

Sachbericht zum Verwendungsnachweis

Teil 1 - Kurzbericht

Innovationsraum: BaMS- OptiRAS

Entwicklung und Erprobung einer integrierten Haltung von marinen Warmwassertierarten und Halophyten mit Karbonisierung von Reststoffen zur optimierten Stoffstromnutzung in rezirkulierenden Aquakultursystemen

Teilprojekt 1 und 2

Alfred-Wegener-Institut
Helmholtz-Zentrum für Polar- und Meeresforschung
Am Handelshafen 12
27570 Bremerhaven



Förderkennzeichen: 031B0915G1

Verantwortlicher Autor:

Mirko Bögner

„Das diesem Bericht zugrundeliegende Vorhaben wurde mit Mitteln des Bundesministeriums für Bildung und Forschung unter dem Förderkennzeichen 031B0915G1 gefördert. Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt bei der Autorin/beim Autor.“

Aufgabenstellung und wissenschaftlicher und technischer Stand, an den angeknüpft wurde

Hauptaufgabe des Projektes war die Entwicklung und Erprobung eines integrierten Aquakulturkonzeptes auf Basis rezirkulierender Systeme. Dabei wurde die Aufzucht einer neuen Warmwasser- Meeresfischart, den Riesenzackenbarsch, im Englischen Giant Grouper (*Epinephelus lanceolatus*) genannt, die Produktion von salztoleranten Halophytenarten und eine Karbonisierung anfallender Feststoffe kombiniert. Durch die intelligente Nutzung der Stoffströme einer landbasierten Salzwasser- Fischzucht sollten neue, kommerziell interessante Produkte erzeugt, aber vor allen auch die Lasten der Abwasser- bzw. Reststoffströme hinsichtlich Nährstoffbelastung und Partikelfracht deutlich optimiert und für die Einspeisung vorbereitet werden. Dieses Konzept wurde in Deutschland bisher nicht umgesetzt, Teilaspekte, auf denen das Projekt OptiRAS aufgebaut ist waren jedoch bereits bekannt.

Der Riesenzackenbarsch ist eine marine Fischart, deren Zucht im asiatisch- pazifischem Raum etabliert wurde. Aufgrund der hervorragenden Qualität und des schnellen Wachstums stellt diese Art einen idealen Kandidaten für die Zucht in rezirkulierenden Aquakulturanlagen (RAS) in Europa dar. Jedoch fehlten bisher wesentliche Leistungsparameter der Art in RAS, die eine zuverlässige bioökonomische Kalkulation ermöglichen. Das Konzept der Aquaponik ist im Süßwasserbereich bereits in anderen Projekten gut untersucht worden und zum Teil auch kommerziell umgesetzt worden. Im Gegensatz zu Süßwasser- basierten aquaponischen Konzepten bestand im Projekt OptiRAS jedoch die Herausforderung in der Kombination von marinen Wassertieren und salztoleranten Pflanzenarten mittels Integrationssystem. Durch hydrothermale Karbonisierung (HTC) werden kohlenstoffhaltige Stoffe unter Druck- und Wärmeeinwirkung zu einer Kohle karbonisiert, die z.B. für die energetische Nutzung oder andere Anwendungen genutzt werden kann. Der HTC- Prozess ist insbesondere für feuchte, nicht- salzhaltige Biomassen untersucht. Die Karbonisierung von sehr stark wasserhaltigem und salzhaltigem Material, wie etwa die Reststoffe aus einer marinen Aquakulturanlage, wurde bisher nicht untersucht.

Ablauf des Projektes

Zu Beginn des Projektes wurde für die Karbonisierungsarbeiten ein Unterauftrag an die Firma KS- VTCTech vergeben. Am Alfred-Wegener-Institut wurde an einem marinen RAS im Zentrum für Aquakulturforschung ein Reststoffsammler installiert. Der gewonnene Schlamm aus der Kreislaufanlage wurde eingedickt und mittels HTC Karbonisierung zu einer Biokohle transformiert. Von dieser Kohle wurden relevante Eigenschaften bestimmt um Nutzungsmöglichkeiten ableiten zu können. Für Haltungsveruche mit dem Giant Grouper wurde dieses RAS angepasst, sodass Versuche mit unterschiedlichen Tiergrößen und Besatzdichten durchgeführt werden konnten. Nach diesen Vorbereitungsmaßnahmen konnten erfolgreich Riesenzackenbarsche von einer Hatchery in Australien bezogen werden. In mehreren Versuchen wurden bei zwei Tiergrößen unterschiedliche Besatzdichten erprobt und Futtermittel getestet, die in Deutschland/ Europa kommerziell erhältlich sind. Aufbauend auf diesen Daten konnte eine bioökonomische Simulation durchgeführt werden. Um die Wachstumsversuche mit Halophyten durchführen zu können wurde ein Versuchssystem auf aeroponischer Basis gebaut. Für die Durchführung der Pflanzenversuche wurden zunächst salztolerante Halophytenarten ausgewählt, die bereits als Lebensmittel bekannt sind und ein Vermarktungspotential haben. In wissenschaftlichen Versuchen wurde das Wachstumspotential der Pflanzen unter unterschiedlichen Anbauformen und Nährmedien

bestimmt. Hierauf basierend wurde ein semikommerzielles, aeroponisches Integrationsmodul entwickelt und getestet.

Einzelaspekte des Projektes aber auch das Gesamtkonzept wurden von den Partnern auf unterschiedlichen Symposien, Workshops und Konferenzen vorgestellt. Eine detaillierte Auflistung der Aktivitäten befindet sich im zweiten Berichtsteil.

Wesentliche Ergebnisse (sowie ggf. die Zusammenarbeit mit anderen Forschungseinrichtungen)

Zucht von Riesenzackenbarschen

Die durchgeführten Haltungsdichteversuche konnten zeigen, dass Riesenzackenbarschen problemlos bei unterschiedlichen Besatzdichten gehalten werden können. Relevante Tierwohlmarker und Wachstumsindikatoren waren während der Versuche in einem optimalen Bereich und bestätigten dies. Bei der Erprobung von kommerziellen Futtermitteln konnte festgestellt werden, dass die getesteten Futtermittel mit einem höheren Protein- und Fettanteil prinzipiell geeignet sind für die Art. Basierend auf den Daten wurde ein Produktionsplan für die Art entwickelt und Marktabschätzungen durchgeführt.

Integration von Halophyten in marine Kreislaufanlagen

Fünf salztolerante Pflanzenarten wurden in unterschiedlichen Experimenten untersucht. Die Versuche zeigten, dass speziell der Europäische Queller (*Salicornia europaea*) und das Salzkraut (*Salsola soda*) bei erhöhten Salzkonzentrationen und Aquakulturwasser als Nährstoffquelle gut gedeihen. Eine prinzipielle Eignung dieser Arten für die Integration konnte damit bestätigt werden. Die anderen getesteten Arten wiesen eine geringere Eignung für den Anwendungszweck auf. Zudem wurde ein Prototyp für ein aeroponisches Pflanzenmodul entwickelt, welche an marine Kreislaufanlagen angeschlossen werden und entkoppelt betrieben werden kann.

Karbonisierung stark wässriger und salzhaltiger Reststoffe aus Aquakultur

Im Projekt ist es gelungen die partikulären Reststoffe einer marinen Kreislaufanlage zu sammeln, einzudicken und erfolgreich zu karbonisieren. Die entstandene Biokohle hat einen guten Brennwert, jedoch auch einen hohen Aschegehalt. Die gewonnen Kohle stellt einen wertvollen Rohstoff dar, der auf unterschiedliche Art und Weise genutzt werden kann.

Die im Projekt erzielten Ergebnisse sind als positiv zu bewerten und bilden eine gute Basis für zukünftige Aktivitäten. Zudem wird mit den Ergebnissen der bisherige Forschungsstand erweitert.

