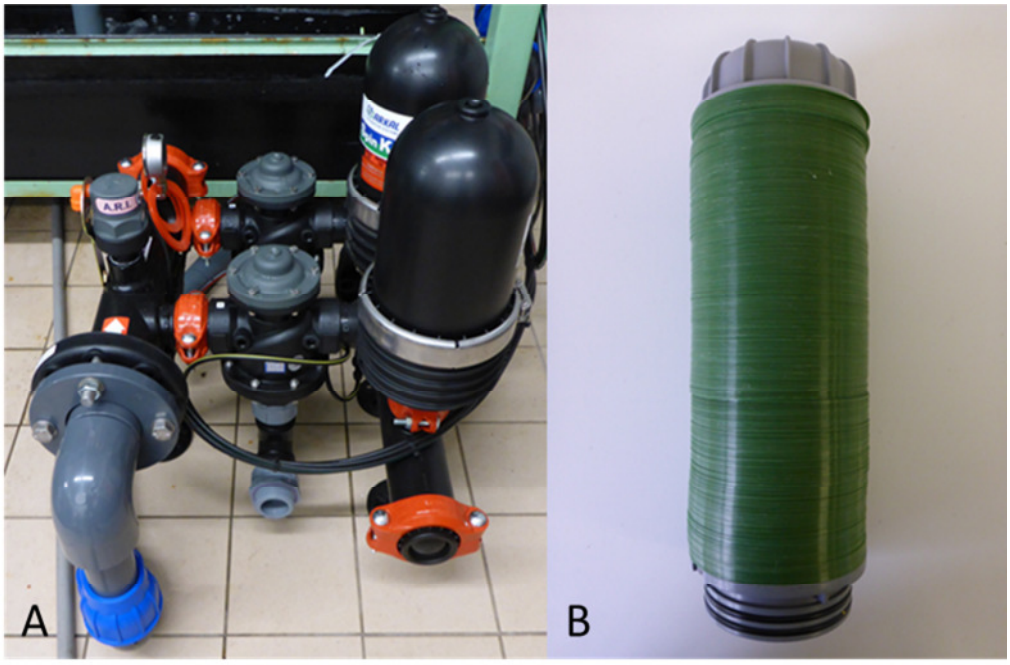


Abbildung 10: (A) Disc-Filter, (B) austauschbare Filterpatrone.

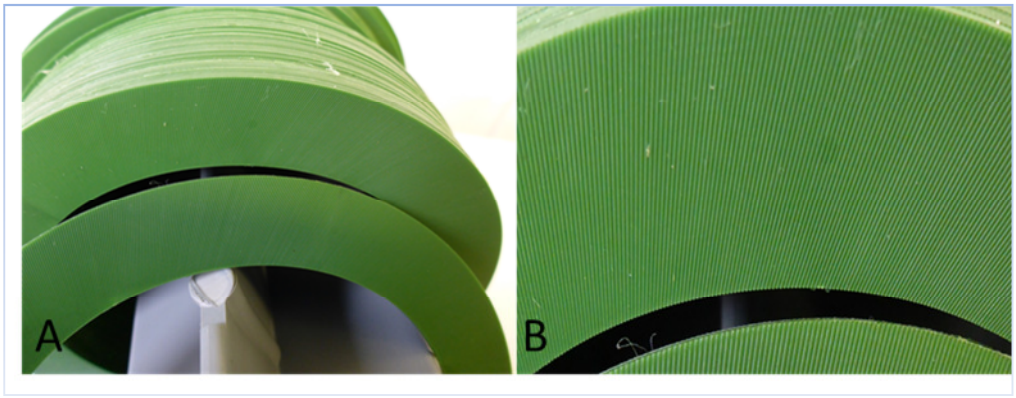


Abbildung 11: (A) Scheiben der Filterpatrone, (B) feine Fräsungen auf den einzelnen Scheiben.

3.3 Denitrifikation

3.3.1 Offenes System

Im Rahmen einer Qualifizierungsarbeit (Rudolph, 2014) wurde im März 2014 die Denitrifikationsleistung im offenen, nicht aktiv belüfteten und Sediment akkumulierenden Reaktor charakterisiert. Ziel war die Determination der Effektivität einer natürlichen Denitrifikation im Sediment des Prozesswassers in Hinblick auf eine Nutzung dieses Effektes beim Betrieb automatischer, moderner Denitrifikationsanlagen (vgl. 3.3.2). Hierfür wurde ein bestehendes Absetzbecken (Kunststoff Spranger) mit Bürsten- Filtersystem an den Abfluss des Trommelsiebfilters (TSF) angeschlossen und mit einem Überlauf in die Zulaufrinne des Biofilters versehen (Abbildung 12). Aufgrund des abgeschiedenen Detritus des TSF, bestehend aus Futter- und Kotresten, kam es im Verlauf des ca. 2 m langen Beckens zu einer Sauerstoffzehrung. Dies deutet eindeutig auf eine stattfindende Denitrifikation hin.



Abbildung 12: Absetzbecken als offener, nicht belüfteter und Sediment akkumulierender Reaktor.

Innerhalb des Absetzbeckens kam es zwischen Ein- und Auslauf zu einem Sauerstoffverbrauch von 75 - 90 % und damit zu einer „natürlichen Denitrifikation“ im Wasser. Hierbei handelt es sich um einen rein biologischen Prozess und kein spezielles, technisch gesteuertes System (vgl. 3.3.2). Die Eliminierung gelöster N- Nährstoffe lag in diesem System bei 30 – 100 % (Abbildung 13). Der gemessene Abbau war über den Beprobungszeitraum von 8 Stunden allerdings sehr variabel. Die Ergebnisse zeigen sehr deutlich, dass die für die Denitrifikation nötigen Mikroorganismen im Detritus der Fischkreisläufe vorhanden sind. Ein nächster Schritt wird nun die Prüfung einer möglichen Nutzung dieser Mikroorganismengruppe für technische Denitrifikationsanlagen (SID-Reaktor) sein. Hierzu läuft zum Ende des Projektes im Rahmen einer Qualifizierungsarbeit eine Untersuchung, die sich mit unterschiedlichen Filterkörpern und Animpfung durch Klärschlamm des Trommelsiebfilters beschäftigt.

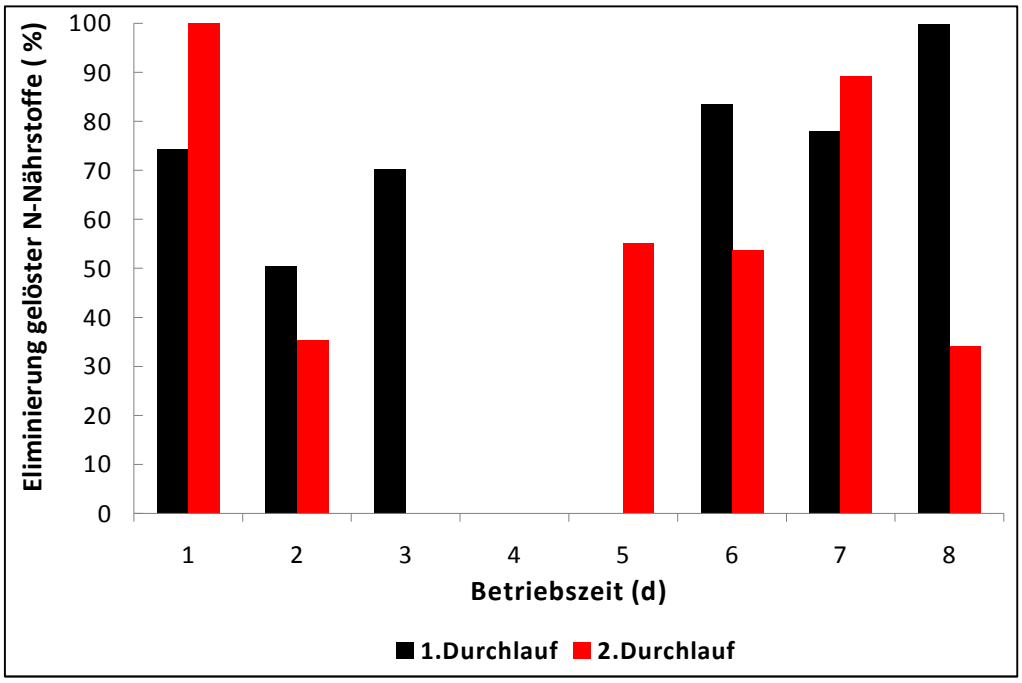


Abbildung 13: Eliminierung gelöster N-Nährstoffe für zwei Betriebszyklen des offenen, nicht aktiv belüfteten und Sediment akkumulierenden Reaktors bei praktisch relevantem Zulauf des Entsorgungswassers eines Trommelfilters, modifiziert nach Rudolph (2014)

