

Erwin Sander Elektroapparatebau GmbH
Gottfried Wilhelm Leibniz Universität Hannover
Hochschule für Technik und Wirtschaft des Saarlandes

BIOLOGISCHE ABWASSERREINIGUNG IN LANDBASIERTEN MARINEN KREISLAUFANLAGEN DURCH DIE INTEGRIERTE KULTUR VON HALOPHYTEN

Abschlussbericht zur ersten Projektphase über ein Nachhaltigkeitsprojekt,
gefördert unter dem Az: 27708-23 von der
Deutschen Bundesstiftung Umwelt

von

Dipl. Biol. Anne Buhmann (LUH)

Dipl. Biol. Verena Hanke (HTW)

Prof. Dr. Jutta Papenbrock (LUH)

Prof. Dr. Uwe Waller (HTW)

Dr. Bert Wecker (Erwin Sander Elektroapparatebau GmbH, Koordinator)

November 2011

INHALTSVERZEICHNIS

1	ZUSAMMENFASSUNG.....	1
2	EINLEITUNG	3
3	HAUPTTEIL.....	5
3.1	Pflanzenmaterial, Saatgut und Pflanzenanzucht.....	5
3.2	Konstruktion und Betrieb der Lysimeter	7
3.3	Lysimeter Versuche	8
3.3.1	Methoden.....	8
3.3.2	Versuchsdurchführung und Ergebnisse.....	10
3.3.2.1	Lysimeter-Betrieb bei unterschiedlicher Beleuchtung.....	10
3.3.2.2	Lysimeterbetrieb mit unterschiedlich langen Bewässerungszeiten.....	14
3.3.2.3	Vergleich unterschiedlicher Bewässerungslösungen	15
3.3.2.4	Vergleich unterschiedlicher Kultivierungsmethoden	16
3.3.2.5	Bestimmung der Salztoleranz von <i>Plantago</i> in hydroponischer Kultur	17
3.3.2.6	Untersuchungen zu möglichem Eisenmangel	17
3.4	Laufende Laborversuche	18
3.4.1	Wiederholung des Bewässerungszeiten Versuchs	18
3.4.2	Biofilterleistung und Biomasseproduktion in der Hydrokultur	18
3.4.3	Langzeitversuch mit <i>Aster tripolium</i> und <i>Plantago coronopus</i>	18
3.4.4	Wiederholung des Versuchs zur Bestimmung von möglichem Eisenmangel	19
3.5	Bilanzierung der Laborversuche	19
3.6	Aufbau des Feldversuches.....	19
3.6.1	Technische Auslegung und Aufbau	19
3.6.2	Routineabläufe und Datenerhebung.....	27
3.6.3	Ergebnisse erster intensiver Messperioden	28
3.6.3.1	Wachstum der Pflanzen im Pflanzenreaktor und Nährstoffretention	28
3.6.3.2	Das Wachstum der Fische im primären Fluid-Kreislauf	34
3.6.3.3	Der pH-Wert im primären Fluid-Kreislauf	34
3.7	Fazit	35

ABBILDUNGSVERZEICHNIS

ABB. 1: DIE BEIDEN UNTERSUCHTEN HALOPHYTEN: <i>ASTER TRIPOLIUM</i> (LI.) UND <i>PLANTAGO CORONOPUS</i> (RE.).	1
ABB. 2: PRINZIPIELLE KOMPONENTEN DES PRIMÄREN UND SEKUNDÄREN FLUID-KREISLAUFS FÜR DEN FELDVERSUCH.....	2
ABB. 3: SCHEMA EINES WEITGEHEND IN SICH GESCHLOSSENEN FLUID-KREISLAUFS MIT INTEGRIERTER NÄHRSTOFFVERWERTUNG DURCH PFLANZENPRODUKTION (HALOPHYTEN) UND ENERGIERÜCKFÜHRUNG. BIOGASPRODUKTION UND ENERGIEWANDLUNG SIND NICHT ASPEKTE DIESES VORHABENS.	4
ABB. 4: SCHEMATISCHE DARSTELLUNG EINES LYSIMETERS ANGEFERTIGT VON DER FIRMA SANDER. FÜLLHÖHEN WURDEN LEICHT MODIFIZIERT.	7
ABB. 5: OBERE REIHE: KONSTRUKTION UND BESCHICKUNG DER LYSIMETER MIT DEN UNTERSCHIEDLICHEN SUBSTRATEN. UNTERE REIHE: LYSIMETER IM BETRIEB IN DREIERGRUPPEN FÜR JEWEILS EINE STATISTISCHE VERSUCHSEINHEIT ZUSAMMENGEFASST.	8
ABB. 6: <i>ASTER TRIPOLIUM</i> : BIOMASSEZUWACHS EINZELNER PFLANZEN UNTER DEN VERSCHIEDENEN BELEUCHTUNGSREGIMEN.	10
ABB. 7: ABNAHME DER PHOSPHATKONZENTRATION IM PROZESSWASSER DER LYSIMETER ÜBER 10 VERSUCHSWOCHEN UNTER VERSCHIEDENEN BELEUCHTUNGSREGIMEN.....	11
ABB. 8: NITRATKONZENTRATION IM PROZESSWASSER DER LYSIMETER ÜBER 10 VERSUCHSWOCHEN UNTER VERSCHIEDENEN BELEUCHTUNGSREGIMEN.	12
ABB. 9: AMMONIUM/AMMONIAKKONZENTRATION IM PROZESSWASSER DER LYSIMETER ÜBER 10 VERSUCHSWOCHEN UNTER VERSCHIEDENEN BELEUCHTUNGSREGIMEN.....	13
ABB. 10: NITRITKONZENTRATION IM PROZESSWASSER DER LYSIMETER ÜBER 10 VERSUCHSWOCHEN UNTER VERSCHIEDENEN BELEUCHTUNGSREGIMEN.	14
ABB. 11: STICKSTOFF- UND PHOSPHORGEHALT IM GETROCKNETEN PFLANZENMATERIAL ZU VERSUCHSBEGINN UND ZU VERSUCHSENDE FÜR ALLE DREI VERSUCHSGRUPPEN MIT UNTERSCHIEDLICHER BELEUCHTUNG.	14
ABB. 12: ZUSAMMENFASSUNG DER ERGEBNISSE DER VERSUCHE „EBBE-FLUT“-SITUATION. DIE SCHRAFFIERTEN FLÄCHEN STELLEN DIE PUMPENLAUFZEITEN DAR, DIE UNTERSCHIEDLICHE GRÖÖBE DER PFLANZENSCHEMATATA DEN BIOMASSEZUWACHS. MIT FOLGENDEN LAUFZEITEN DER ZIRKULATIONSPUMPEN WURDE INNERHALB EINES TAGES BEWÄSSERT: 12 H LAUFZEIT, 2 X 6 H LAUFZEIT UND 4 X 1 H LAUFZEIT AM TAG, NACHTS OHNE BEWÄSSERUNG	15
ABB. 13: SCHEMA EINES FLUID-KREISLAUFS FÜR DIE AQUAKULTUR VON MARINEN FISCHEN UND KREBSTIEREN, DER EIN RECYCLING ERMÖGLICHT.	15
ABB. 14: SCHEMATISCHE DARSTELLUNG DER KULTURSYSTEME ZUR KULTIVIERUNG VON HALOPHYTEN. OBEN: LYSIMETER, UNTEN: HYDROKULTUR.	16
ABB. 15: HYDROPONISCHEN KULTUR VON <i>PLANTAGO</i> . DIE PFLANZEN WERDEN IN LÖCHER IN STYROPORPLATTEN GESETZT. VON LINKS NACH RECHTS: NÄHRLÖSUNG; PROZESSWASSER; WURZELWACHSTUM; VERGLEICH WURZELWACHSTUM: LINKS SAND, RECHTE HYDROKULTUR.	16
ABB. 16: PIPETTENBOX-KULTUR VON <i>PLANTAGO</i> ZUR UNTERSUCHUNG SEINER SALZGEHALTSTOLERANZ.	17
ABB. 17: HYDROKULTUR MIT <i>P. CORONOPUS</i>	18
ABB. 18: HYDROKULTUR MIT <i>A. TRIPOLIUM</i>	18
ABB. 19: HYDROKULTUREN VON <i>P. CORONOPUS</i> MIT UNTERSCHIEDLICHEN EISENZUGABEN.	19
ABB. 20: SCHEMATISCHER AUFBAU DES FELDVERSUCHES MIT PRIMÄREM UND SEKUNDÄREM FLUID-KREISLAUF. DER PRIMÄRE KREISLAUF IST MIT FISCHEN BESETZT UND STELLT DIE NÄHRSTOFFQUELLE DAR. DER SEKUNDÄRE KREISLAUF MIT HALOPHYTEN IST DIE NÄHRSTOFFSENKE.....	20
ABB. 21: SCHEMATISCHER AUFBAU UND DES FLUID-KREISLAUFS FÜR DIE EXPERIMENTELLEN UNTERSUCHUNGEN MIT HALOPHYTEN. LEITUNGEN SCHWARZ: WASSERFÜHREND, LEITUNGEN ROT: ANALOGE SIGNALE, LEITUNGEN GRÜN: DIGITALE SIGNALE, LEITUNGEN VIOLETT: STADTWASSER, ABWASSER.....	21
ABB. 22: BLICK AUF ZWEI TECHNISCH IDENTISCHEN FLUID-KREISLÄUFE IN DER FORSCHUNGSHALLE VÖLKLINGEN (HTW). LINKS: FLUID-KREISLAUF VOM LANDMARK-PROJEKT. RECHTS: FLUID-KREISLAUF DER	