GEFÖRDERT VOM



Bundesministerium
für Bildung
und Forschung

Sachbericht zum Verwendungsnachweis

Teil 2 – Eingehende Darstellung

Innovationsraum: BaMS- OptiRAS

Entwicklung und Erprobung einer integrierten Haltung von marinen Warmwassertierarten und Halophyten mit Karbonisierung von Reststoffen zur optimierten Stoffstromnutzung in rezirkulierenden Aquakultursystemen

Teilprojekt 1 und 2

Alfred-Wegener-Institut
Helmholtz-Zentrum für Polar- und Meeresforschung
Am Handelshafen 12
27570 Bremerhaven



ALFRED-WEGENER-INSTITUT
HELMHOLTZ-ZENTRUM FÜR POLAR-
UND MEERESFORSCHUNG

Förderkennzeichen: 031B0915G1

Verantwortlicher Autor:

Mirko Bögner

„Das diesem Bericht zugrundeliegende Vorhaben wurde mit Mitteln des Bundesministeriums für Bildung und Forschung unter dem Förderkennzeichen 031B0915G1 gefördert. Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt bei der Autorin/beim Autor.“

1. Darstellung der durchgeführten Arbeiten

Neben der Testung einer neuen Art für die marine RAS- Aquakultur in Deutschland ist das Projekt auf die Nutzung von Aquakultur- Reststoffen fokussiert zur Etablierung eines „Zero Waste“- Konzeptes für die marine Aquakultur in RAS in Deutschland. Die Arbeiten im Projekt OptiRAS gliederten sich in 3 Themengebiete:

1. Erprobung der Zucht des Riesenzackenbarsches in RAS und Aufnahme relevanter Leistungsparameter für diese Art
2. Durchführung von Haltungsver suchen mit Halophytenarten zur Reduktion von gelösten Nährstoffen in marinen Aquakulturwasser
3. Herstellung einer Biokohle aus partikulären Reststoffen einer marinen Kreislaufanlage

Folgende Arbeiten wurden durchgeführt und Ergebnisse erzielt.

A. Zucht des Riesenzackenbarsches, Giant Grouper (*Epinephelus lanceolatus*)

Anpassung Kreislaufanlage: Aufgrund der hohen Ansprüche an die Wasseraufbereitung für Haltungsdichtever suchte dieser sehr schnell wachsenden und wärmeliebenden Art wurde eine Kreislaufanlage am AWI z.T. angepasst. Optimiert wurden die Heizanlage, Be- und Entgasung und das Sicherungssystem. Zudem wurden die Beckengrößen angepasst und die Biofiltration erweitert.

Beschaffung der Riesenzackenbarsche: Besatzfische der Art Giant Grouper konnten im August 2021 aus Australien nach Deutschland importiert werden. Trotz coronabedingter schlechter Verfügbarkeit von Flugverbindungen und deutlich höherer Frachtpreise erreichten die Tiere mit einem mittleren Gewicht von 3g ohne Verluste das AWI und konnten erfolgreich akklimatisiert werden. Die Tiere sprachen gut auf unterschiedliche Futtermittel an, mit denen die Fische bis zum Versuchsstart versorgt wurden. Regelmäßiger Austausch und Tipps der australischen Firma und vom Partner Sander GmbH halfen bei der problemlosen Eingewöhnung.

Erprobung kommerzieller Futtermittel: Ein wichtiger Faktor zur zukünftigen Zucht des Giant Grouper in Deutschland ist die Identifikation eines geeigneten Futtermittels für die Tiere. Nach intensiver Recherche wurden für einen Fütterungsversuch 3 Futtermittel ausgewählt, die in Deutschland bezogen werden können und den Bedürfnissen der Art prinzipiell entsprechen (Schwimmverhalten, Zusammensetzung, Größe). Die getesteten Futtermittel unterschieden sich im Wesentlichen in ihrem Protein- bzw. Fettgehalt und wurden zunächst an kleineren Tieren erprobt. Die Futtermittel hatten folgende Protein/Fettverhältnisse: Futter 1: wenig Protein / wenig Fett; Futter 2: viel Protein / wenig Fett; Futter 3: viel Protein /viel Fett). Über einen Zeitraum von 35 Tagen wurden juvenile Giant Grouper (ca. 60 g Besatzgewicht) mit diesen Futtermitteln *ad libitum* gefüttert. Innerhalb der Versuchszeit haben alle Tiere ihr Gewicht in etwa verdreifacht. Jedoch gab es deutliche Unterschiede zwischen den Futtermitteln. Festgestellt wurde, dass die Tiere, welches das Futter mit dem geringsten Protein/Fettgehalt bekommen hatten, das schlechteste Wachstum aufzeigten (Abb. 1). Die höchste Wachstumszunahme zeigten die Tiere mit dem höchsten Gehalt an Protein im Futter. Bei der Betrachtung der Körperzusammensetzung konnte festgestellt werden, dass das Futter, welches für das geringste Wachstum sorgte zu einer Vergrößerung der Leber führt (Abb. 2). Die Untersuchung von Blutwerten unterstützt die Vermutung, dass dieses Futter weniger geeignet ist für diese Fischart. Die beiden anderen Futtermittel erscheinen jedoch prinzipiell geeignet. Dennoch besteht der Bedarf ein korrekt angepasstes Futtermittel für die Art zu entwickeln.

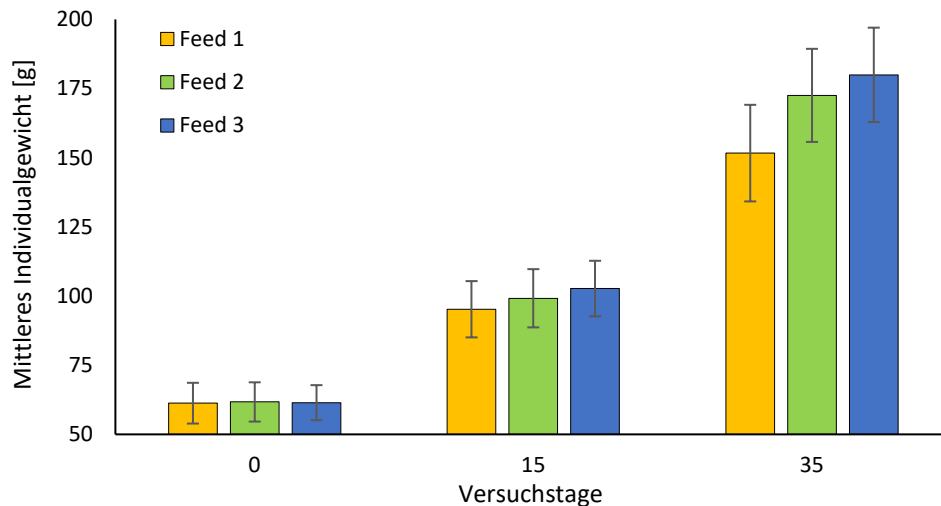


Abbildung 1: Individualgewicht von Riesenzackenbarschen zu drei Zeitpunkten, welche *ad libitum* mit unterschiedlichen kommerziellen Futtermitteln gefüttert worden sind über einen Zeitraum von 35 Tagen. MW \pm SA, n = 200.

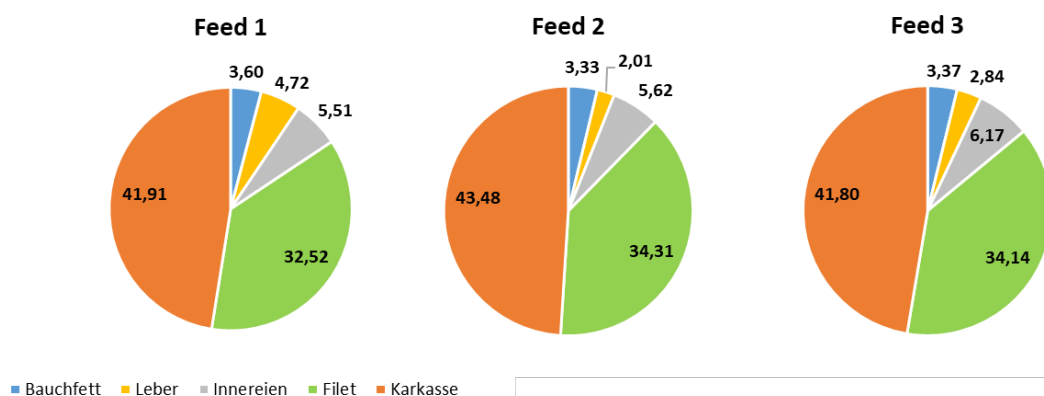


Abbildung 2: Körperzusammensetzung von juvenilen Zackenbarschen nach einem 35 tägigen Fütterungsversuch mit drei unterschiedlichen kommerziellen Futtermitteln.

Die Futtermittel, welche im Versuch das beste Wachstum bei den Fischen bei guter Gesundheit hervorriefen wurden auch in den weiteren Versuchen genutzt.