3.3.2 SID-Reaktoren

Im November 2014 wurden zwei SID (Selbstreinigende Inertgas Denitrifikation)- Reaktoren, sogenannte Denitrifikationsstufen, der Fa. Spranger Kunststoffe angeschafft (Abbildung 14). Die Reaktoren sind technisch identisch mit bereits in Betrieb gestellten Systemen in der Zanderzucht in Hohen Wangelin. Für die Großmodule in Born wurde lediglich ein verringertes Reaktorvolumen veranschlagt, da die Kreisläufe ein geringeres Gesamtvolumen haben. Der SID- Reaktor spaltet in einem anaeroben Vorgang Nitrat zu Luftstickstoff (N_2) und CO_2 auf. Für diesen Prozess benötigen die Mikroorganismen eine Kohlenstoffquelle, die meist in Form von Methanol zur Verfügung gestellt wird (Müller-Belecke & Spranger 2012). Da es sich bei diesen Denitrifikationssystemen um Bewegtbett- Reaktoren handelt, aber kein Sauerstoffeintrag stattfinden darf, wird der freigesetzte elementare Stickstoff (Inertgas) aufgefangen und für die Belüftung und Durchmischung der Filterkörper genutzt (Spranger-Kunststoffe). Aufbauend auf den Ergebnissen aus Hohen Wangelin und der in Born durchgeführten Studie zur Denitrifikationsleistung (vgl. 3.2.1), werden die Systeme im Oktober 2015 im Rahmen einer Masterarbeit mit Methanol und Sediment aus dem Abwasser betrieben, um das Sediment als mögliche, kostengünstige und immer vorhandene C-Quelle zu prüfen. Darüber hinaus werden die anaeroben Bakterien möglicherweise so transferiert und die Anlaufphase des Systems verkürzt. Das bisher genutzte Filtermaterial Hel-X HXF12KLL wird durch BioElements der Fa. RK Plast ersetzt, da sich dies aufgrund seiner höheren Dichte im ganzen Wasserkörper verteilt. So wird eine Leistungssteigerung erhofft. Aufgrund technischer und organisatorischer Gründe hat sich der Einsatz der Denitrifikationsstufen stark verzögert. Durch vorher nicht absehbare technisch und baulich bedingte Schwierigkeiten, konnte der ursprüngliche Plan die SID-Reaktoren in die Großmodule einzubinden nicht realisiert werden. Daher wurde entschieden, die Denitrifikationsreaktoren in ein anderes Modul zu integrieren. Dies erwies sich aber verfahrenstechnisch ebenfalls als schwierig und es musste ein spezieller Kreislauf für die Überprüfung der variierten SID-Reaktoren konstruiert werden



Abbildung 14: SID (Selbstreinigende Inertgas Denitrifikation)- Reaktoren der Fa. Kunststoff Spranger

3.4 Resümee

Der in den Trommelsiebfiltern anfallende Detritus bestehend aus Futter- und Kotresten besitzt ein natürliches Potential zur Denitrifikation.

Eine mögliche Nutzung diese Schlammes ist für die Animpfung herkömmlicher SID (Selbstreinigende Inertgas Denitrifikation)- Reaktoren geeignet.

Es sollte zukünftig überprüft werden, inwieweit sich Filterkörper, die sich aufgrund einer geringen Dichte in der Wassersäule verteilen, besser für die Nutzung in SID-Reaktoren geeignet sind.

4 Klärung von abfließendem Produktionswasser mittels Makrophyten unter Brackwasserbedingungen (Teilprojekt 3)

Seit Mitte 2012 existiert das Forschungsgewächshaus der Versuchsanlage Born zur aquaponischen Nutzung des abfließenden Prozesswassers (Abbildung 15). Dieser Projektteil wurde in enger Zusammenarbeit mit der Universität Rostock durchgeführt. In diesem Abschlussbericht werden die Ergebnisse zusammengefasst. Detaillierte Ergebnisse und Methoden sind dem Endbericht des Kooperationspartners zu entnehmen (Anhang I). In der ersten nutzbaren Wachstumsperiode im Jahr 2013 wurde ein multitropher aquaponischer Ansatz mit Silber-Weide (*Salix alba*) und einem Mix aus Wasser-(*Lemna minor*) und Teichlinsen (*Spirodela polyrhiza*) (i. F. als Wasserlinsenmix bezeichnet) untersucht (Abbildung 16). Im März 2014 wurde die Kultivierung von Silber-Weide und Wasserlinsenmix des Vorjahres mit einer Bonitierung nach der Winterruhe abgeschlossen. Von den im Herbst verbliebenen Steckhölzern konnten nach Bewertung des neuen Austriebs und der Bewurzelung 90 % der Individuen als voll vital angesehen werden. Für Versuche zur Pflanzenklärung wurde 2014 der bereits 2013 durchgeführte Ansatz wiederholt.



Abbildung 15: Forschungsgewächshaus in Born.

Ziel war eine Nährstoffretention bei gleichzeitiger Produktion von nutzbarer Biomasse, z.B. als Energie- oder Futterquelle. Resultierend aus den unterschiedlichen Ergebnissen der Jahre 2013/2014 wurde auch in 2015 der gleiche Ansatz im Gewächshaus bearbeitet, um die Ergebnisse des Vorjahres zu verifizieren. Mit dem Tigerflohkrebs (*Gammarus tigrinus*) wurde das multitrophe System jedoch um einen tierischen Organismus erweitert. Es handelt sich bei diesen Tieren um eine natürlich im angrenzenden Bodden und somit auch in der Anlage vorkommende Bachflohkrebsart des Brackwassers, die aber auch den Süßwasser- Salzwasserbereich bis 25 PSU toleriert (Sexton, 1939; Bulnheim, 1976). Eigene Beobachtungen haben gezeigt, dass sich *G. tigrinus* auf spezielle Bereiche im System fixiert, in denen sich aufgrund von Strömungsdynamiken Futter- und Kotpartikel sammeln und diese gezielt verwertet.

In Folge der Ergebnisse des ersten Projektjahres entwickelte sich sukzessive ein neuer Denkansatz für die aquaponische Nutzung des abfließenden Prozesswassers. Die bisherige Idee der Abwasserreinigung wurde durch die des Nährstoffrecyclings abgelöst. Mit Hilfe der botanischen aber auch zoologischen Organismen lassen sich nicht unerhebliche Mengen an Nährstoffen aus dem Wasser extrahieren und in Biomasse binden. Diese Nährstoffe, im Speziellen Phosphor, stellen darüber hinaus wertvolle Rohstoffe dar, die so einer erneuten wirtschaftlichen Nutzung zugeführt werden können.