HALOPHYTEN-ANLAGE. WÄHREND DER AUTOMATISIERUNGSPHASE WAR ZUNÄCHST IMMER NUR EIN FLUID-KREISLAUF BESETZT, WÄHREND DER UNBESETZTE FLUID-KREISLAUF FÜR DIE FUNKTIONSPRÜFUNGEN UND STRESSTESTS VERWENDET WURDE.....	22
ABB. 23: BLICK IN DEN HALTUNGSTANK MIT 2000 JUVENILEN WOLFSBARSCHEN. BESATZDICHTER 1.7 KG/M ³ ...	25
ABB. 24: AUFSTELLUNG DER LYSIMETER IM GEWÄCHSHAUS. ZU SEHEN IST IM VORDERGRUND DIE PROZESSWASSERZUFUHR MIT DURCHFLUSSMESSER UND DER RÜCKLAUF ÜBER DEN PUMPENSUMPF. ...	26
ABB. 25: DAS GEWÄCHSHAUS MIT DEN LYSIMETERN. BILD RECHTS: <i>PLANTAGO CRONOPUS</i> AUF DER LINKEN SEITE, <i>ASTER RIPOLIUM</i> AUF DER RECHTEN SEITE DES GEWÄCHSHAUSES.....	27
ABB. 26: NÄHRSTOFFKONZENTRATIONEN IM PRODUKTIONSTANK DES PRIMÄREN FLUID-KREISLAUFS GEMESSEN IM ZENTRALEN VORRATSBEHÄLTER.	27
ABB. 27: KONZENTRATIONEN VON AMMONIUM/AMMONIAK UND NITRIT, IM PRODUKTIONSTANK DES PRIMÄREN FLUID-KREISLAUFS GEMESSEN IM ZENTRALEN VORRATSBEHÄLTER.....	28
ABB. 28: WACHSTUM VON <i>PLANTAGO CORONOPUS</i> IN DEN LYSIMETERN. VON LINKS NACH RECHTS: VON LINKS NACH RECHTS: APRIL, MAI, JUNI, JULI 2011.....	28
ABB. 29: WACHSTUM VON <i>ASTER TRIPOLIUM</i> IN DEN LYSIMETERN. VON LINKS NACH RECHTS: APRIL, MAI, JUNI, JULI 2011.	29
ABB. 30: DAS WACHSTUM VON <i>PLANTAGO CORONOPUS</i> IM PFLANZENREAKTOR.	29
ABB. 31: DAS WACHSTUM VON <i>ASTER TRIPOLIUM</i> IM PFLANZENREAKTOR.....	30
ABB. 32: MITTLERE NÄHRSTOFFKONZENTRATIONEN VON NO ₃ ⁻ -N UND PO ₄ ³⁻ BZW. NH ₄ ⁺ -N UND NO ₂ ⁻ -N IM PRODUKTIONSTANK (ZULAUF) UND IN DER RÜCKFÜHRUNG (RÜCKLAUF GEWÄCHSHAUS) ALLER LYSIMETER (= PFLANZENREAKTOR).	30
ABB. 33: NÄHRSTOFFE IM ZU- UND ABLAUF DES LYSIMETER 1. BEPFLANZUNG MIT <i>A. TRIPOLIUM</i>	32
ABB. 34: NÄHRSTOFFE IM ZU- UND ABLAUF DES LYSIMETER 14. BEPFLANZUNG MIT <i>P. CORONOPUS</i>	33
ABB. 35: WACHSTUM VON <i>D. LABRAX</i> INNERHALB DER ERSTEN EXPERIMENTELLEN PHASE.	34
ABB. 36: ZEITLICHER VERLAUF DER PH-WERT STABILISIERUNG IN DER HALOPHYTEN-ANLAGE.	35
ABB. 37: REGRESSION FÜR DIE FÜR <i>A. TRIPOLIUM</i> GEMESSENEN GEWICHTE DER OBERIRDISCHEN PFLANZEN WÄHREND DES FELDVERSUCHES.	36
ABB. 38: <i>P. CORONOPUS</i> : GEMESSENE GEWICHTE DER OBERIRDISCHEN PFLANZEN WÄHREND DES FELDVERSUCHES. DIE WACHSTUMSRATE IST ALS MITTELWERT DER LINEAREN WACHSTUMSRATEN FÜR DIE EINZELNEN MESSWERTE ANGEZEIGT.....	36
ABB. 39: GRAFISCHE DARSTELLUNG DER MESSERGEBNISSE ZU DEN EINZELNEN UNTERSUCHUNGEN VON WASSERPROBEN IN DEM FREILAND-PFLANZENREAKTOR (SIEHE TAB. 5).....	38
ABB. 40: ABSCHÄTZUNG DER LEISTUNGSFÄHIGKEIT DES PFLANZENREAKTORS ANHAND DER MIT DEM FUTTER TÄGLICH EINGEBRACHTEN STICKSTOFFMENGE UND DER ÜBER DEN BIOMASSEZUWACHS DER <i>ASTER</i> AUFGENOMMENEN STICKSTOFFMENGE. DIE MIT <i>PLANTAGO</i> BESETZTEN LYSIMETER HABEN IN DIESEM ZEITRAUM KEINE BIOMASSE MEHR PRODUZIERT UND WURDEN NICHT IN DER ABSCHÄTZUNG BERÜCKSICHTIGT. DER ANTEIL DER SUBSTRATBIOLOGIE ERGIBT SICH AUS DER DIFFERENZ DES GESAMTABBAUS UND DER DURCH DIE PFLANZENBIOMASSE (OBERIRDISCHE PFLANZENTEILE) GEBUNDENEN STICKSTOFFMENGE.	39
ABB. 41: ABSCHÄTZUNG DER LEISTUNGSFÄHIGKEIT DES PFLANZENREAKTORS ANHAND DER MIT DEM FUTTER TÄGLICH EINGEBRACHTEN PHOSPHATMENGE UND DER ÜBER DEN BIOMASSEZUWACHS DER <i>ASTER</i> AUFGENOMMENEN PHOSPHATMENGE. DIE MIT <i>PLANTAGO</i> BESETZTEN LYSIMETER HABEN IN DIESEM ZEITRAUM KEINE BIOMASSE MEHR PRODUZIERT UND WURDEN NICHT IN DER ABSCHÄTZUNG BERÜCKSICHTIGT. DER ANTEIL DER SUBSTRATBIOLOGIE ERGIBT SICH AUS DER DIFFERENZ DES GESAMTABBAUS UND DER DURCH DIE PFLANZENBIOMASSE (OBERFLÄCHLICHE PFLANZENTEILE) GEBUNDENEN PHOSPHATMENGE.....	40