Haltungsdichteversuche

Ein wesentlicher Parameter für die erfolgreiche zukünftige Kultivierung von Riesenzackenbarschen in Kreislaufanlagen ist die Bestimmung der optimalen Haltungsdichte. Da hierfür bisher keine solide Datenlage existiert, wurden in Versuchen die Effekte von unterschiedlichen Haltungsdichten bei unterschiedlichen Tiergrößen bestimmt. Getestet wurden drei unterschiedliche Haltungsdichten – 60, 80 und 100 kg/m³. Im ersten Dichteversuch wurden größere Tiere mit einem durchschnittlichen Gewicht von 491 g in Versuchsbecken (4 Replikate) eingesetzt und über einen Zeitraum von 8 Wochen täglich dreimal *ad libitum* gefüttert. Alle 2 Wochen wurden die Tiere vermessen, begutachtet und Probenmaterial entnommen. Während dieser Messtage wurde auch die Zieldichte der einzelnen Becken angepasst indem Tiere aus der Gruppe entnommen wurden.

Festgestellt werden konnte, dass die Tiere der drei Versuchsgruppen sich nicht hinsichtlich des Wachstums und der Futtermittelaufnahme, äußerem Gesundheitszustand bzw. Körpermerkmale (Abb. 3) und Stressparametern im Blut unterschieden (Abb. 4). Die Tiere aller Versuchsgruppen wiesen durchweg einen sehr guten Zustand auf.

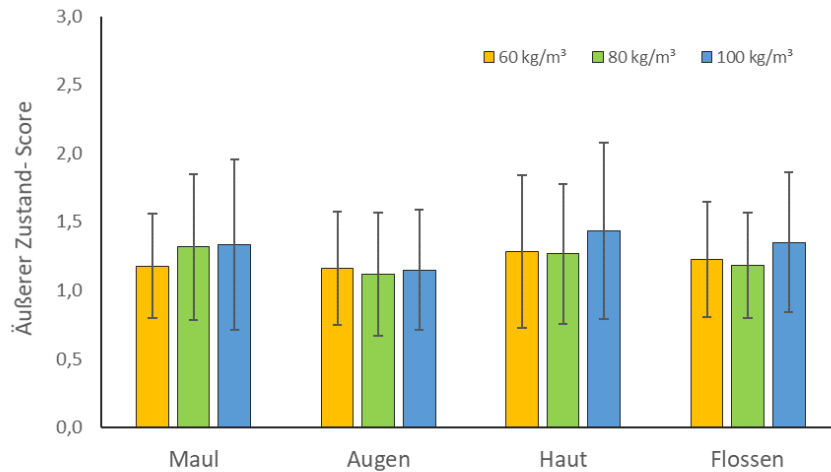


Abbildung 3: Der Zustand von Maul, Augen, Haut und Flossen der Riesenzackenbarsche nach 8 Wochen bei unterschiedlichen Haltungsdichten. Scoring Modell: 1 = keine Beanstandung, 2 = leichte Schäden, 3 = schwere Schäden oder beidseitig. MW \pm SA, n = 60.

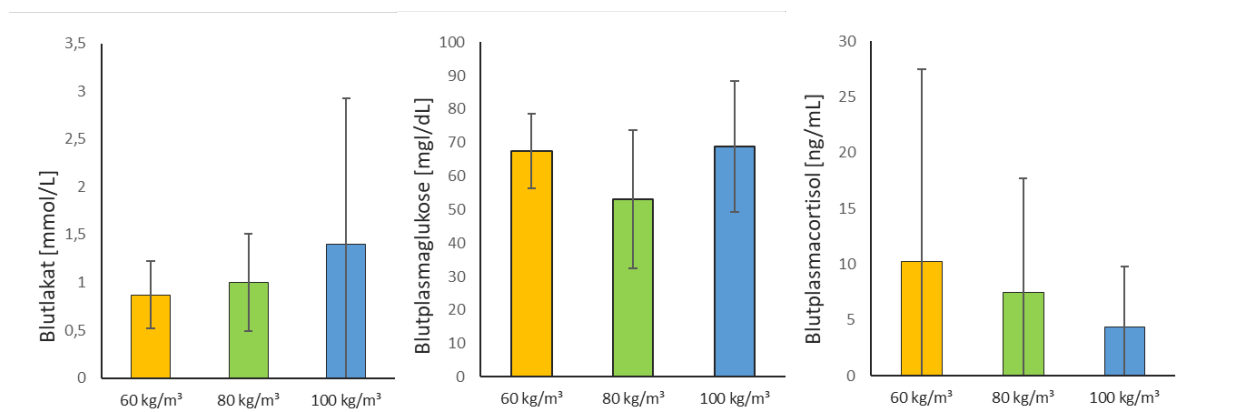


Abbildung 4: Stressrelevante Blutparameter von Riesenzackenbarschen nach 8 Wochen Hälterung bei unterschiedlichen Dichten. MW \pm SA, n = 12.

In einem zweiten Haltungsdichteversuch mit kleineren Tieren (MW bei Besatz ca. 104 g) konnten die Ergebnisse auch für diese Tiergröße bestätigt werden (Abb. 5). Es konnten zwischen den Individuen der drei Haltungsdichten hinsichtlich des Wachstums, der äußeren Erscheinung und stress-relevanter Blutparameter keine signifikanten Unterschiede festgestellt werden.

Auf Grundlage der erhobenen Daten kann geschlussfolgert werden, dass die getesteten Besatzdichten geeignet erscheinen, die Tiere, auch in Hinblick auf „Animal Welfare“ (Wohlbefinden), optimal zu halten. Hierfür wird vorausgesetzt, dass auch die anderen Anlagenparameter (spez. Wasserparameter) in einem optimalen Bereich sind.

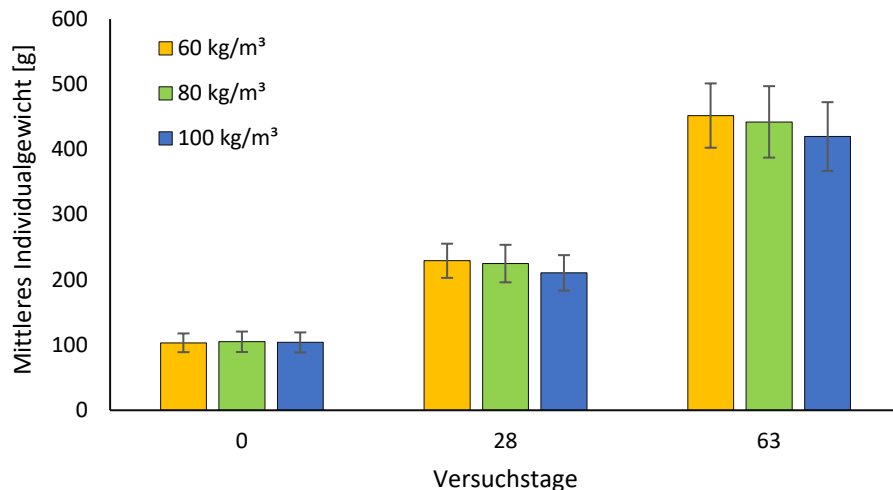


Abbildung 5: Individualgewicht von juvenilen Riesenzackenbarschen, gehalten für 63 Tage bei unterschiedlichen Haltungsdichten. MW \pm SA, n = 60.

Bioökonomische Betrachtung der Zucht von Riesenzackenbarschen in RAS in Deutschland

Auf Basis der erhobenen Daten am AWI, den Daten von den australischen Partnern und dem derzeitigen Literaturstand, konnte die Machbarkeit überprüft werden. Zudem wurde auf Basis der Versuche die Skalierung einer Pilotanlage (Abb. 6) ausgelegt und Produktionspläne entwickelt.

Die Berechnungen basieren in erster Linie auf individuellen Wachstumsmodellen, welche die Futterrate, die Futterverwertung und die relative Wachstumsrate in Abhängigkeit vom Fischgewicht modellieren. Bei Kenntnis von zwei dieser drei Funktionen kann das absolute Wachstum der Fischart über die Zeit berechnet werden. Aus diesem leitet sich ein Besatz- und Produktionsplan ab, der gleichfalls das mehrfache Einsetzen von Besatzfischen pro Jahr berücksichtigt. Außerdem können in der Berechnung Betriebsstoffe artabhängig berücksichtigt werden. Hieraus können Abschätzungen für die Produktionskosten durchgeführt werden und Marktsegmente identifiziert werden.