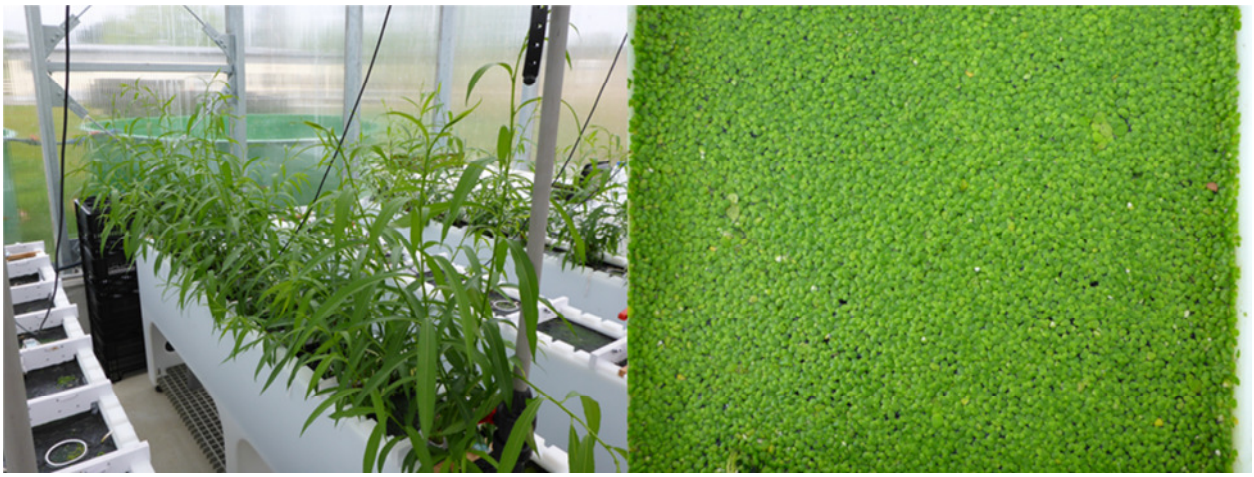


Abbildung 16: Silber-Weide (*Salix alba*) und Kleine Wasserlinse (*Lemna minor*) in der Aquaponikanlage in Born im Mai 2014.

4.1 Ergebnisse des Untersuchungsjahres 2013

Im Juni 2013 wurde in enger Zusammenarbeit zwischen dem Institut für Fischerei der LFA und der Aquatischen Ökologie der Universität Rostock mit der Nutzung des Forschungsgewächshauses in Born begonnen. Die Erstnutzung des Gewächshauses im Sommer 2013 hatte nicht zuletzt den Zweck, die völlig neu installierte Ausstattung für den Forschungsbetrieb zu testen und etwaige Probleme vor Beginn von Experimenten im Ganzjahreszyklus (2014/2015) beheben zu können. Zu Beginn des Versuches wurde an jeder der sechs Rinnen zur Pflanzenzucht ein Messnetz installiert, das die genaue Lichtverteilung über den Rinnen und die Wassertemperaturen erfasst. Parallel wurden im und außerhalb des Gewächshauses Lufttemperatur- und Feuchtelogger sowie an den Fenstern und der Eingangstür Bewegungslogger installiert, um auch diese Daten im Jahreszyklus abbilden zu können. Die Kooperationspartner entschieden, die bereits im Frühjahr 2013 geschnittenen Steckhölzer (*Salix alba*) trotz fortgeschrittener Vegetationsperiode noch im Juni 2013 einzusetzen und einigten sich auf einen experimentellen Probebetrieb in Form einer Mischkultivierung von Wasser- bzw. Teichlinse mit und ohne Kombination mit *S. alba* (n= 3 Inkubationsrinnen) (Abb.16). Die sechs Inkubationsrinnen wurden am 03.07.2013 mit Wasser- bzw. Teichlinsen beimpft und drei der Rinnen zusätzlich mit je 32 Steckhölzern der Länge 22cm von *Salix alba* bestückt. Etwaige Evapotranspirationsverluste in den Rinnen wurden mit Regenwasser ausgeglichen. Für die spätere Analyse im Labor in Rostock wurden Wasserproben entnommen und die physikochemischen Parameter (pH-Wert, Sauerstoffgehalt, Temperatur und Salinität) wöchentlich bestimmt.

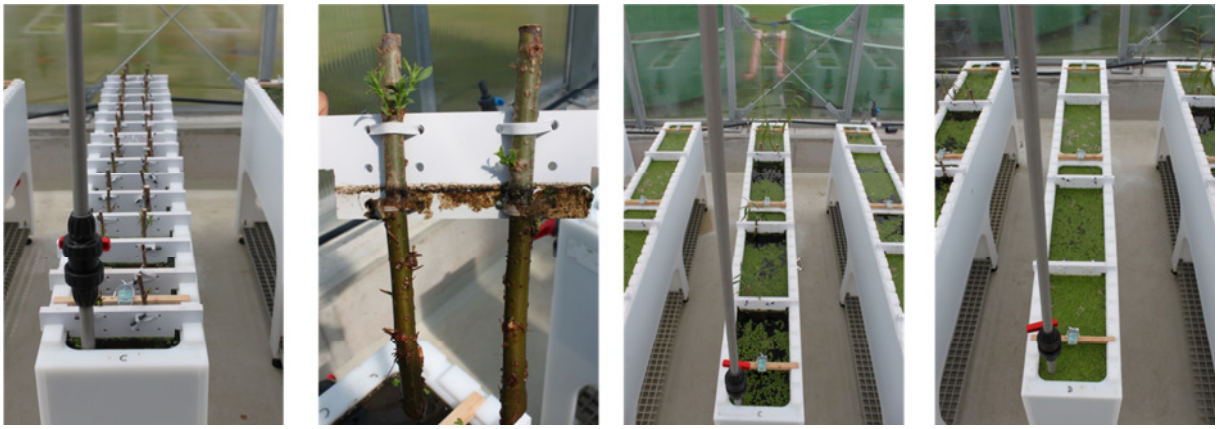


Abbildung 17: Kultivierungsrinnen mit Weidensteckhölzern und Wasser- und Teichlinsenbesatz im Untersuchungsjahr 2013.

Bedauerlicherweise kam es im Juli 2013 zu einer Periode mit starker Sonneneinstrahlung, die für *S.alba* und z.T. auch für Teich- und Wasserlinse kritisch hoch war. Trotz vorhandener Dachfenster und Innenraumbeschattung konnte diese Strahlung nicht kompensiert werden und es kam zu Wassertemperaturen von 25 – 29 °C, in Spitzen sogar über 30 °C (Details siehe Endbericht 2015, Universität Rostock). Die Folge waren Blattnekrosen bis hin zum Totalverlust der Blätter bei einigen Steckhölzern und mosaikartiger Bleiche in der Wasser- und Teichlinsengemeinschaft. Am 10.09.2013 wurde die gesamte schwimmende Biomasse geerntet und ein photosynthetisches Screening an den überlebenden Weiden vorgenommen, morphometrische Blattparameter erhoben und nach gravimetrischen Analysen Einzelblattbiomassen für die Nährstoffanalytik eingelagert. Es wurde ein Verlust von 90 % der Steckhölzer festgestellt. Trotz der Nekrose einiger Steckhölzer, war bei den überlebenden Pflanzen eine gute Wurzelbildung feststellbar (Abb.18).



Abbildung 18: Wurzelbildung bei *Salix alba* über 9 Wochen Ende Juli 2013 trotz Strahlungsstress.