TABELLENSVERZEICHNIS

TAB. 1: ZUSAMMENSTELLUNG POTENTIELLER HALOPHYTEN-ARTEN FÜR DIE NÄHRSTOFFVERWERTUNG (N, P) AUS PROZESSWASSER, IHRER BESCHAFFUNGSART UND KEIM- UND LAGERFÄHIGKEIT.....	5
TAB. 2: VERGLEICH VON MARINEN FISCHARTEN UND HALOPHYTEN IN BEZUG AUF IHRE NÄHRSTOFF- UND NACL-TOLERANZBEREICHE.	17
TAB. 3: BESCHREIBUNG DER ZENTRALEN KOMPONENTEN DES PRIMÄREN UND SEKUNDÄREN FLUID-KREISLAUFS FÜR DIE EXPERIMENTELLEN UNTERSUCHUNGEN MIT HALOPHYTEN.	22
TAB. 4: NÄHRSTOFFKONZENTRATIONEN IM ZU- UND RÜCKLAUF DER LYSIMETER IM GEWÄCHSHAUS.....	31
TAB. 5: NÄHRSTOFFKONZENTRATIONEN IM ZU- UND RÜCKLAUF DER LYSIMETER IM GEWÄCHSHAUS.....	31
TAB. 6: NÄHRSTOFFKONZENTRATIONEN IM ZULAUF UND ABLAUF VON LYSIMETER 1, DAS MIT <i>ASTER TRIPOLIUM</i> BEPFLANZT WORDEN WAR.	32
TAB. 7: FUTTERMENGE UND PROZESSWASSERZULAUF ZUM LYSIMETER 1	32
TAB. 8: NÄHRSTOFFKONZENTRATIONEN IM ZULAUF UND ABLAUF VON LYSIMETER 14, DAS MIT <i>PLANTAGO CORONOPUS</i> BEPFLANZT WORDEN WAR.....	33
TAB. 9: FUTTERMENGE UND PROZESSWASSERZULAUF ZUM LYSIMETER 14	33

1 ZUSAMMENFASSUNG

In modernen Fluiden-Kreisläufen für die landbasierte marine Aquakultur ist ein Hauptaspekt die Schonung der Ressourcen. Ein künstliches Feuchtgebiet mit Halophyten als Nutzpflanzen ist eine Möglichkeit, das Prozesswasser von partikulären Reststoffen (Exkrementen) und gelösten Nährstoffen zu befreien. Einerseits nehmen die Halophyten die Nährstoffe aus dem Prozesswasser auf und produzieren Biomasse. Andererseits fördern die Halophyten, wenn sie in ein künstliches Feuchtgebiet eingebunden sind, durch ihre Wurzelstruktur und Sauerstoffversorgung des Bodens den Stickstoffumbau durch Bakterien. Neben diesem ökologisch und ökonomisch sinnvollen Nährstoffrecycling sind Halophyten ein wertvolles Nebenprodukt. Einige Halophyten-Arten haben regional mittlerweile eine Akzeptanz für die Verwendung als Lebensmittel und andere werden traditionell genutzt. Um die Reinigungsleistung eines künstlichen Feuchtgebietes bei unterschiedlichen Salzgehalten und Nährstoffkonzentrationen im Prozesswasser zu maximieren, ist es notwendig, unterschiedliche Arten zu untersuchen und bestimmten Anwendungen zuzuordnen.



Abb. 1: Die beiden untersuchten Halophyten: *Aster tripolium* (li.) und *Plantago coronopus* (re.).

Um Halophyten in ein kreislaufgeführtes Aquakultursystem einbinden zu können, mussten zunächst Grundlagen und Parameter erarbeitet werden, die einerseits als Laborversuche an der Gottfried Wilhelm Leibniz Universität Hannover und andererseits als Feldversuch an der Hochschule für Technik und Wirtschaft des Saarlandes durchgeführt wurden. Für die wissenschaftlichen Arbeiten und letztendlich die erfolgreiche Integration eines Halophyten-Pflanzenreaktors in einen Fluid-Kreislauf für die Aquakultur von Fischen wurden zwei aufeinanderfolgende Projektphasen vorgesehen. Dieser Bericht bezieht sich auf die erste Projektphase, in der wichtige Grundlagen erarbeitet wurden. Die Ergebnisse der ersten Projektphase sind bis zur endgültigen Validierung vorläufig und werden deshalb hier nur kommentiert und nicht abschließend diskutiert.

In der Laborphase des ersten Projektabschnitts waren die Saatgutbeschaffung, Keimung und Anzuchtbedingungen Schwerpunkte der experimentellen Untersuchungen im Labor. Parallel dazu wurden Experimente in Lysimetern mit *Plantago coronopus* und *Aster tripolium* (Abb. 1) durchgeführt, die in einem Gewächshaus aufgestellt worden waren. Hier wurde vorrangig die Eignung verschiedener Lichtquellen auf das Wachstum untersucht. Ein anderer Aspekt war der Einfluss der Bewässerungszeiten auf das Wachstum. In einem weiteren Versuch wurden einige Lysimeter zur Hydrokultur umfunktioniert, um zu untersuchen, ob diese Kulturform in Hinblick auf Biomasseproduktion und Biofiltration besser geeignet ist. Hydrokulturversuchen wurde auch eingesetzt, um einen eventuellen Mangel an Mikronährstoffen im Prozesswasser festzustellen. Für erste Bilanzierungen waren die Messung von Ammonium-N, Nitrat-N, Nitrit-N, Phosphat und Eisen im Wasser sowie die Bestimmung

von Biomasse und des N- und P-Gehalt in getrocknetem Pflanzenmaterial notwendig. Die Chlorophyll-Fluoreszenz wurde als Indikator für Stress gemessen.