Des Weiteren erlauben die Berechnungen die Konzeption einer Erweiterung der Anlagen- bzw. Produktionskapazität. Eine Anlage im kommerziellen Maßstab würde einen Besatz der Anlage und Ernte etwa 6 bis 7 Mal pro Jahr ermöglichen. Ein angenommener permanenter Besatz von 100 t erlaubt somit eine Produktion von ca. 270-290 t pro Jahr. Der Markt für den in Deutschland gezüchteten Riesenzackenbarsch ist im gehobenen Segment der frischen, und nachhaltigen Aquakulturprodukte. Im direkten Vergleich zu anderen marinen Fischarten – Dorade, Europäischer Wolfsbarsch oder Gelbschwanzmakrele (Kingfish), die bereits in geschlossenen Kreislaufanlagen gezüchtet werden, ist der Riesenzackenbarsch mit seinem schnellen Wachstum, der einfachen Haltung und der hohen Produktqualität mehr als konkurrenzfähig und ein idealer neuer Kandidat für die Kreislaufaquakultur. Die Art ordnet sich im Marktsegment der Premiumprodukte ein. Mit einem Verkaufspreis von etwa 26 bis 35 €/kg (ganzes Tier, ausgenommen) ist die Art gleichauf mit anderen Premiumarten wie etwa der Gelbschwanzmakrele, dem Steinbutt und dem Barramundi.

Die Vorteile des Anlagendesign und darüber hinaus des mehrere Kohortensystems ist die Flexibilität in der Produktion und die Stabilität aller Prozesse und Betriebsparameter. Die Menge an anfallenden Stoffen aus diesem Anlagenkonzept (z.B. Schlamm, gelöste Nährstoffe) bleiben über die Zeit konstant. Somit können alle sekundäre Produktions- bzw. Integrationsmodule ihre Produktion auf einen gleichbleibenden Input basieren, ohne die Entstehung von Leerzeiten und/oder Produktionslücken.

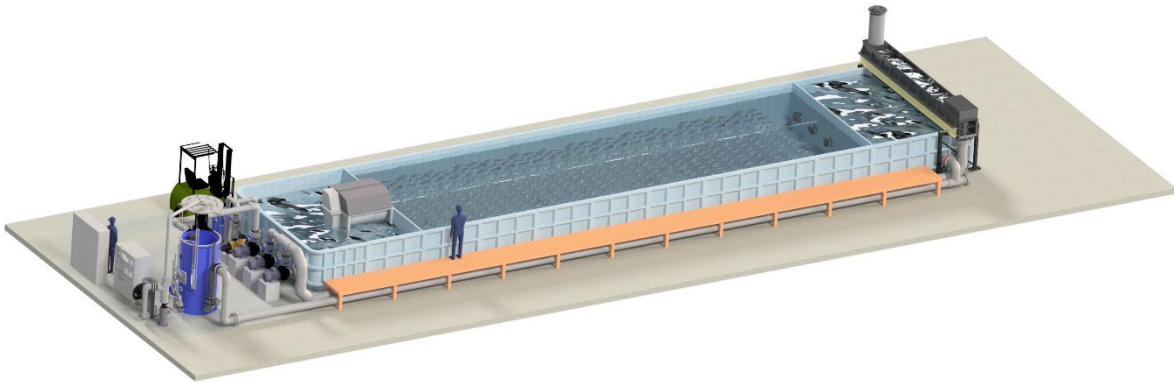


Abbildung 6: Modelldarstellung einer geschlossenen Pilotanlage für den Riesenzackenbarsch. Gesamtvolumen ca. 160 m³, Beckenvolumen ca. 100m³. Jahresproduktion (geschätzt) ca. 25 t.

Aufgrund der erhobenen Daten und der bioökonomischen Simulation kann davon ausgegangen werden, dass der Riesenzackenbarsch erfolgreich in Deutschland und Europa gezüchtet werden kann. Es konnten Futtermittel identifiziert werden, die den prinzipiellen Ansprüchen der Art genügen, wenngleich eine Optimierung für den Riesenzackenbarsch vorteilhaft wäre und vorgeschlagen wird. Ein anderes grundlegendes Problem für eine erfolgreiche Zucht der Art bei uns in der Region ist die Verfügbarkeit von Besatzmaterial. Dieses steht prinzipiell über den Partner in Australien derzeit zur Verfügung. Jedoch ist dieser Beschaffungsweg aufgrund der Entfernung nicht nachhaltig und eine Abhängigkeit zu diesem einem Lieferanten sehr groß.

B. Halophytenintegration zur Nutzung gelöster Nährstoffe

Ein wesentliches Ziel des Projektes war die Nutzung von Reststoffen einer marinen Kreislaufanlage, sodass dieser Aquakulturansatz nachhaltiger und im besten Fall ohne anfallende Reststoffe betrieben werden kann. Zur Entfernung von gelösten Nährstoffen – vorrangig stickstoffbasierte Verbindungen wie Ammonium, Nitrit und Nitrat eignen sich Pflanzen bestens. Jedoch sind für den Einsatz im marinen Bereich nur sog. Halophyten (salztolerante Pflanzen) geeignet.

Zu Projektbeginn wurden daher eine Auswahl von Halophytenarten getroffen, die prinzipiell für den Einsatz genutzt werden können, verfügbar sind und darüber hinaus auch bereits als Lebensmittel Verwendung finden. Ausgewählt wurde der Europäische Queller (*Salicornia europaea*), der bereits in einer Vielzahl von Studien als idealer Kandidat für ein gutes Wachstum unter erhöhten Salzkonzentrationen beschrieben wurden. Diese Art wird mittlerweile auch in Deutschland in geringen Umfang im Handel angeboten. Außerdem wurde das Salzkraut (*Salsola soda*) ausgewählt, da diese Art hervorragend auf salzhaltigen Böden gedeiht und speziell in der südeuropäischen Küche bekannt ist. Der dritte Kandidat für die Versuche war der Meerfenchel (*Crithmum maritimum*), der ebenfalls salzliebend ist und

darüber hinaus zum Verzehr geeignet. Im weiteren Projektverlauf wurden das Artenspektrum für die Tests noch erweitert.

Zu Beginn wurden grundsätzliche Überlegungen zur Halophytenintegration in ein marines RAS durchgeführt. Festgelegt wurde, dass das System entkoppelt vom Hauptsystem betrieben werden kann, wodurch Prozessparameter besser eingestellt und überwacht werden können. Das System soll modulartig aufgebaut sein, sodass es bei Bedarf erweitert werden kann. Es soll vertikal der Platz genutzt werden und auf Basis eines aeroponischen Konzeptes funktionieren. Mittels dieser Überlegungen wurde zunächst am AWI/ Zentrum für Aquakulturforschung ein aeroponisches Versuchssystem entwickelt und gebaut, welches 9 getrennte Wasserkreisläufe mit jeweils 3 Pflanzeinheiten hatte. Außerdem konnten die Pflanzeinheiten horizontal oder vertikal positioniert werden. Zur Beleuchtung wurden pflanzengeeignete LED Paneele verbaut.

Test unterschiedlicher Halophytenarten

Vor Versuchsbeginn wurden die Pflanze aus Samen vorgezogen. Im ersten Versuch wurden über einen Zeitraum von 8 Wochen die drei zuvor ausgewählten Halophytenarten unter (1) horizontaler und vertikaler Ausrichtung und (2) mit Aquakulturwasser aus einer marinen Garnelenzucht und mit einer Nährstofflösung versorgt. Das Salzkraut zeigte sehr gutes Wachstum, besonders in der vertikalen Kultur mit Nährstofflösung. In horizontaler Kultur war das Wachstum der Art deutlich geringer. Mit Garnelenwasser versorgte Pflanzen dieser Art wuchsen weniger. Der Meerfenchel wuchs in allen Versuchsgruppen sehr schlecht. Diese Art ist unter den vorgegebenen Kulturbedingungen nicht zu empfehlen. Hauptursache hierfür ist wahrscheinlich der Salzgehalt, der mit 20 ppt zu hoch erscheint. Der europäische Queller hingegen wies ein sehr gutes Wachstum auf. Diese Art wuchs im Aquakulturwasser im Mittel besser als in der Nährstofflösung. Salzkraut und Europäischer Queller eignen sich prinzipiell für die Integration in eine marine Kreislaufanlage, die mit einer verringerten Salzkonzentration betrieben wird.