In den Inkubationsrinnen etablierte sich darüber hinaus eine Weidennahrungskette, die sich in einer Wandbesiedlung durch Chironomidenlarven äußerte. Ähnlich vorigen Versuchen im Labor in Rostock (Endbericht 2012), etablierten sich vorrangig Chironomiden innerhalb des entstandenen Biofilms und beweideten den Wandbewuchs. So entstand ein Mineralisierungsprozess, der gebundene Nährstoffe freisetzte. Wie in den Freilandversuchen im vorangegangenen Pro-

jekt (Reuter & Schoor, 2012), wurde entschieden, die Kultivierung der Steckhölzer auch über die Wintermonate fortzusetzen. Hierzu wurden die überlebenden Weidenexemplare zu gleichen Teilen auf die Rinnen verteilt (n= 3) und alle Rinnen im August 2013 neu mit Wasser- bzw. Teichlinsen beimpft. Es kam in kürzester Zeit zu einem wiederholten flächendeckenden Austrieb der Mischkultur (Abb.19).

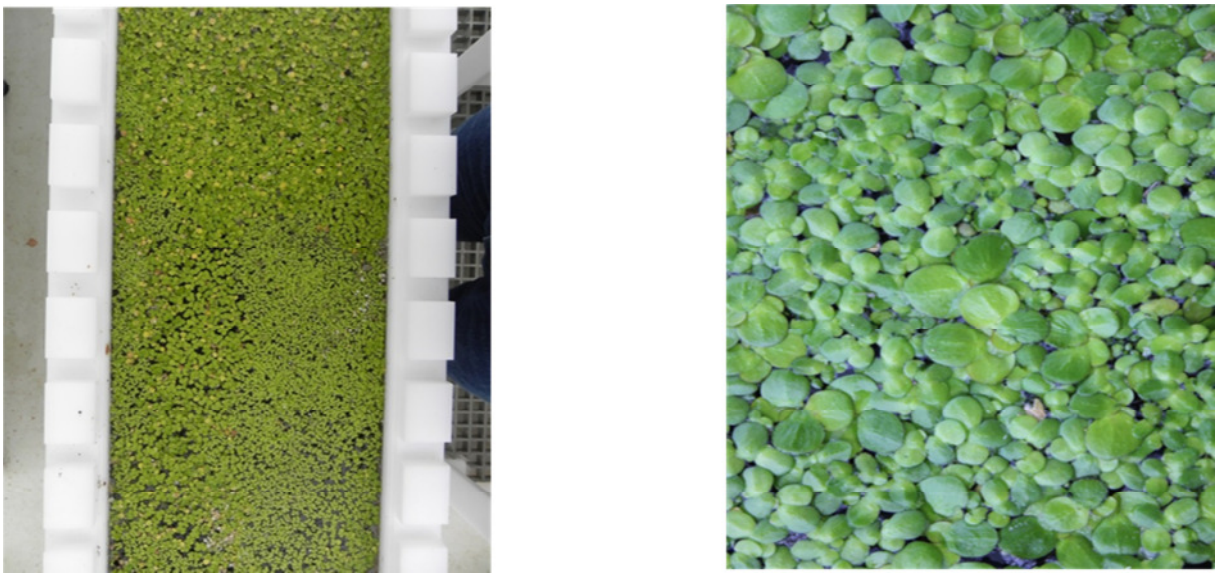


Abbildung 19: Wasser- bzw. Teichlinsenkultur nach Neubesatz im September 2013.

Mit deutlichem Abschluss der Winterruhe der Pflanzen wurden Anfang 2014 alle Hauptpools von Nährstoffen (Biomasse, Biofilm, Wasserphase, Sediment) für eine Gesamtbilanzierung beprobt und der erste Kultivierungszeitraum beendet. Mit Abschluss des ersten Versuches wurden von dem Wasser- Teichlinsenmix, zusätzlich zu den während der Wachstumsphase gesicherten, erneut Rückstellproben genommen, um diese in Hinblick auf die Nutzung als proteinreiches Tierfutter auf eine mögliche Akkumulation von Schwermetallen zu untersuchen. In direktem Anschluss wurde die Anlage für eine Kultivierung im Ganzjahreszyklus neu bestückt. Die verstärkte Bearbeitung des Themas wurde laborpraktisch und in der Anlage vor Ort in Verbindung mit einer Qualifizierungsarbeit ab März 2014 realisiert. Darüber hinaus wurde aufbauend auf den Vorversuchen eine Ganzjahreskultivierung von Rauhem Hornblatt (*Ceratophyllum demersum*) (Abb.20) in Prozesswasser durchgeführt. Hierbei zeigte sich in Anlehnung an die Literatur, dass sich das Rauhe Hornblatt mit hoher Wahrscheinlichkeit nicht für die Kultivierung in Prozesswasser der Aquakultur eignet. *C. demersum* konnte zwar am Leben gehalten werden, zeigte aber entgegen einschlägiger Literatur trotz der hohen P-Gehalte im Wasser kein Wachstum über einen Zeitraum von 4 Wochen. Dies ist vermutlich auf zu hohe Ammoniumgehalte im Wasser zurückzuführen, die beim Rauhen Hornblatt einen starken physiologischen Stress erzeugten. Ab Konzentrationen < 0,22mg NH_4 l^{-1} kommt es *bei C. demersum* zu einem Rückgang des Wachstums, ab 4,39 mg NH_4 L^{-1} zu einem Absterben des Organismus (Jingqing *et al.*, 2011).

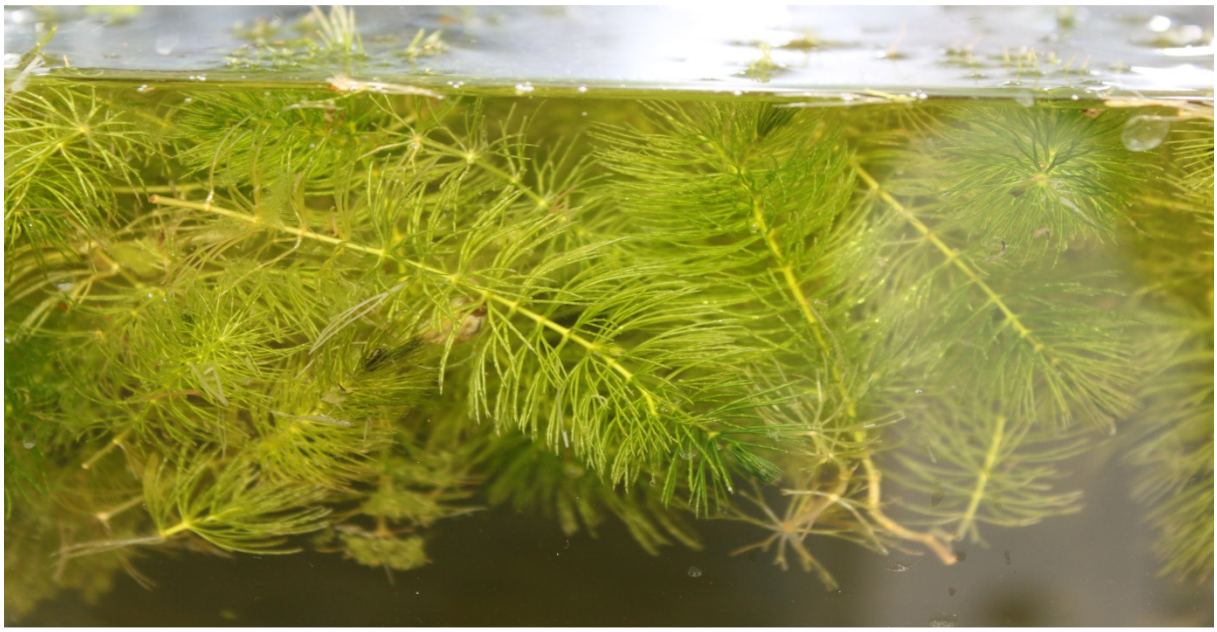


Abbildung 20: Rauhes Hornblatt (*Ceratophyllum demersum*) in Prozesswasser.