In den Laborversuchen wurde ein wöchentlicher Biomassezuwachs von bis zu 160 g/m² bei einer täglichen Nitrataufnahme von bis zu 900 mg/m² und einer täglichen Phosphataufnahme von bis zu 20 mg/m² pro Tag erreicht. Dazu war aufgrund der Jahreszeit mit winterlichen Licht- und Temperaturbedingungen eine Zusatzbeleuchtung mit Natriumdampflampen notwendig. Die Temperaturen wurden tagsüber auf Werte um 20°C und nachts auf Werte um 15°C gehalten. Die eingesetzten Arten, *Plantago coronopus* und *Aster tripolium* wiesen eine Salztoleranz von bis zu 1.75 % und 3 % auf. Die Zugabe von Eisen scheint in Abhängigkeit von der Art, dem Bewässerungsregime und der Zusammensetzung des Prozesswassers erforderlich zu sein.

Die Feldversuche hatten zwei wesentliche Aspekte: Es sollte ein primärer Fluid-Kreislauf aufgebaut werden, der mit seiner internen Wasseraufbereitung Prozesswasser mit einem aquakulturtypischen

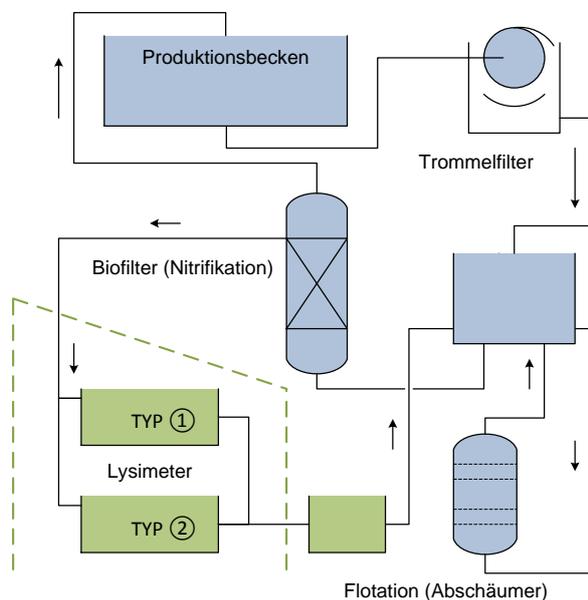


Abb. 2: Prinzipielle Komponenten des primären und sekundären Fluid-Kreislaufs für den Feldversuch.

Nährstoffmuster zu einem sekundären Kreislauf für die Nährstoffverwertung durch Halophyten liefert. Der sekundäre Kreislauf (Pflanzenreaktor) mit 14 Lysimetern als Reinigungsstufen wurde in einem Gewächshaus auf dem Außengelände der Forschungshalle Völklingen aufgebaut. Die Berechnung der Anlagenhydrodynamik und die Auslegung der Anlagenkomponenten war der erster Schritt zur Konstruktion und Aufbau der primären und sekundären Fluid-Kreisläufe. Die Berechnungen basierten auf einem Tierbesatz mit Wolfsbarschen, *Dicentrarchus labrax* und wurden frühzeitig mit der Arbeitsgruppe der LUH hinsichtlich der vorgesehenen Halophyten-Arten abgestimmt. Konstruktion der Lysimeter und die Füllung mit Drainage-, Stütz- und Pflanzsubstratschicht wurde weitgehend identisch zu den in Hannover eingesetzten Lysimetern gehalten, um gleiche Versuchsbedingungen an beiden Standorten zu erhalten.

Der primäre Fluid-Kreislauf wurde im April in Betrieb genommen und nach der Funktionsprüfung mit Wolfsbarschen besetzt. Der sekundäre Kreislauf mit den Lysimetern wurde Ende Juli fertiggestellt und im August mit *P. coronopus* und *A. tripolium* in Betrieb genommen. Die Automatisierung ist grundlegend abgeschlossen, wird aber parallel weiter vorangetrieben, um in der Endausbaustufe ein Prozessleitsystem für die Anlagenüberwachung und Anlagensteuerung in Betrieb zu nehmen.

Durch den schnellen Abschluss des Anlagenbaus, der von Mitarbeitern, Gastwissenschaftlern und Examenskandidaten unterstützt worden war, konnten schon in der ersten Projektphase Messungen unter Betriebsbedingungen durchgeführt werden. Die Erkenntnisse waren aufschlussreich und zeigten die Durchführbarkeit auf. Die ersten vorläufigen Ergebnisse zeigen, dass es insgesamt zu einer Zunahme der aquakulturtypischen Nährstoffkonzentrationen (Nitrat-N, Nitrit-N, Ammonium-N und Phosphat) im Fluid des Primärkreislaufs kam. Vorwiegend nutzbar und elementar für die Halophyten waren Nitrat sowie Phosphat. Seit Inbetriebnahme der Anlage und dem Besatz mit 800 juvenilen Wolfsbarschen (*Dicentrarchus labrax*), wurde trotz der sekundären Aufbereitung im Pflanzenreaktor

im Versuchsreaktor ein Anstieg von Nitrat von 23.4 mg/l auf 91.0 mg/l und von Phosphat von 3.1mg/l auf 7.2 mg/l im Prozesswasser gemessen. Die Nährstoffe wurden also nur teilweise von den Halophyten umgesetzt. Das Pflanzengewicht (nur oberirdische Pflanzenteile) der Strandaster (*Aster tripolium*) stieg von 22 g auf 945 g an. *Plantago coronopus* wuchs von anfänglich 2 g auf 260 g. *P. coronopus* stellte im Feldversuch bei konstant hohen Salzgehalten um 2 % das Wachstum ein. Die Ergebnisse zeigen, dass in dem Pflanzenreaktor Nährstoffe aus dem Prozesswasser umgesetzt wurden. Ein Teil der Nährstoffretention wurde auf die wachstumsbedingte Nährstofffestlegung in den Halophyten zurückgeführt. Substratgebundene Prozesse haben sowohl zum Umbau der Stickstoffverbindungen geführt (Nitrifikation) und waren wahrscheinlich auch ein sekundärer Weg zur Nährstoffelimination (Denitrifikation). Alle Ergebnisse bedürfen der Überprüfung in weiteren Untersuchungen, die sich, um eine modellmäßige Beschreibung zu ermöglichen, über mindestens einen Jahreszyklus erstrecken müssen. Ein wichtiger Erkenntniszugewinn war, dass die Funktion des primären Fluid-Kreislaufs durch die Prozesswasseraufbereitung im sekundären Fluid-Kreislauf positiv beeinflusst wurde. Zum Beispiel wurde das Wasserstoffionengleichgewicht deutlich in höhere pH-Bereiche verschoben. Die Biofiltration (Nitrifikation) wurde signifikant unterstützt.