Zum erfolgreichen Indoor-Anbau von Halophyten in Integrationsmodulen, sind neben der Verträglichkeit der Wasserparameter auch die Bestimmung anderer Parameter wichtig. Das Integrationsmodul soll zukünftig mit Kunstlicht betrieben werden. Hierfür ist die Bestimmung einer optimalen Lichtintensität interessant. In einem Lichtversuch in einem hydroponischem Versuchssystem wurde eine weitere interessante Art, die im ersten Versuch nicht betrachtet werden konnte, ausgewählt: Der Hirschhornwegerich (*Plantago coronopus*) wurde im Versuch genutzt sowie der Meerfenchel (*Crithmum maritimum*), der erneut getestet wurde. Im Versuch wurden drei unterschiedliche Lichtstärken (140, 180, 220 $\mu\text{mol}/\text{cm}^2$) bei einer täglichen Beleuchtungsdauer von 18 h getestet. Die Pflanzen wurden bei einem Salzgehalt von 20ppt gehalten und mittels Universaldünger versorgt. Festgestellt werden konnte, dass der Hirschhornwegerich generell ein gutes Wachstum im hydroponischem Ansatz aufwies. Besonders bei mittlerer Beleuchtungsstärke zeigte diese Art das stärkste Wachstum, während die Pflanzen, die unter höheren oder niedrigeren Lichtstärken gehalten wurden, deutlich geringer wuchsen. Die Wachstumsraten des Meerfenchel hingegen waren eher gering, jedoch wiesen die Pflanzen, die unter hohen Lichtintensitäten gehalten wurden, das stärkste Wachstum.

Aufgrund der z.T. schlechten Wachstumsergebnisse der einzelnen Kandidaten wurde ein Versuch zur Salztoleranz mit ausgewählten Arten durchgeführt. Getestet wurde das Wachstum von Europäischer Queller, Meerfenchel und Hirschhornwegerich über einen Zeitraum von 6 Wochen bei 0, 10 und 20 ppt Salzgehalt. Festgestellt wurde, dass der Europäische Queller am besten unter erhöhten Salzkonzentrationen (10 - 20 ppt) wuchs, der

Meerfenchel hatte die höchste mittlere Produktivität bei 0- 10 ppt, ebenso wie der Hirschhornwegerich. Nichtsdestotrotz zeigte diese Art die höchste Produktivität aller drei Kandidaten bis 10 ppt (Tab. 1). Die Ergebnisse zeigen, dass der Europäische Queller die einzige getestete Pflanzenart ist, die auch unter höheren Salzkonzentrationen (20 ppt) gut gedeihen kann. Für die beiden anderen Arten wird eine reduzierte Salzkonzentration empfohlen.

Tabelle1: Wachstumsindex nach 6 Wochen von drei Halophytenarten (*Salicornia europaea*, *Plantago coronopus* and *Crithmum maritimum*) gehalten in einem aeroponischem System bei unterschiedlichen Salzkonzentrationen. MW \pm SA. Hochgestellte Buchstaben deuten auf signifikante Unterschiede hin.

Parameter	Treatment		
	Freshwater	10 ppt	20 ppt
<i>Salicornia europaea</i>			
Fresh weight shoots (g)	1.2 \pm 0.8 ^a	3.6 \pm 2.4 ^b	3.7 \pm 2.6 ^b
Shoot length (cm)	7.1 \pm 0.8 ^a	8.2 \pm 1.9 ^b	7.9 \pm 1.7 ^{ab}
Root length (cm)	3.4 \pm 1.0	4.7 \pm 2.8	3.8 \pm 1.9
Productivity (g.m ⁻²)	59.0 \pm 41.8 ^a	180.9 \pm 117.7 ^b	184.7 \pm 131.2 ^b
<i>Plantago coronopus</i>			
Fresh weight shoots (g)	36.8 \pm 28.9 ^b	16.9 \pm 14.4 ^{ab}	4.4 \pm 4.8 ^a
Shoot length (cm)	25.3 \pm 6.5 ^c	17.2 \pm 4.6 ^b	12.4 \pm 1.5 ^a
Root length (cm)	26.2 \pm 18.7	25.4 \pm 13.5	10.7 \pm 7.4
Productivity (g.m ⁻²)	1838.9 \pm 1443.2 ^b	844.3 \pm 720.9 ^{ab}	217.5 \pm 239.6 ^a
<i>Crithmum maritimum</i>			
Fresh weight shoots (g)	4.8 \pm 2.6 ^b	5.0 \pm 1.8 ^b	2.0 \pm 0.6 ^a
Shoot length (cm)	19.6 \pm 4.9 ^c	13.5 \pm 2.8 ^b	8.5 \pm 1.6 ^a
Root length (cm)	29.0 \pm 6.7 ^c	23.6 \pm 4.8 ^b	11.6 \pm 2.7 ^a
Productivity (g.m ⁻²)	239.7 \pm 130.7 ^b	247.6 \pm 91.3 ^b	101.9 \pm 31.7 ^a

Bau und Erprobung des Halophyten- Integrationssystems

In enger Absprache mit dem AWI und deren Vorarbeiten hat der Partner Sander einen aeroponischen Prototyp geeignet für den Einsatz im Salzwasserbereich konzeptioniert und konstruiert (Abb. 7). Dieses Integrationsmodul hat zwei Ebenen mit einer Grundfläche von jeweils 1x2m und jeweils Platz für 84 Anzuchtwürfel. Beide Ebenen sind mit dimmbaren LED-Lampen ausgestattet sowie mit Messtechnik zur Erfassung von Lufttemperatur, relative Feuchtigkeit, und Wasserstand im Reservoir. Eine speicherprogrammierbare Steuerung (SPS) ermöglicht die Angabe von Betriebsparameter für beide Ebenen getrennt (Tab. 2). Für die Auswertung und zur Dokumentation werden alle erfassten Mess- und Betriebsparameter kontinuierlich in der SPS gespeichert.

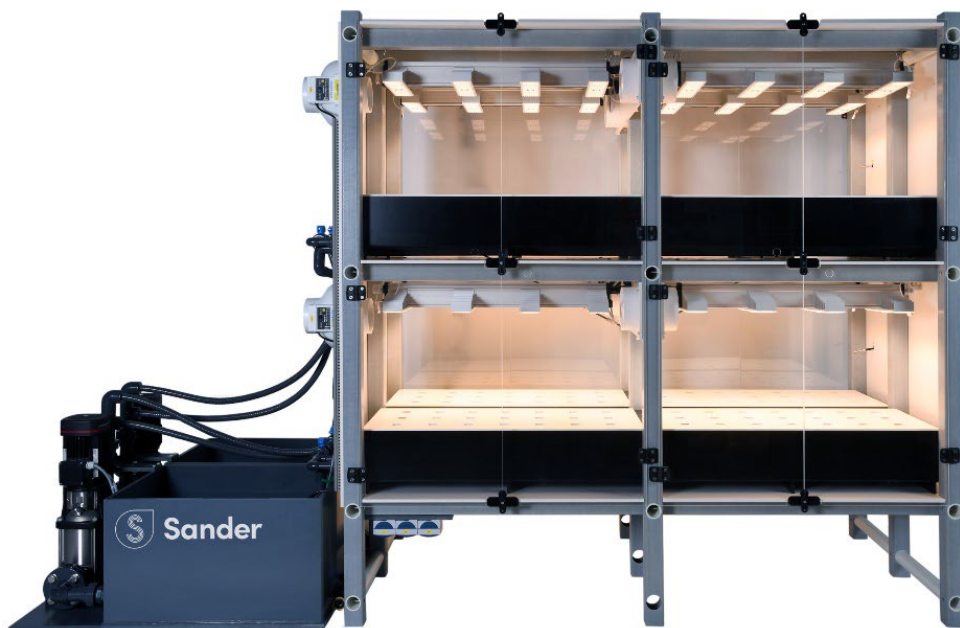


Abbildung 7: Prototyp der Firma Sander zur aeroponischen Kultivierung von Halophyten integriert in einer marine Kreislaufanlage.

Tabelle 2: Auflistung der unterschiedlichen Betriebsparameter und Einstellungsmöglichkeiten des Integrationsmoduls für die Kultivierung von Halophyten (mmWS: Millimeter Wassersäule).

Parameter	Funktionen	
	Tagesbetrieb*	Nachtbetrieb
Licht	An / Laufzeit / Aus	-
Entlüftung**	An / Laufzeit / Aus	An / Laufzeit / Aus
Windsimulation bzw. Ventilatoren***	An / Laufzeit / Aus	An / Laufzeit / Aus
Bewässerung bzw. Pumpenlauf	An / Laufzeit / Aus	An / Laufzeit / Aus
Wasserstand Reservoir****	mmWS aktuell / Nachfüllen / minimaler Wasserstand	
Luftpumpe Reservoir	An / Aus	

* Anfang bzw. Ende des Tages- bzw. Nachtbetriebs einstellbar.