4.2 Ergebnisse des Untersuchungsjahres 2014

Die Steckhölzer von *Salix alba* wurden zeitnah aus dem Freiland entnommen und ohne Zwischenlagerung zur Neubestockung des Rinnensystems genutzt. Hierfür wurden 20 cm lange Steckhölzer geschnitten und deren Frischgewicht und Durchmesser protokolliert. Daraufhin wurden diese in den Aufzuchtrinnen in speziellen Halterungen fixiert (Abbildung 17). Der Besatz erfolgte am 17.03.2014 und wurde wie im Vorjahr in Form einer Mischkultur von Kleiner Wasser- bzw. Teichlinse (*Lemna minor* bzw. *Spirodela* polyrhiza) mit und ohne Kombination mit Silber-Weide (*S. alba*) (n= 3 Inkubationsrinnen) durchgeführt (Abbildung 17). Die Rinnen wurden bis zu Oberkante (ca. 300 l) mit einer Prozessabwasser- Mischprobe aus unterschiedlichen Kreisläufen befüllt. Die Mischung des Abwassers findet in einer Zisterne (5 m^3) vor dem Gewächshaus statt. Im saisonalen Verlauf wurden zwei Drittel des Rinnenvolumens zweimal (nach 12 bzw. 20 Wochen) abgelassen, beprobt und mit neuem Wasser aus der Zisterne aufgefüllt. Chemische und physikalische Parameter, wie pH, Temperatur, Salinität und Sauerstoffgehalt wurden, wie auch im Versuchsjahr 2013) wöchentlich gemessen. Zu Beginn des Versuches wurde an jeder der sechs Rinnen ein Messnetz installiert, das die genaue Lichtverteilung über die Rinne und die Wassertemperatur erfasst hat. Parallel wurden im und außerhalb des Gewächshauses Lufttemperatur und Feuchtelogger sowie an den Fenstern und der Tür Bewegungslogger installiert, um auch diese Daten im Jahreszyklus abbilden zu können. Bei dem Aquaponiksystem wurde bewusst auf ein Anzuchtmedium (Kies, Sand, Steinwolle), wie es üblicherweise in der Aquaponik genutzt wird, verzichtet und die Steckhölzer wurden direkt in das Prozesswasser eingebracht. Die Pflanze stellt so den nährstoffzehrenden Teil dar und nicht die im Sediment zwischen den Wurzeln fixierten Mikroorganismen (Bsp.: Pflanzenkläranlage). So werden bei der Analyse der Pflanzenteile die von ihnen aufgenommenen Nährstoffe bestimmt. Darüber hinaus entfällt die bei Pflanzenkläranlagen nötige jährliche Wartung, die einen nicht zu überschätzenden, aber vorhandenen Kostenfaktor darstellt.

4.2.1 Ergebnisse und Diskussion

4.2.1.1 Weidenkultur

4.2.1.2 Wachstum

Die Gewächshauskultur von *Salix alba* im Versuchsjahr 2014 kann als voller Erfolg gewertet werden. Trotz hoher Strahlungsintensität und Wasser- (bis > 26 °C) bzw. Lufttemperaturen (bis 41 °C) kam es zu einem guten Austrieb und einem Überleben der Pflanzen zu 100 %. Obwohl durch die erhöhte Salinität des Wassers von 4 PSU ab August 2014 im Verlauf starke Nekrosebildungen an den älteren Blättern bis hin zu Kristallbildung an den Blatträndern festgestellt wurden (Abbildung 21A, B), konnte ein konstanter Neuaustrieb in den Spitzenregionen und an der Basis beobachtet werden (Abbildung 21C).

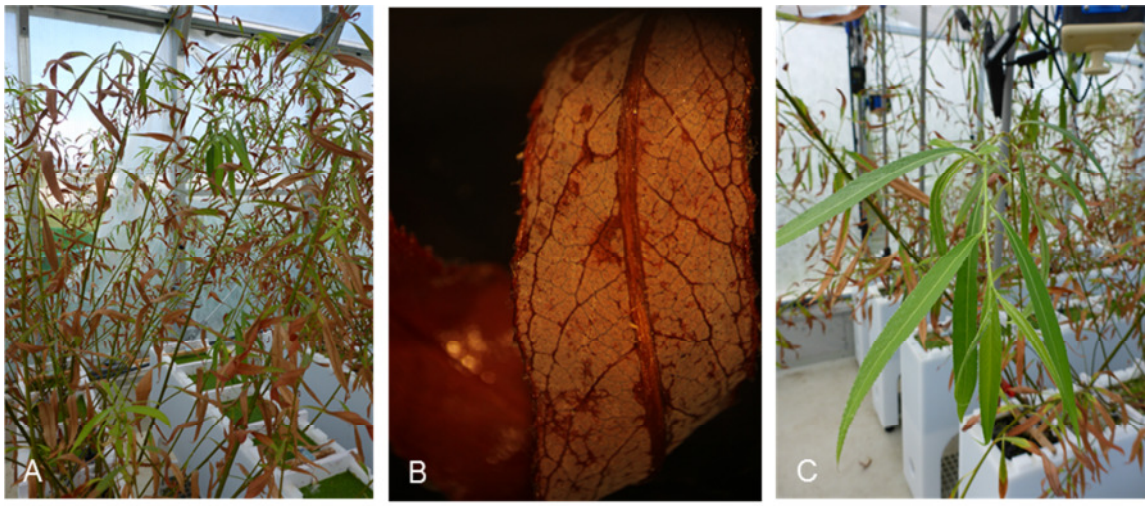


Abbildung 21: (A) Blattnekrosen an den Austrieben von *S. alba*, (B) Salzkristalle an Blattrand, (C) Austriebe an den Triebspitzen.

S.alba scheint ähnlich den Halophyten zu einem physiologischen Mechanismus in der Lage zu sein, Salz innerhalb der Pflanze in ältere Blätter zu transportieren und diese abzuwerfen. Chlorophyllfluorometrische Analysen belegen, dass die Photosyntheseleistung in den durch Salzeinfluss teilnekrotischen Blättern keiner erfassbaren Einschränkung im Vergleich zu nekrosefreien, jüngeren Blättern unterliegt (Schoor 2015). Bei Berechnung der gesamten Bruttofläche der Rinnen ergibt sich eine Jahresproduktion von ca. 15,4 t TM $ha^{-}1\ a^{-1}$ (Schoor 2015). Dies entspricht der höchsten Ertragskategorie für terrestrische Weidenkulturen bei hoher Wasserversorgung. Allerdings ist in der Berechnung eine Korrektur aufgrund der Fehlerschätzung durch Haftwasser an den Wurzeln vorzunehmen. Dennoch ergibt sich mit 11 t TM $ha^{-}1\ a^{-1}$ ein Ertrag auf Niveau einer terrestrischen Kultur mit hoher Wasserversorgung (Abbildung 22).