2 EINLEITUNG

Eine sichere und nachhaltige Lebensmittelproduktion in Aquakulturen erfordert neue Methoden und Technologien. Eine Schlüsseltechnologie, die heute schon in verschiedenen Bereichen der Aquakultur eingesetzt wird, ist der Fluid-Kreislauf. Ein Fluid-Kreislauf besteht aus dem Haltungsraum (Becken) und einer Wasseraufbereitung, die das Wasser (Prozesswasser) reinigt, das heißt partikuläre (Faeces, Futterreste, Bakterienflocken) und gelöste Stoffwechselendprodukte entfernt (Stickstoffverbindungen, Phosphat, Kohlenstoffdioxid) und dem Wasser die Stoffe wieder zuführt, die während des Wachstumsprozesses verbraucht werden (Sauerstoff, Karbonat). Den Stand der Technik repräsentieren mittlerweile Anlagen (Fluid-Kreisläufe), die ohne Austausch von Prozesswasser betrieben werden. Es werden lediglich Fehlmengen, die in verschiedenen Gliedern der Prozesskette der Wasseraufbereitung entstehen, ausgeglichen. Verdunstungsverluste tragen ebenso zum Wasserverlust bei, wie die mechanische Filterung von Feststoffen. Der Wasserbedarf dieser Anlagen beträgt heute unter 1 % des Systemvolumens pro Tag. Dies ist möglich, weil die Stoffströme in verschiedenen Teilprozessen, die in einer logischen Prozesskette angeordnet sind, bearbeitet werden. Dabei werden der Quelle der verschiedenen Stoffströme, das sind die in der Haltung befindlichen Organismen, entsprechende Senken, Behandlungsschritte, für die Stoffströme gegenübergestellt. Ein zentraler Prozess der Wasseraufbereitung in einem Fluid-Kreislauf ist die Biofiltration, mit der toxische Stickstoffverbindungen (Ammoniak, Nitrit) in eine nur in sehr hohen Konzentrationen limitierende Stickstoffverbindung (Nitrat) umgebaut werden. Diesem Prozess, der Nitrifikation, folgt ein weiterer biologischer Prozess, die Denitrifikation, mit dem das Nitrat in molekularen Stickstoff umgewandelt und als Gas aus dem Prozesswasser ausgetragen wird. Mit diesem Prozess wird graduell auch Phosphat aus dem Prozesswasser ausgetragen.

Die Denitrifikation ist ein aufwendiger und teurer Prozess, der im Rahmen dieses Vorhabens durch ein neues Verfahren ersetzt wird, das durch die Produktion wertvoller Pflanzenbiomasse, die als Lebensmittel gehandelt werden kann, zu geringeren Kosten und damit zu einer besseren Wirtschaftlichkeit führt. Aufgrund des Fokus der Forschergruppe auf marine Fische und Krebstiere werden für die biologische Eliminierung von Stickstoff und Phosphat Nutzpflanzen, Halophyten, eingesetzt, die den Salzgehalt in marinen Fluid-Kreisläufen tolerieren. Halophyten sind als vermarktungsfähiges Nah-

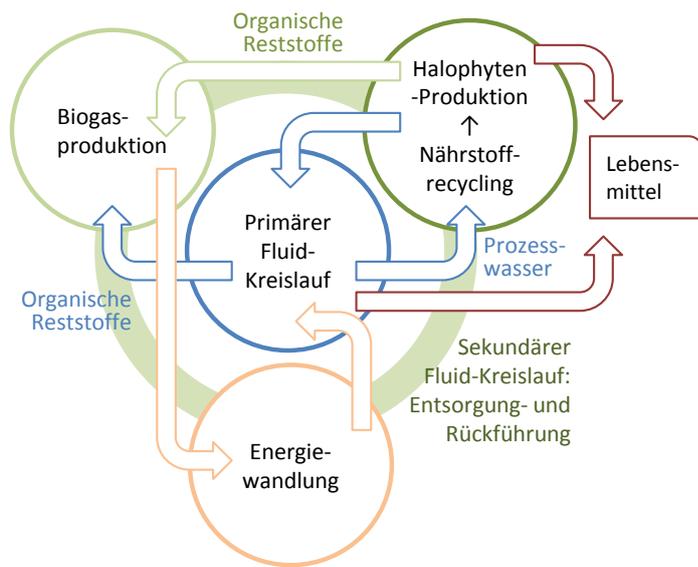


Abb. 3: Schema eines weitgehend in sich geschlossenen Fluid-Kreislaufs mit integrierter Nährstoffverwertung durch Pflanzenproduktion (Halophyten) und Energierückführung. Biogasproduktion und Energieumwandlung sind nicht Aspekte dieses Vorhabens.

Nährstoffe werden damit der Halophyten-Produktion zugeführt. Dabei ist zu berücksichtigen, dass für die Kultur der Halophyten ein durchlässiges Substrat gewählt wird, um einen zuverlässigen Abfluss des Prozesswassers zu gewährleisten. Die Humusbildung und eine damit verbundene zunehmende Sauerstoffzehrung im Porenwasser des Sedimentes kann einerseits aufgrund der Prozesswasseraufbereitung im primären Fluid-Kreislauf und andererseits durch das Lücken- bzw. Kanalsystem in einem durchlässigen Substrat ausgeschlossen werden. Es ist weiterhin zu erwarten, dass in Lücken und Kanälen mitgeführte Luftblasen zur Belüftung des Porenwassers beitragen. Damit ist sichergestellt, dass die Wasseraufnahme über das Wurzelsystem nicht durch Sauerstoffmangel behindert wird. Das nährstoffärmere Prozesswasser wird in den primären Fluid-Kreislauf zurückgeführt. Abb. 3 weist zusätzlich zwei weitere Komponenten im sekundären Fluid-Kreislauf aus. Über eine Biogasfermentation werden Reststoffe aus dem primären Fluid-Kreislauf und Reststoffe aus der Halophyten-Produktion in Biogas umgesetzt. Eine Energierückführung ist über eine Kraft-Wärmekoppelung (Energieumwandlung im BHKW) darstellbar. Diese beiden Schritte sind nicht Teil des Vorhabens und sollen in Folgevorhaben realisiert werden.

Fluide-Kreisläufe mit einem, wie oben aufgezeigt, integrierten Stoffrecycling werden in Zukunft einen Stand der Technik in der Aquakultur definieren. Neben der Umweltverträglichkeit erreichen diese Anlagen eine bessere Wirtschaftlichkeit. Die Machbarkeit des Konzepts wird in diesem Projekt untersucht. Dazu sind zwei zeitlich aufeinanderfolgende Projektphasen vorgesehen.

In der ersten Projektphase wurden von der Gottfried Wilhelm Leibniz Universität Hannover (LUH) und der Hochschule für Technik und Wirtschaft des Saarlandes (HTW) grundlegende Untersuchungen und Experimente durchgeführt, die für die zweite Projektphase notwendigen Parameter und eine erste Validierung des zugrunde liegenden Konzeptes erbringen sollten. In der ersten Projektphase wurden folgende Arbeiten ausgeführt:

rungsmittel eine vielversprechende Ergänzung zur Produktion mariner Fische oder Krebstiere in Fluid-Kreisläufen, die vergleichbar hohe Preise erzielen.