** Gekoppelt and Grenzwerte für relative Feuchte und Lufttemperatur. Alarm bei Grenzwerten werden angezeigt.

*** Mehrere Zyklen möglich.

**** Wasserstand Signale (Störung bzw. Alarm bei Grenzwerten) werden angezeigt.

Der erste Prototyp wurde zum AWI transportiert, aufgebaut und gemeinsam in Betrieb genommen (Abb. 8). Aufgabe der AWI Wissenschaftler war die umfassende Erprobung des Gerätes und die Identifizierung von Problemen und Schwachstellen. Die ersten Testläufe und technische Messungen (z.B. Lichtintensität) erwiesen die Notwendigkeit Schattennetze zu installieren (Abb. 9). Auch die Steuerung wurde optimiert, so dass z.B. für einige Betriebsparameter getrennte Sollwerte für Tages- bzw. Nachtsbetrieb eingegeben werden können.

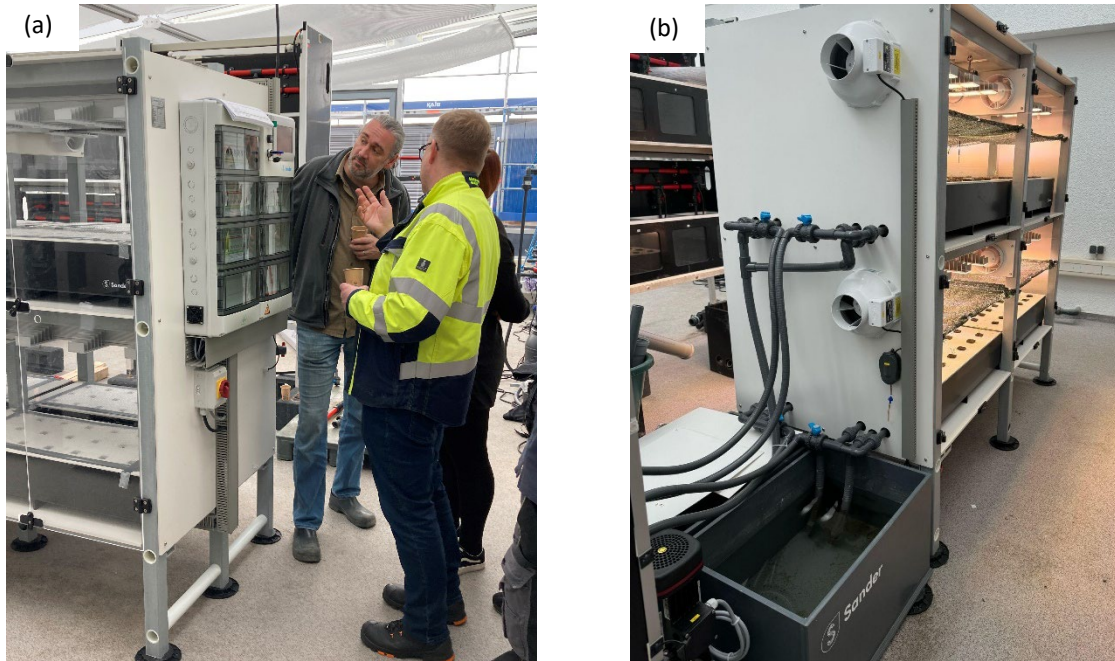


Abbildung 8: Inbetriebnahme des Aeroponikmoduls und Schulung der Mitarbeiter, durchgeführt von der Firma Sander im Zentrum für Aquakulturforschung des AWI (a). Iterativer Testlauf mit Halophyten (b).

Die ersten Keimlinge von Meerfenchel, Queller und Stranddreizack wachsen z.Z. im Aeroponikmodul (Abb. 9). Dieser iterative Testlauf wurde bis zum Projektende noch nicht beendet.

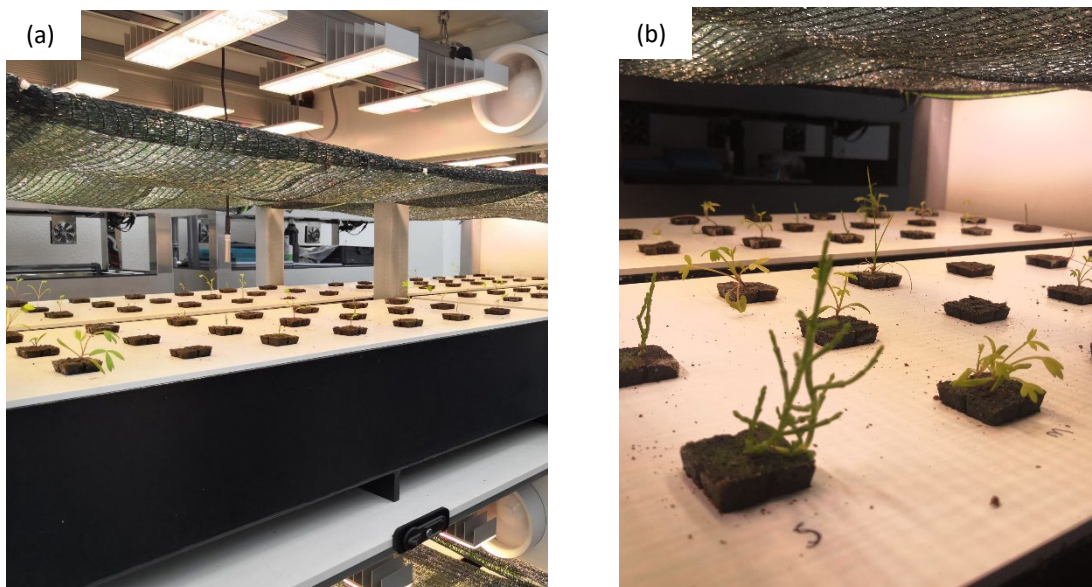


Abbildung 9: Obere Produktionsebene des vertikalen Aeroponikmoduls mit nachträglich installierten Schattennetzen (a). Anzuchtwürfel (Keimsubstrat) mit jungen Keimlingen (b).

C. Karbonisierung von festen Reststoffen einer marinen Kreislaufanlage

Gemeinsam mit maßgeblicher Unterstützung der Firma KS-VTCtech wurden die Arbeiten zur Karbonisierung durchgeführt. Zunächst wurden hierfür Reststoffe gesammelt an Kreislaufanlagen des AWI und der Garnelenzuchtanlage der Firma Förde Garnelen in Strande bei Kiel. Um die feste Fraktion des Schlammes besser abtrennen zu können wurde von der Firma KS-VTCtech eine Abseihvorrichtung gebaut (Abb. 10). Zur besseren Abtrennung wurden zudem unterschiedliche Flockungsmittel der Firma Reiflock Abwassertechnik GmbH erprobt. Für die unterschiedlichen Schlämme konnten erfolgreich geeignete Flockungsmittel und Prozessparameter gefunden werden.

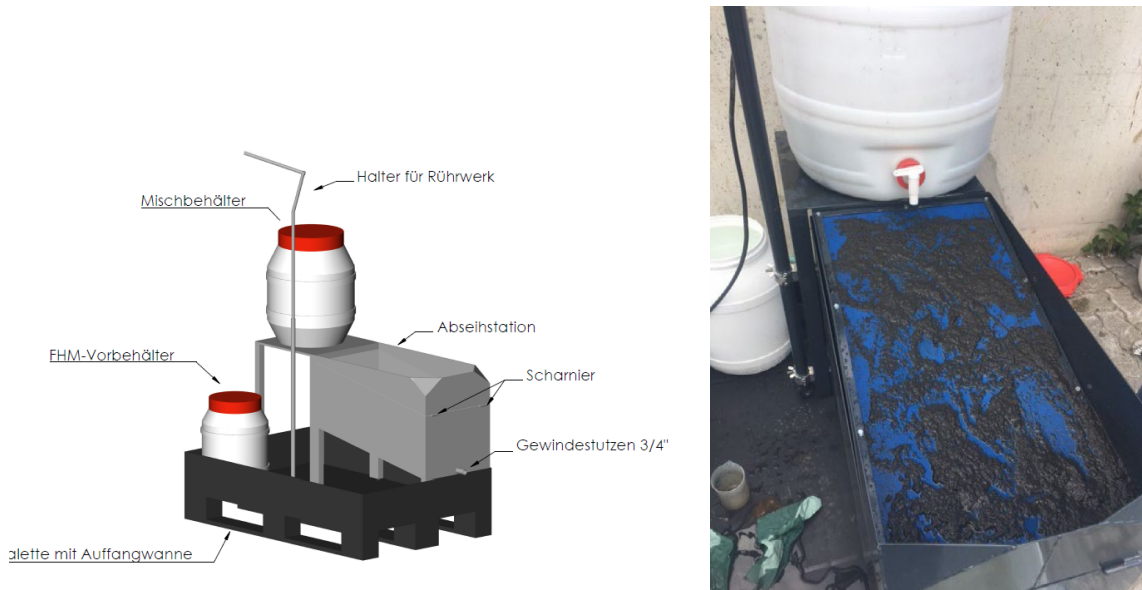


Abbildung 10: links: Abseihvorrichtung zur Eindickung von stark wässrigen Schlämmen aus einer marinen Aquakulturanlage, rechts: Aquakulturschlamm nach der Eindickung.