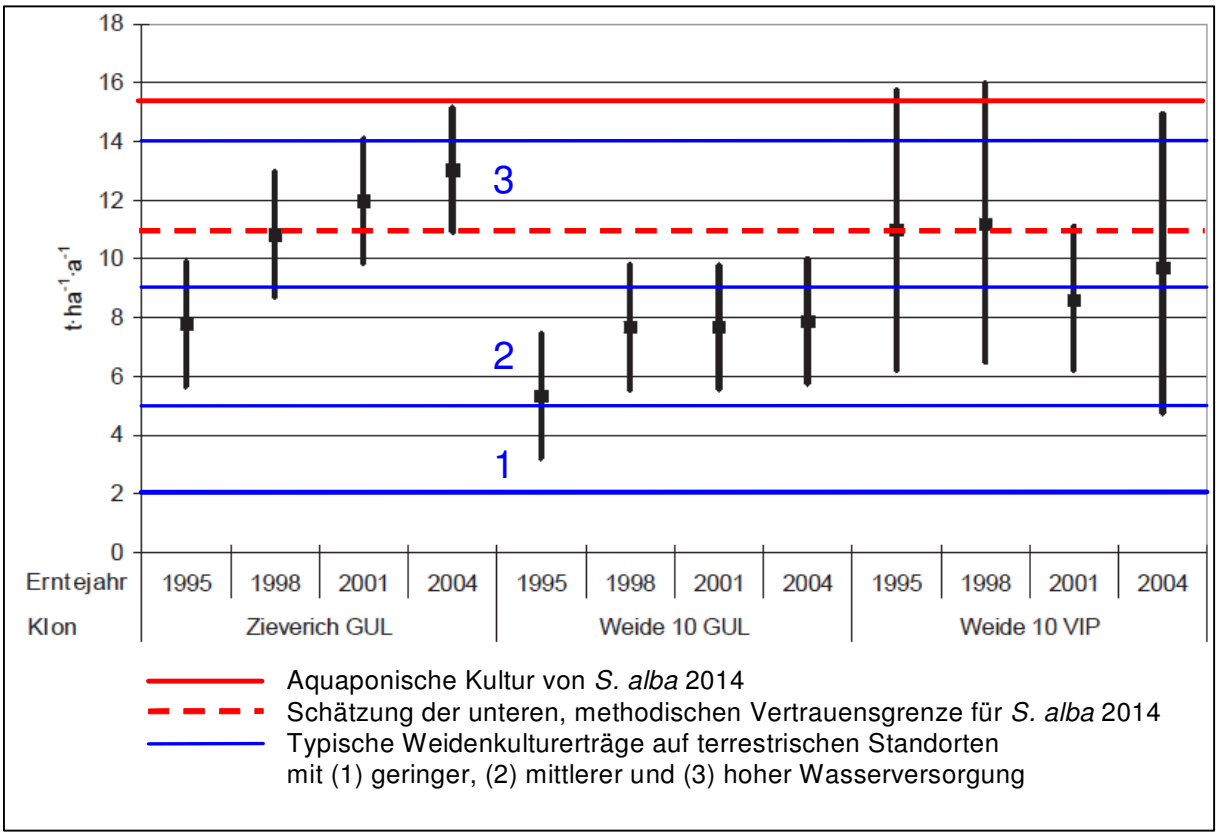


Abbildung 22: Holztrockenmasseerträge unterschiedlicher Weidenklone (Boelcke & Kahle 2008) auf typischen Böden des nordostdeutschen Tieflands und Gesamttrockenmasseertrag der aquaponischen Kultur von *S. alba* 2014. Symbole repräsentieren den Holztrockenmasseertrag, zugehörige Whisker 90 % Konfidenzintervalle. Die Vertrauensgrenze für *S. alba* resultiert aus Fehlerabschätzungen der Haftwasserkorrektur bzw. der Bestimmung der effektiven (einschließlich aquatischen) Wachstumsfläche. Typische Weidenkulturerträge terrestrischer Standorte nach Scholz *et al.* (2006, Tab. 2). Nach Schoor (2015).

Tabelle 3: Nährstoffentzüge von Pappeln und Weiden im Kurzumtrieb auf landwirtschaftlichen Flächen (Scholz *et al.* 2006) und von *Salix alba* in aquaponischer Gewächshauskultur 2014 (rote Ziffern). Die untere Vertrauensgrenze für Werte von *S. alba*, resultierend aus Fehlerabschätzungen der Haftwasserkorrektur bzw. der Bestimmung der effektiven (einschließlich aquatischen) Wachstumsfläche, wird mit -30 % veranschlagt. Schoor (2014)

	Pappel			Weide		
Nährstoff	**Ertragsniveau in t_{TM}/(ha*a)**			**Ertragsniveau in t_{TM}/(ha*a)**		
	6	10	14	4	7	11
	Nährstoffentzug in kg/ha					
Stickstoff (N)	38	64	90	19	32	51 **86**
Phosphor (P)	7	11	15	4 **4,7**	6	10 **13,5**

4.2.1.3 Nährstoffassimilation

Die Ergebnisse für die Nährstoffeliminierung von Stickstoff und Phosphor sind analog zu denen des Wachstums auf einem Niveau mit den terrestrischen Kulturen von Pappeln und Weide. Eine vorläufige Bilanzierung der P- und N-Assimilation erreicht in der Jahresperiode 2014 bei *S. alba* 4,7 - 13,5 kg P bzw. 86 kg N $ha^{-1}a^{-1}$ (Tabelle 3). Eine Sowohl der Ertrag an Biomasse, als auch die gute Nährstoffeliminierung im direkten Vergleich zu terrestrischen Kurzumtriebsplantagen beweisen, dass die Silber-Weide (*S. alba*) eine geeignete verholzende Pflanze ist, die mit guter Biomasseausbeute in Aquaponik kultiviert werden kann.

4.2.2 Parallelkultur von Wasserlinse und Weide

Die Parallelkultur von Wasserlinsenmix in Rinnen mit und ohne *Salix*-Besatz lieferte unbedeutende Ertragsunterschiede, so dass eine Konkurrenzbildung auszuschließen ist.

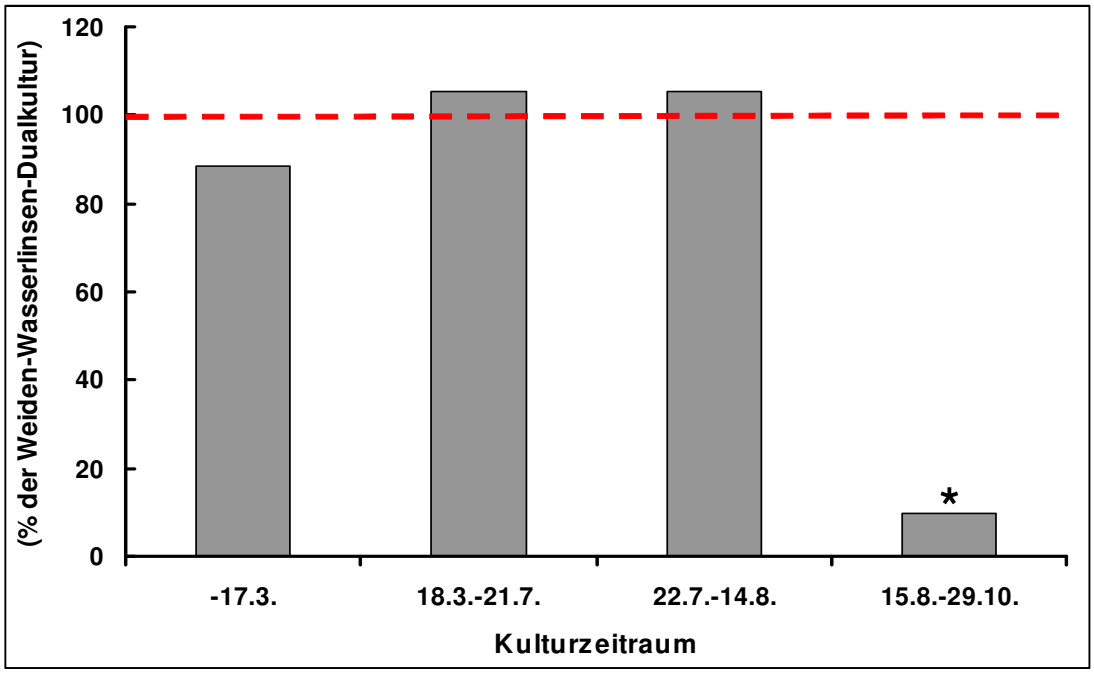


Abbildung 23: Relativ zur Dualkultur (Weide-Wasserlinse) normierte Trockenmasseproduktion der Monokultur von Wasserlinsen 2014. Daten basieren auf der integrierten Produktion von jeweils 3, über die Versuchsgruppen alternierend angeordneten, separaten Rinnen zur Homogenisierung der Einflüsse der Lichtfeldgradienten und –abnormitäten. * starke Abweichung durch vorzeitigen Übergang von Wasserlinsen der Monokulturen in das Winterruhestadium (absinken, nicht erntefähig). Schoor (2014)