Die Abb. 3 verdeutlicht noch einmal das Gesamtkonzept. Der primäre Fluid-Kreislauf, in dem zum Beispiel Fische oder Krebstiere gezüchtet werden, kann weiter in sich geschlossen werden, wenn die partikulären organischen Reststoffe, die mittels Flächenfilter und Flotationsprozess aus dem Prozesswasser entfernt werden, einer Biogasproduktion zugeführt werden. Damit wird ein klares Prozesswasser mit geringer biologischer Aktivität (bakterielle Mineralisation → Biologischer Sauerstoffbedarf) verfügbar, das ohne weitere Vorbehandlung in die Halophyten-Produktion geleitet werden kann. Die im Prozesswasser gelösten

- Auswahl und Charakterisierung von geeignetem Pflanzenmaterial (LUH). Saatgutbeschaffung, Keimung und Anzucht der Pflanzen für die experimentellen Untersuchungen an der LUH und HTW.
- Grundlegende Untersuchungen zu den notwendigen Bedingungen für eine Integration von Halophyten in einen Seewasser Fluid-Kreislauf (LUH). Es wurden neben anderen die Grenzwerte für Salzgehalte, Temperaturen, Lichtbedingungen und Bewässerungsraten festgelegt.
- Grundlegende Auslegung eines Fluid-Kreislaufs (HTW) und seiner internen Komponenten zur Wasseraufbereitung unter Berücksichtigung einer hinreichenden Prozesswasserqualität sowohl für die primären Zuchttiere (Fische) als auch für die sekundären Organismen (Halophyten).
- Auslegung des Kultivierungsverfahrens in den Lysimetern unter besonderer Berücksichtigung der Übertragbarkeit auf die experimentellen Anlagen in Völklingen (LUH). Erprobung der Lysimeter.
- Konstruktion, Aufbau und Automatisierung des experimentellen Fluid-Kreislaufs in der Forschungshalle Völklingen (HTW). Erprobung und Besatz mit Fischen (Wolfsbarsch, *Dicentrarchus labrax*).
- Aufbau eines Gewächshauses, Konstruktion und Installation des sekundären Fluid-Kreislaufs mit den Lysimetern auf dem Außengeländer der Forschungshalle Völklingen (HTW).
- Bepflanzung der Lysimeter und Messungen zur Nährstoffaufnahme aus dem Prozesswasser des primären Kreislaufes und der Biomasseproduktion im sekundären Lysimeter-Kreislauf (HTW).

3 HAUPTTEIL

3.1 Pflanzenmaterial, Saatgut und Pflanzenanzucht

Die Saatgutbeschaffung konnte für einige Halophyten über einen kommerziellen Anbieter (Firma Jelitto, Schwarmstedt) erfolgen. Weitere Arten waren nicht oder sind nur unregelmäßig von Firmen zu beziehen. Deshalb wurden Anfang Oktober 2010 an der Nordsee (Salzwiesen bei Sehestedt: 53°26'37"N 8°17'59"O und Dangast 53°26'19"N 8°09'49"O) Fruchtstände von *Aster tripolium* und *Salicornia* ssp. gesammelt. Die Tab. 8 gibt Auskunft über die Herkunft, Lagerfähigkeit und Keimfähigkeit verschiedener Halophyten, die im Projektverlauf untersucht werden sollen. Die Auswahl der Pflanzen basiert auf Kriterien, die im Erstantrag- und ihm Folgeantrag detailliert beschrieben sind. Zwei interessante Kandidaten, *Salicornia* spp. und *Artemisia salina* haben allerdings eine schlechte Saatgut-Lagerfähigkeit, die eine kommerzielle Nutzung erschweren dürfte.

Tab. 1: Zusammenstellung potentieller Halophyten-Arten für die Nährstoffverwertung (N, P) aus Prozesswasser, ihrer Beschaffungsart und Keim- und Lagerfähigkeit.

Art	Kommerziell erhältlich	Saatgut gesammelt	Lagerfähigkeit	Keimfähigkeit
<i>Aster tripolium</i>	-	x	gut (1 Jahr)	80
<i>Plantago coronopus</i>	Samen	-	gut	100
<i>Salicornia</i> ssp.	-	x	schlecht	50
<i>Artemisia maritima</i>	Pflanzen	x	schlecht	10
<i>Crithmum maritimum</i>	Samen	-	gut	(100)
<i>Limonium vulgare</i>	Samen	x	gut	50

Eine schwierige Konstellation ergab sich zum Projektstart mit Beginn des Herbstes im September 2010 bei der Pflanzenanzucht. Die auslaufende Vegetationsperiode mit sinkenden Lufttemperaturen, abnehmender solarer Einstrahlung und vor allem kürzeren Tagen brachte erhebliche Probleme beim Pflanzenwachstum. Viele Pflanzen wuchsen trotz kontrollierter Klimakammer- und Gewächshausbedingungen schlecht, obwohl die Kulturbedingungen durch technische Einrichtungen verbessert worden waren: Von 07:00 bis 19:00 wurden die Pflanzen mit Zusatzlicht (SON-T Agro 400, Firma Philips) beleuchtet, das aber zur Reduzierung des Energieverbrauchs bei ausreichend Tageslicht (> 30 klx) automatisch ausgeschaltet wurde. Die Temperatur wurde mit einer Heizung auf mindestens 22°C gehalten.

Die Keimung und Optimierung der Keimfähigkeit waren ein wichtige Untersuchungspunkte. Die Aussaat erfolgte in unterschiedlich großen Pflanzschalen (60 x 40 cm oder 30 x 20 cm). Verschiedene Bedingungen sind untersucht worden, um ein gleichmäßiges und möglichst vollständiges Auflaufen der Keimlinge zu erzielen. Folgende Parameter haben sich als wichtig herausgestellt:

- ⇒ Ruhephase nach der Ernte der Früchte (*Aster* 4°C, 6-8 Wochen).
- ⇒ Beste Ergebnisse bei 22°C; Nutzung von Klimakammern im Sommer.
- ⇒ Keine zu hohe Temperaturen (28°C) bei der Aussaat für *Artemisia*, *Crithmum*, *Plantago* und *Salicornia*.
- ⇒ Verwendung von Einheitserde; Erde-Sand-Gemische nicht besser.
- ⇒ Anzucht auf Sand nur bei optimaler Temperatur (22°C).
- ⇒ Zugabe von Salz in Gießwasser (1% für *Artemisia*).

Für die weitere Anzucht wurden die Keimlinge für zwei bis drei Wochen auf Erde in Pflanzschalen kultiviert und anschließend in Töpfe mit einem Durchmesser von 11 cm, die mit Einheitserde gefüllt waren, pikiert. Das Bewässern erfolgt zunächst mit Leitungswasser. Eine plötzliche Umstellung der Pflanzenbewässerung von Leitungswasser auf Meerwasser hätte auch salztolerante Halophyten gestresst und eventuell zum Verlust von Blättern geführt. Bevor die Pflanzen in die Lysimeter umgesetzt werden, erfolgt deshalb eine Adaptation an die erhöhte Salzkonzentration (Aufsalzen): Im Prozesswasser (Gießwasser) wurde die Salzkonzentration mit einer Meersalzmischung der Firma Seequasal erhöht. Jeden zweiten Tag wurde der Salzgehalt um 0.5 % oder 5 psu¹ erhöht.