Der so eingedickte Schlamm wurde in einem Autoklav bei 195 °C und 16 bar Überdruck karbonisiert. Die entstandene Biokohle wies einen hohen Aschegehalt auf, hatte aber auch einen sehr guten Brennwert. Aus ca. 150 kg Abwasser konnten so 0,5 kg Biokohle erzeugt werden (Abb. 11). In Tabelle 3 sind die Eigenschaften und Prozessparameter der Kohle aufgelistet.

Tabelle 3: Eigenschaften der Biokohle und des Prozesswassers nach der Karbonisierung.

Analyse Biokohle		
Trockenmasse Edukt		16,3 %
Trockenmasse Biokohle	nach Karbonisierung	32,1 %
Trockenmasse Biokohle	nach Trocknung	91,6 %
Aschegehalt Biokohle	nach Trocknung	53,9 %
Heizwert Biokohle trocken	Hu	9.810 kJ/kg
Heizwert Biokohle waf	Hu waf	22.560 kJ/kg
Heizwert Biokohle wf	Hu af	10.400 kJ/kg
Kohlenstoff gesamt		31,1 % TS
Flüchtiger Kohlenstoff		0,9 % TS
Schwefel		0,55 %
Chlor gesamt		4,54 %
Phosphat		2,53 %
Stickstoff gesamt		2,98 %
Analyse Prozesswasser		
Trockenmassegehalt		7,8 % TS
CSB gesamt		55.800 mg/L
CSB filtriert		54.000 mg/L
Stickstoff gesamt		4.799 mg/L
Ammonium - N		1.863 mg/L
pH		6,9



Abbildung 11: Biokohle entstanden nach der Karbonisierung des Aquakulturschlammes.

Nach erfolgreicher Entwicklung der Methode zur Biokohleherstellung aus stark wässrigen, salzhaltigen Schlämmen aus Aquakultur, wurden unterschiedliche Nutzungsmöglichkeiten für die Biokohle, aber auch für die durch den Prozess entstehenden Abwässer geprüft. Hierfür wurde erneut Schlamm mittels hydrothormaler Karbonisierung (HTC) zu einer Biokohle

transformiert. Es wurde geprüft, ob sich die Kohle für die Herstellung von Aktivkohle eignet. Hierfür wurde die Biokohle aktiviert, gewaschen und getrocknet. Nach Analyse der spezifischen Eigenschaften konnte festgestellt werden, dass die Kohle nicht die notwendigen Voraussetzungen und Reinheit hat, um daraus eine qualitativ hochwertige Aktivkohle herzustellen. Insbesondere der hohe Aschegehalt der Biokohle wurde als kritisch eingestuft.

Darüber hinaus wurde geprüft, inwiefern sich die Biokohle zur Herstellung hochwertiger Pflanzenerde eignet. Es wurde eine speziell konzipierte Bodenerde entwickelt, die sich an den alten Praktiken der Terra Preta orientiert, einer Art sehr dunkler, fruchtbarer anthropogener Erde, die im Amazonasbecken zu finden ist. Terra Preta verdankt seine charakteristische schwarze Farbe dem Gehalt an verwitterter Holzkohle und wurde durch die Zugabe einer Mischung aus Holzkohle, Knochen, zerbrochenen Töpferwaren, Kompost und Dung zu den wenig fruchtbaren Böden des Amazonas hergestellt. Auf der Grundlage dieser Idee wurde die Biokohle zusammen mit anderen festen Abfallstoffen aus der Garnelenzucht bei Strande zu einer Terra Preta Shrimp Pflanzenerde gemischt. Die vorläufige Zusammensetzung der Terra Preta Shrimp Pflanzenerde wird in Tabelle 4 beschrieben.

Tabelle 4: Auflistung der Zusammensetzung von Terra Preta Shrimp Pflanzenerde.

Inhaltsstoff	Gewichtsanteil (%)	Funktionsbeschreibung
Biokohle	15	Nährstoffquelle
Garnelen Reststoffe	20	Düngemittel, organisch
Phonolit	8	Mineralstoffquelle
Prozesswasser	10	Mikroorganismenquelle
Mutterboden	47	Düngemittel, organisch

Die fertige Terra Preta Shrimp Mischung (Abb. 12) wird anschließend einer aeroben Kompostierung ausgesetzt.

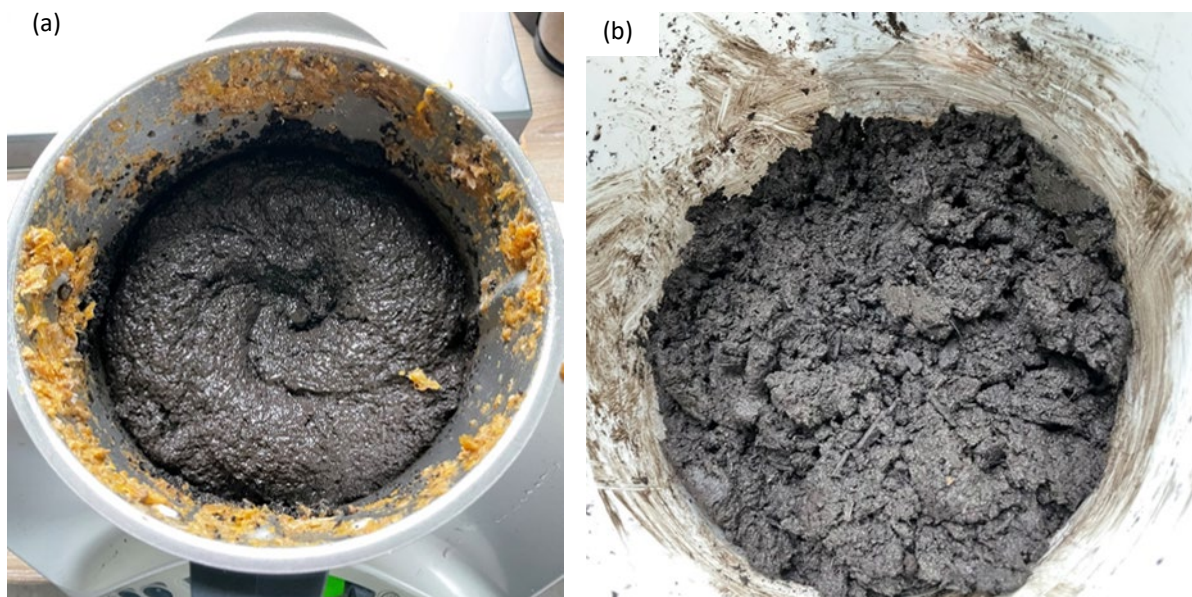


Abbildung 12: Vermischung aller Inhaltsstoffe mit Ausnahme von Mutterboden (a). Fertige Mischung der Terra Preta Shrimp Pflanzenerde vor der Reifezeit (aerobe Kompostierung) (b).