Trotz offensichtlicher Verluste in der letzten Erntephase (September/ Oktober 2014) durch frühzeitiges Absinken der Wasserlinsen in Form von ausgebildeten Überwinterungsorganen konnte im Zeitraum von März - Oktober 2014 eine Produktion von 2,4 t TM ha^{-1} erzielt werden (Tabelle 3). Das entspricht einer vorläufigen grob kalkulierten Gesamtassimilationsrate für P und N von 20 - 54 kg P und 190- 560 kg N ha^{-1} a^{-1}.

4.3 Ergebnisse des Untersuchungsjahres 2015

Für die Wachstumsperiode 2015 wurden die überwinterten Weiden des Vorjahres verwendet. Es wurden das Steckholz und 2 mal 30cm lange Seitenaustriebe stehen gelassen. Nach der Winterruhe kam es bei 90 % der Steckhölzer zum Wiederaustrieb. Messsystem und Verfah-

rensweise wurden aus dem Vorjahr übernommen. Ab Mai 2015 wurde zusätzlich eine grünfarbige, gewächshausübliche Beschattung (50 %) angebracht und ein Fensterlüfter im Dachgiebel installiert, um auftretende Stauhitze, wie im Versuchsjahr 2014 zu vermeiden.

4.3.1 Ergebnisse und Diskussion

In 2015 kam es zu einem wiederholt guten Austrieb der Weidensteckhölzer und einem sehr guten Wachstum der Wasserlinsenkultur, obgleich bei *S. alba* mit geschätzt maximal 12 t TM ha^{-1} und nach Schätzung der unteren methodischen Vertrauensgrenze 7 t TM ha^{-1} ein geringerer Ertrag als im Vorjahr zu verzeichnen war. Im Zeitraum von März-Oktober 2015 konnte für die Wasserlinsenkultur eine Produktion von 3,3 t TM ha^{-1} erzielt werden (Tabelle 4).

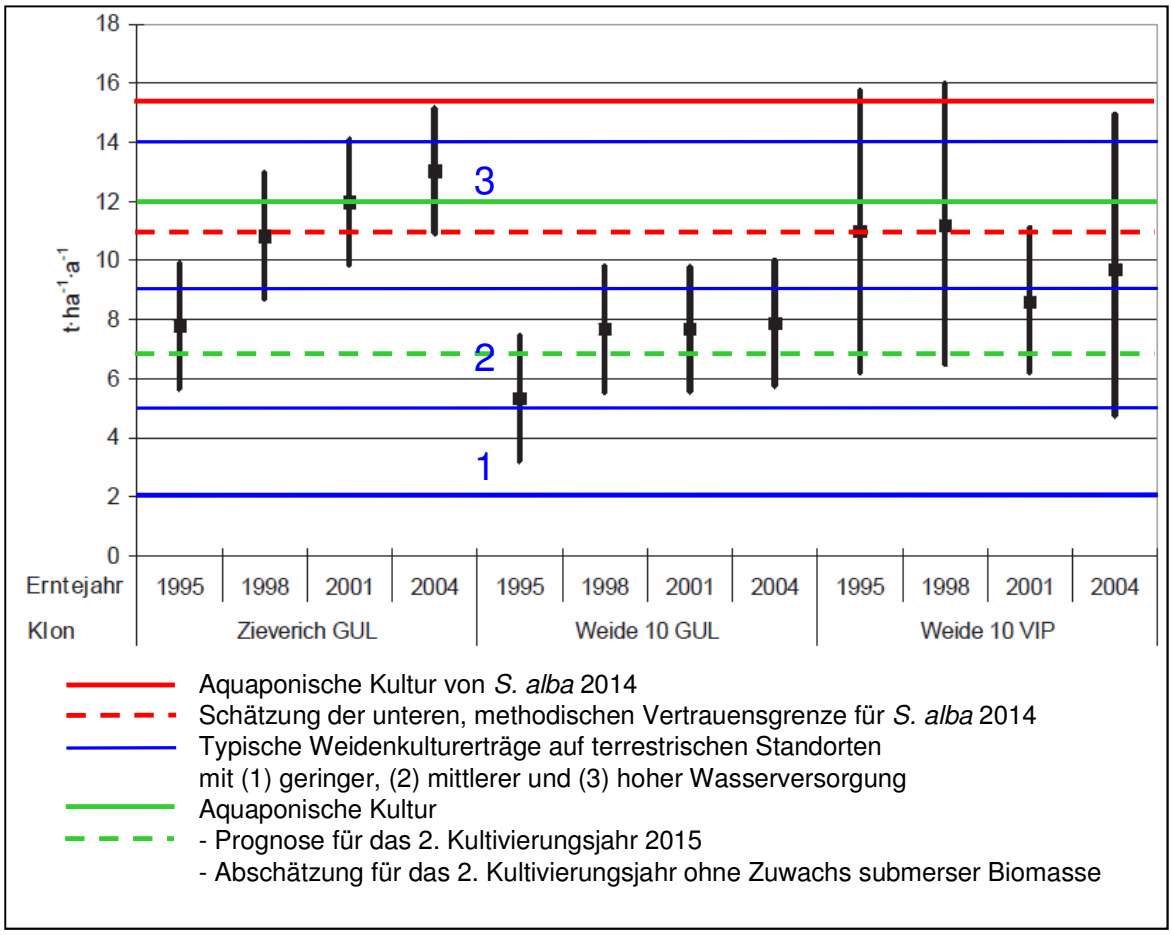


Abbildung 24:Holztrockenmasseerträge unterschiedlicher Weidenklone (Boelcke & Kahle 2008) auf typischen Böden des nordostdeutschen Tieflands und Gesamttrockenmasseerträge der aquaponischen Kultur von *S. alba* 2014/2015. Symbole repräsentieren den Holztrockenmasseertrag, zugehörige Whisker 90 % Konfidenzintervalle. Die Vertrauensgrenze und Prognosen für *S. alba* resultiert aus Fehlerabschätzungen der Haftwasserkorrektur bzw. der Bestimmung der effektiven (einschließlich aquatischen) Wachstumsfläche. Typische Weidenkulturerträge terrestrischer Standorte nach Scholz *et al.* (2006, Tab. 2)

Das entspricht einer vorläufigen grob kalkulierten Gesamtassimilationsrate für P und N von 65 kg P und 683 kg N ha^{-1} a^{-1} (Tabelle 4). Somit konnte bei der Wasserlinsenkultur im Vergleich zu 2014 ein gesteigerter Ertrag und damit auch Nährstoffaustrag erzielt werden. Sowohl die geringere Biomasseproduktion der Weidenhölzer als auch der höhere Ertrag der Wasserlinsenkultur

sind sehr sicher auf die neu installierte Beschattung zurückzuführen. Während die Wasserlinsen positiv auf die verminderte Strahlungsintensität reagierten, kam es bei der Weide zu einem verminderten Wachstum (vgl. Endbericht 2015, Univ. Rostock).