Es bleibt festzustellen, dass für den späteren Transfer von Pflanzen in hydroponische Kulturen oder Lysimeter eine Aussaat und Kultivierung auf Sand von Vorteil ist, da an die Wurzeln anhaftende Erde nur schwer zu entfernen ist. Bei der Anzucht in Sand ist dieses Problem nicht gegeben. In Sand ist allerdings ein Bewässern der Pflanzen mit Nährlösung während der Anzucht erforderlich, um die Keimlinge ausreichend mit Nährstoffen zu versorgen. Es wurde hier eine Hoagland-Nährlösung modifiziert nach Epstein 1972 (aus Taiz & Zeiger, 2006) verwendet. Nach 6 bis 8 Wochen konnten die Pflanzen in die Lysimeter überführt werden. Viele Pflanzenarten wachsen auf reinem Sand langsamer als auf Erde, so dass hier mit längeren Anzuchtzeiten geplant werden muss.

Bei der Anzucht von *Plantago* ergab sich ein weiterer Befund: Nach zwei bis drei Wochen war ein Umsetzen aus Sand in die hydroponische Kultur notwendig (*Plantago*), da flache Schalen mit Sand nicht ausreichend durchwurzelt und die Pflanzen deswegen nicht ausreichend mit Nährstoffen versorgt wurden. Das war deutlich an allgemeinen Mangelerscheinungen und einem Ausbleichen der Pflanzen erkennbar.

¹ psu - practical salinity unit. Die Einheit psu entspricht im Betrag der veralteten Angabe in Promille (‰).

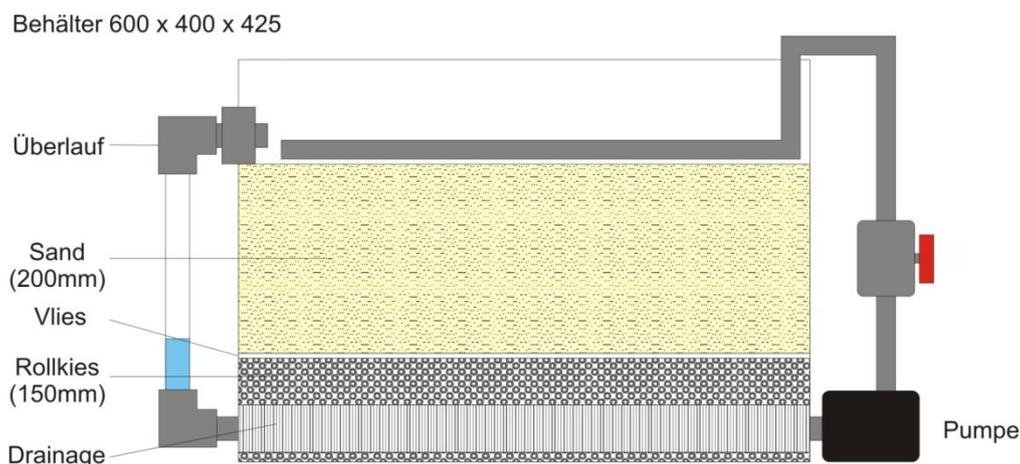


Abb. 4: Schematische Darstellung eines Lysimeters angefertigt von der Firma Sander. Füllhöhen wurden leicht modifiziert.

3.2 Konstruktion und Betrieb der Lysimeter

Bei Pflanzen kann das Verhältnis von Spross- zu Wurzelmasse deutlich zur Wurzel hin verschoben sein. Bei den verwendeten Halophyten war das offensichtlich. Daher mussten die Lysimeter ausreichend tief sein, damit sich die Wurzeln gut entwickeln und vielfach verzweigt Nährstoffe aufnehmen können. Aus statischen Gründen müssen jedoch bei tiefen Behältern die Wände entsprechend verstärkt sein, was zu deutlich höheren Kosten geführt hätte. Um ausreichend viele Lysimeter für Parallelversuche zur Verfügung zu haben, wurden Behälter mit den Maßen 600 x 400 x 425 mm (Firma Rako) verwendet (Abb. 4). An die Lysimeter-Behälter wurden eine interne Zirkulation und eine Wasserstandsanzeige montiert. Für die Entnahme von Wasserproben war eine Probenentnahmestelle mit einem Absperrhahn oberhalb der Pumpe montiert. Die Berieselung der Lysimeter erfolgte an der Substratoberfläche über gelochte PVC-Rohre. Anzahl und Durchmesser der Löcher waren auf die Leistung der Pumpen abgestimmt, sodass eine gleichmäßige Beaufschlagung der Substratoberfläche mit Wasser erreicht wurde. Über vier Taktgeber, die spritzwassergeschützt in einem Schaltkasten montiert waren, konnte die Laufzeit der Pumpen individuell eingestellt werden. Das Verschalten und die Regelung der Pumpen erfolgten durch den Hauselektriker der LUH.

Ein Lysimeter inklusive der Tankverschraubungen, des Kugelhahns, der Kreiselpumpe und weiterer Kleinteile kostete inklusive des Arbeitsaufwandes 250 EUR. Die Projektgelder reichten für den Bau von 28 Lysimetern aus (7500 EUR), sodass, um ausreichend Wiederholungen durchführen zu können, weitere 12 weitere Lysimeter aus Berufungsmitteln angeschafft werden mussten.

Jedes Lysimeter wurde vom Boden ausgehend mit 10 cm Rollkies (Korngröße 16 bis 32 mm), einer Vliesschicht, und 23 cm trockenem Sand (Korngröße 0 bis 2 mm) (Abb. 5, obere Reihe) befüllt. Anschließend wurde jedes Lysimeter mit 18 L Wasser gefüllt und der Füllstand am transparenten PVC-Rohr (Abb. 5, unten rechts) gekennzeichnet.

Ein Lysimeter hatte eine Fläche von $0,24 \text{ m}^2$. Pro Lysimeter wurden zunächst neun Pflanzen der Arten *Aster tripolium* und *Plantago coronopus* eingesetzt. Für jede Versuchsgruppe wurden drei Lysimeter eingesetzt (Abb. 2, untere Reihe), sodass sich in einer Versuchsgruppe 27 Pflanzen befanden, was einer Dichte von 38 Pflanzen pro Quadratmeter entsprach. Obwohl die Bewässerung langsam auf Salzwasser umgestellt wurde und die Pflanzen so schonend wie möglich unter Erhalt von möglichst viel Fein-Wurzelmasse aus den Töpfen in die Lysimeter transferiert worden waren, benötigten die Pflanzen einige Tage, vor allem an heißen Sommertagen, um sich an die neuen Bedingungen anzu-

passen. Typische Stresssymptome waren Ausbleichen, niedriger Turgor, Absterben der unteren Rosettenblätter.