Weitere Untersuchungen mit den aus der HTC entstandenen Reststoffe wurden durchgeführt. Es wird angenommen, dass im Prozesswasser der Karbonisierung unterschiedlichste gelöste Kohlenstoffverbindungen vorhanden sind, die teilweise denitrifizierenden Bakterien als Kohlenstoffquelle dienen könnten. Im Zentrum für Aquakulturforschung des AWI wurde ein eingefahrenes marines RAS mit einem Gesamtvolumen von ca. 5m³ genutzt, um die Eignung zu überprüfen. Hierfür wurde die Kohlenstoffquelle (Ethanol) des Denitrifikationsfilters sukzessive durch Karbonisierungswasser ersetzt und die Performance hinsichtlich des Nitrat-Abbaus über eine Woche dokumentiert. Festgestellt wurde, dass im Denitrifikationsfilter eine Nitratreduktion stattgefunden hat. Zudem blieben andere Prozessparameter der Denitrifikation im für den Prozess optimalen Bereich (Redoxpotential und Sauerstoffkonzentration). Jedoch wurden deutlich größere Mengen der Biokohlewässer benötigt, um eine Nitratreduktion zu erzielen. Da vermutlich nicht alle gelösten Kohlenstoffverbindungen von den Bakterien genutzt werden können, wurde eine Dunkelfärbung des Kreislaufwassers über die Zeit festgestellt. Für eine umfassende Bewertung der Auswirkungen auf die Mikrobiologie im Denitrifikationsfilter und Wasserqualitätsparameter sind jedoch weiterführende Experimente notwendig.

2. Zusammenarbeit mit anderen Stellen

An der Bearbeitung des Projektes waren neben den beiden Hauptpartnern Alfred-Wegener-Institut und Sander Elektroapparate GmbH auch die Firma KS VTCtech im Unterauftrag beteiligt. Weiterhin bestand im Rahmen des Innovationsraums der Blauen Bioökonomie ein enger Austausch zu den anderen Projekten des Raumes. Hier ist besonders das Projekt HaFF – Küstempflanzen zur Filtration von nährstoffbelastetem Wasser zu nennen. Außerdem wurde mit Unterstützung externer Partner in Australien die Beschaffung der Riesenzackenbarsche realisiert.

3. Die wichtigsten Positionen des zahlenmäßigen Nachweises

Die wichtigsten Kostenpunkte im Projekt sind Personalkosten, für Koordination, Planung und Bau von Versuchssystemen, Durchführung von Experimenten und das Berichtswesen. Hierbei sind ebenfalls Kosten für Material (Verbrauchsmaterial, Systembau, Material für Anpassungsarbeiten an den Versuchssystemen, Tiere, Futtermittel, etc.) angefallen. Außerdem wurden Mittel für die Vergabe von Aufträgen für die Umsetzung der Karbonisierungsarbeiten eingesetzt. Eine genauere Auflistung der eingesetzten Mittel kann den zahlenmäßigen Nachweisen der Partner entnommen werden.

4. Die Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Projektarbeiten

Alle im Projekt durchgeführten Arbeiten und Baumaßnahmen waren notwendig, um die erzielten Projektergebnisse zu erzeugen. Die Arbeiten konnten von den Partnern nicht aus eigenen Mitteln finanziert werden und waren notwendig für die Erfüllung aller Arbeitsziele. Die Anpassungsarbeiten an bestehenden Anlagen und der Aufbau von neuen Versuchssystemen und Pilotanlagen wurde an die Bedürfnisse der jeweiligen Arten angepasst, sodass in den Versuchen belastbare Daten erzeugt werden konnten. Bei der Versuchsplanung wurden die Anzahl der Versuchsorganismen, Replikate und Dauer der Versuche so geplant, dass in einem angemessenen Rahmen valide Ergebnisse erzeugt werden konnten, die z.T. die Basis für mögliche nächste Schritte sind. Alle erzeugten Ergebnisse waren bis zum Projektende nicht bekannt und konnten nicht durch andere Maßnahmen erzeugt werden.

5. Der voraussichtliche Nutzen, insbesondere die Verwertbarkeit des Ergebnisses – auch konkrete Planungen für die nähere Zukunft – im Sinne des fortgeschriebenen Verwertungsplans

Die Ergebnisse ermöglichen den Partner Sander die Konzeption und Planung von Produktionssysteme für die marine Aquakultur in unterschiedlichen Größen (Kreislaufanlagen und Aeroponikmodulen). Das aeroponische Pflanzenmodul wird als relevante Entwicklung eingestuft und ergänzt das Portfolio der Sander Produkte für die marine Aquakultur. Insbesondere den Aufbau der Produktpalette für Meerwassersysteme (Haupt- und Integrationsmodule) wird als notwendig betrachtet, um die Bioökonomie auf marinen Standorten zu unterstützen und realisierbar zu machen.

6. Der während der Durchführung des Vorhabens dem Zuwendungsempfänger bekannt gewordenen Fortschritt auf dem Gebiet des Vorhabens bei anderen Stellen

Dem Projektkonsortium sind keine Maßnahmen Dritter bekannt, die während der Projektphase zum Ziel hatten ähnliche Ergebnisse zu erzeugen. Technische und methodische Voraussetzung zur Umsetzung der einzelnen Arbeitsschritte waren zu Beginn des Projektes bekannt und dienten als Basis für die umzusetzenden Arbeiten.

7. Die erfolgten oder geplanten Veröffentlichungen des Ergebnisses nach Nr. 5 der NKBF

Peer reviewed Publikationen

Isabela Pinheiro, Fionn Stoltenberg, Jörn Halfer, Mirko Bögner, Matthew James Slater - The effects of the nutrient source and growth orientation on the aeroponic production of three halophyte species. Manuscript in Bearbeitung.

Mirko Bögner, Bert Wecker, Jaime Orellana, Svea Erichsen, Jörn Halfer, Kyra Böckmann, Matthew J. Slater – Influence of different stocking densities on the growth performance and animal welfare of giant grouper (*Epinephelus lanceolatus*) in RAS. In Bearbeitung.

Vorträge

Isabela Pinheiro, Elisa Prates, Cynthia Couto, Jörn Halfer, Mirko Bögner - GROWTH PERFORMANCE OF THREE HALOPHYTE SPECIES IN AN AEROPONIC SYSTEM WITH DIFFERENT SALINITIES. Oral presentation. AQUA 2024, Kopenhagen.

Jaime Orellana, Kyra Böckmann, Mirko Bögner, Svea Erichson, Jörn Halfer, Kai Lorkowski, Isabela Pinheiro, Klaus Serfass, Matthew J. Slater, Bert Wecker – Bioökonomische Optimierung einer geschlossenen marinen Kreislaufanlage in Deutschland, Büsumer Fischtag, 2024

Isabela Pinheiro - Marine aquaponics: is it possible to cultivate vegetables in seawater? Oral presentation. Fenacam 2023. Natal, Brasilien.

Mirko Bögner, Bert Wecker, Jaime Orellana, Svea Erichsen, Jörn Halfer, Kyra Böckmann, Matthew J. Slater – Cultivation of Giant Grouper (*Epinephelus lanceolatus*) in recirculating aquaculture systems in Europe. EAS Wien, 2023

Mirko Bögner, Bert Wecker, Svea Erichsen, Jörn Halfer, Kyra Böckmann, Matthew J. Slater – Neue Arten für die Deutsche Aquakultur: Vorstudie zur Kultivierung des Riesenzackenbarsches (*Epinephelus lanceolatus*) in geschlossenen Kreislaufanlagen. Stralsund, BaMS Symposium 2022

Mirko Bögner – OptiRAS – Integrierte Kultivierung von Halophyten und Riesenzackenbarschen mit Reststoffkarbonisierung, aktueller Projektstatus, BaMS Frühjahrskonferenz, 2022.

Klaus Serfass – Karbonisierung von stark flüssigen und salzhaltigen Abfallstoffen aus der Fisch- und Garnelenzucht, Workshop Bioremediation in der Ostsee, Pflanzen als Multitalente, 2021

Mirko Bögner - Entwicklung und Erprobung einer integrierten Haltung von marinen Warmwassertierarten und Halophyten mit Karbonisierung von Reststoffen zur optimierten Stoffstromnutzung in rezirkulierenden Aquakultursystemen. Workshop Bioremediation in der Ostsee, Pflanzen als Multitalente, 2021

Poster

Mirko Bögner, Jaime Orellana, Klaus Serfass – Nutzung von Reststoffströmen aus mariner Aquakultur, BaMS Symposium Oldenburg, 2023

I. Pinheiro, E. Prates, J. Halfer, M. Bögner, W. Seiffert, M. Slater - THE USE OF DIFFERENT NITRATE SOURCES FOR GROWTH OF THE HALOPHYTE PLANTAGO CORONOPUS IN A DECOUPLED AQUAPONICS SYSTEM. Poster Presentation. EAS 2023, Wien.

Mirko Bögner – Integrierte marine Aquakultur mit Feststoff- Karbonisierung, Messeposter 2022