Tabelle 4: Biomasseertrag und Nährstoffentzug für Silberweide und Wasserlinse für 2014 und 2015.

	2014			2015		
	t TM ha^{-1} a^{-1}	**kg P ha^{-1} a^{-1}**	**kg N ha^{-1} a^{-1}**	**t TM ha^{-1} a^{-1}**	**kg P ha^{-1} a^{-1}**	**kg N ha^{-1} a^{-1}**
Silberweide	**15,4**	**13,5**	**86**			
Wasserlinse	**2,4**	**54**	**560**	**3,22**	**65**	**683**

4.4 Messung der Schwermetallbelastung und des Proteingehalts von Kleiner Wasserlinse (*Lemna minor*)

Um die Eignung der sehr proteinreichen Wasserlinsen als Tierfutter zu überprüfen, wurden von den Wachstumsperioden 2014 und 2015 Mischproben zusammengestellt, in denen durch das LUFA Rostock der Gehalt an Rohprotein, Blei, Quecksilber, Cadmium und Arsen bestimmt wurde. Für das Jahr 2014 wurde ein Rohproteingehalt von 196 g kg^{-1} TM gemessen. Im Produktionsjahr 2015 war dieser Wert mit 349 g kg^{-1} TM fast doppelt so hoch. Für Blei und Cadmium wurden Werte unterhalb der Grenzwerte für Nahrungsmittel gemessen (Tabelle 5). Quecksilber konnte in beiden Jahren nicht nachgewiesen werden. Lediglich die Konzentration an Arsen überstieg mit 0,547 mg kg^{-1} TM für 2014 den Grenzwert von 0,3 mg kg^{-1} TM. In der Mischprobe für 2015 war der gemessene Wert von 0,092 mg kg^{-1} TM deutlich unterhalb des Grenzwertes für Nahrungsmittel. Leider kann hieraus keine klare Aussage für die Zulassung als Futtermittel in der Tierproduktion getroffen werden. Eine Verwertung als Futter scheint aber möglich.

Tabelle 5: Konzentrationen an Rohprotein, Blei Cadmium, Quecksilber und Arsen in *Lemna minor*für die Produktionsjahre 2014 und 2015und deren Grenzwerte für Nahrungsmittel.

	Rohprotein g kg^{-1} TM	**Blei mg kg^{-1} TM**	**Cadmium mg kg^{-1} TM**	**Quecksilber mg kg^{-1} TM**	**Arsen mg kg^{-1} TM**
2014	196	0,946	0,037	n.n.	0,547
2015	349	0,603	0,009	n.n.	0,092
Grenzwerte	-	3	1	0,1	0,3

4.5 Resümee

Sowohl die Silberweide als auch die Wasserlinse sind für die aquaponische Aufzucht geeignet.

Es konnten im Versuchsmaßstab in den Jahren 2014 und 2015 Biomasseerträge erreicht werden, die denen kommerzieller Kurzumtriebsplantagen mit mittlerem bis hohem Wasserverbrauch entsprechen.

Neben der Biomasseproduktion konnte ein sehr guter Nährstoffentzug von Stickstoff und Phosphor gemessen werden.

Die Silberweide scheint einen den Salzpflanzen ähnlichen Mechanismus nutzen zu können, um erhöhte Salinitäten auszugleichen.

Sowohl Silberweide und Wasserlinse haben aufgrund ihrer physiologischen Eigenschaften unterschiedliche Ansprüche an die einfallende Lichtstrahlung.

Literaturverzeichnis

Boelcke, B, Kahle, P (2008): Energieholzproduktion mit Weiden und Pappeln – Ertragsbildung und Grundnährstoffbedarf. Pflanzenbauwissenschaften 12: 78–85.

Hüpeden, J (2014): Monatsberichte, Mikrobiologische Untersuchungen von Füllkörpern aus Biofiltern von Brackwasser-Aquakulturanlagen

Hüpeden, J (2015): Abschlussbericht. Mikrobiologische Untersuchungen zur Nitrifikation in Biofiltern der Brackwasser betriebenen Aquakulturanlage in Born a. Darß

Hüpeden, J, Lücker, S; Kühn, C; Spieck, E (2014): Characterization of the nitrifying community in various brackish aquaculture systems. Poster. Anhang

Jingqing, G, Na, C, Wuxing, H, Mingjing, L, Zhiting, X, Ruiqin, Z (2011): Effects of ammonium nitrogen on the growth of *Ceratophyllum demersum*.

Müller-Belecke, A, Spranger, U (2012): Der Selbstreinigende Inertgas Denitrifikations- Reaktor: Entwicklung und Leistungsprüfung in einer geschlossenen Kreislaufanlage zur Zanderaufzucht. Poster EAFF-Tagung

Rudolph, B (2014): Untersuchen zur Nährstofftransformation in Prozessabwasser der Aquakultur im offenen, nicht aktiv belüfteten und Sediment akkumulierenden Reaktor. Universität Rostock, Staatsexamensarbeit.

Scholz, V, Boelcke, B, Burger, F, Hofmann, M, Vetter, A (2006): Produktion von Pappeln und Weiden auf landwirtschaftlichen Flächen. KTBL-Datensammlung Energiepflanzen, Potsdam-Bornim.

Schoor, A (2014): Optimierung des Nährstoffaustrags und biologisches Recycling für Aquakulturen in Brackwasser. Sachstandsbericht 2014.

Schoor, A (2015): Optimierung des Nährstoffaustrags und biologisches Recycling für Aquakulturen in Brackwasser

www.spranger-kunststoffe.de

Überleitung

Die Überleitung der im Rahmen dieses Forschungsthemas gewonnenen Ergebnisse erfolgte in Form nachfolgender Publikationen und Vorträge:

Poster

Hüpeden J; Lücker S; Kühn C; Spieck E (2014) Characterization of the nitrifying community in various brackish aquaculture systems. Poster.

Qualifikationsarbeiten

Baltrusch P (2015) Untersuchungen zur Quantenausbeute des Photosystems II von Wasserlinsen im fluktuierenden Lichtfeld. Staatsexamensarbeit, Lehramt Gymnasien, Univ. Rostock.

Glimm A (2015) Photosynthese der Wasserlinse. Bachelorarbeit, Biowissenschaften, Univ. Rostock.

Huber T (2013) Untersuchungen zur Nitrifikationshemmung im Prozessmonitoring von Brackwasseraquakulturen. Staatsexamensarbeit, Lehramt Gymnasien, Univ. Rostock.

Kretzler L (2015) Transformation von partikulären Nährstoffen aus Prozesswässern von Brackwasseraquakulturanlagen. Staatsexamensarbeit, Lehramt Gymnasien, Univ. Rostock.

Otter M (2013) Untersuchungen zur Produktivität von Wasserlinsen unter fluktuierenden Wachstumsbedingungen. Staatsexamensarbeit, Lehramt Gymnasien, Univ. Rostock.

Päßler JH (2014) Untersuchung zur Nährstofftransformation durch autotrophe Makroorganismen in Prozessabwasser der Brackwasseraquakultur. BSc-Arbeit, Biowissenschaften, Univ. Rostock.

Rudolph B (2014) Untersuchung zur Nährstofftransformation in Prozessabwasser der Aquakultur im offenen, nicht aktiv belüfteten und Sediment akkumulierenden Reaktor. Universität Rostock, Staatsexamensarbeit.

Voigt, L (2015): Untersuchungen zur Produktivität in multitrophen Kulturen mit Abwässern der Brackwasseraquakultur. Univ. Rostock, Staatsexamensarbeit.