Abb. 5: Obere Reihe: Konstruktion und Beschickung der Lysimeter mit den unterschiedlichen Substraten. Untere Reihe: Lysimeter im Betrieb in Dreiergruppen für jeweils eine statistische Versuchseinheit zusammengefasst.

Die Lysimeter wurden in einem Foliengewächshaus aufgestellt. Die Luft wurde tagsüber auf ungefähr 20°C gehalten. Wenn die Außentemperaturen es notwendig machten, wurde über einen Folien-schlauch an der Decke 20°C warme Luft in das Foliengewächshaus eingeblasen. Nachts wurde 15°C warme Luft zugeführt, um ein starkes Absinken der Temperaturen in den Lysimetern zu verhindern. Die Erwärmung der Luft im Foliengewächshaus war nur im Herbst und Winter notwendig. Im Sommer hingegen wurde die Überhitzung der Lysimeter durch Öffnen der Seitenwände und eine damit verbesserte Ventilation verhindert.

Der Wasserstand der Lysimeter wurde täglich kontrolliert. Vor allem in den Sommermonaten führte die Verdunstung über die Substratfläche und die Verluste über Transpiration zu einem Wasserverlust, der durch Auffüllen mit Süßwasser ausgeglichen wurde.

Weniger optimale Kulturbedingungen in Einzelansätzen führten zum Absterben von Blättern. Diese wurden sofort abgesammelt, damit sich keine Pilzkrankheiten verbreiteten. In den Versuchsverläufen wurde vor allem Läusebefall beobachtet, der durch Pflanzenschutzmaßnahmen gut kontrolliert werden konnte.

Nach mehreren Wochen hatten die Pflanzen den Sand, das Vlies und den Kies komplett durchwurzelt. Durch die komplette Durchdringung des Sandes waren eine Reinigung und Wiederverwendung vor allem für die mit *Aster* bepflanzten Lysimeter nach Versuchsende nicht möglich. Das zurückgebliebene organische Material, das nicht aus dem Wurzelsubstrat entfernt werden konnte, hätte zu Fäulnisprozessen im Substrat und damit zu einer Verfälschung der Ergebnisse geführt. Aus diesem Grund wurden die Lysimeter nach jedem Versuch komplett entleert, das Substrat bis auf den Kies verworfen, die Becken gereinigt und anschließend frisch befüllt. Für die Durchführung eines Versuchszyklus war die gärtnerische Unterstützung unerlässlich.

3.3 Lysimeter Versuche

3.3.1 Methoden

Die Versuche wurden so ausgelegt, dass folgende Fragestellungen in der ersten Projektphase bearbeitet werden konnten:

- ⇒ Welche Halophytenarten eignen sich für welche Salzgehalte?
- ⇒ Welche Filterleistung erbringen Halophyten? Welche Arten eignen sich besonders als Biofilter?
- ⇒ Welche Biomassen werden unter den spezifischen Bedingungen produziert?
- ⇒ Welche Bedingungen ermöglichen einen ganzjährigen Vegetationszyklus?
- ⇒ Welche Bewässerungsvolumina und –dauer sind möglich?
- ⇒ Kann allein mit Prozesswasser bewässert und gedüngt werden?
- ⇒ Verbessern zusätzliche Nährstoffe wie zum Beispiel Eisen oder Mangan das Wachstum?

Während der Versuche wurden regelmäßig Proben genommen und folgende Untersuchungen durchgeführt. Die einzelnen Arbeitsschritte sind im Folgenden dargestellt:

I. Entnahme von Wasserproben

Wasserproben wurden im Abstand von sieben Tagen genommen und durch sofortiges Einfrieren bei -70°C konserviert. In den Proben wurden später die Konzentrationen von Ammonium-Stickstoff, Nitrat-Stickstoff, Nitrit-Stickstoff und Phosphat bestimmt. Eine Lagerung und spätere chemische Analyse waren notwendig, um einen hohen Probendurchsatz bei möglichst geringem Zeitaufwand erreichen zu können. Nach intensiver Literaturrecherche wurden verschiedene Methoden für den Einsatz in Mikrotiterplatten geprüft. Durch den Einsatz von Mikrotiterplatten werden insbesondere Chemikalien und Verbrauchsmaterialien eingespart, was den Projektetat deutlich entlastete. Für die Bestimmung von Phosphat wurde die von Hernández-López und Vargas-Albores (2003)² für Mikrotiterplatten modifizierte Methode nach Murphy und Rilley (1962)³ eingesetzt. Für die Nitratbestimmung wurde die Methode nach Velge und Claeys (1985)⁴ modifiziert, da sie sich für den Einsatz in Mikrotiterplatten eignete. Dazu wurden für Konzentrationsreihen verschiedene Verhältnisse von Reagenzien- und Probenvolumina getestet, bis ein reproduzierbares Ergebnis für den Konzentrationsbereich erzielt worden war. Für die Nitritbestimmung wurde die von Hernández-López und Vargas-Albores (2003) für Mikrotiterplatten modifizierte Methode nach Strickland und Parsons (1972)⁵ angewendet. Für die Ammoniumbestimmung wurde die Methode nach DIN 38406/5 angewendet. Hier wurden die Volumen- und Konzentrationsverhältnisse von Reagenzien und Probelösung auf das geringe Probenvolumen der Mikrotiterplatte angepasst, bis über den notwendigen Konzentrationsbereich reproduzierbare Ergebnisse erzielt wurden.

II. Bestimmung von Frisch- und Trockengewicht

Die Biomasse wurde alle fünf Wochen bestimmt. Für die Berechnung der Biomasseentwicklung wurde zunächst versucht, Wurzel- und Blattmaterial getrennt zu sammeln und einzuwiegen. Das Herausziehen der Wurzel sowie die Trennung und Säuberung der Wurzel von anhaftendem Substrat haben sich jedoch, vor allem für *Aster*, als schwierig herausgestellt. Deshalb wurden im weiteren Verlauf die Pflanzen weiterhin als Ganzes geerntet, jedoch nur die oberirdischen Pflanzenteile gewogen und für die Auswertung herangezogen.

III. Vorbereitung für die C/N-, und P-Analyse im trockenen Blattmaterial alle 5 Wochen

² Hernández-López J., Vargas-Albores F. 2003: A microplate technique to quantify nutrients (NO₂⁻, NO₃⁻, NH₄⁺ and PO₄³⁻) in seawater. *Aquaculture Research* 34, 1201-1204.

³ Murphy J., Rilley J.P. 1962: A modified single solution method for the determination of phosphate in natural waters. *Analytica Chemical Acta* 27, 31-36.

⁴ Velge N., Claeys A. 1985: Rapid Spectrophotometric determination of nitrate in mineral waters with resorcinol. *Analyst* 110, 313-314.

⁵ Strickland J.D. & Parsons T.R. 1972: *A Practical Handbook of Seawater Analysis*, 2nd edn. Fisheries Research Board, Canada.

Zur Bestimmung der Nährstoffassimilation der Halophyten wurden Kohlenstoff/Stickstoff- und Phosphormessungen im getrockneten Blattmaterial durchgeführt. Das Probenmaterial wurde in Hannover gewogen und getrocknet und nach Bremerhaven an das IMARE geschickt, das die C/N/P Analysen ausführte.

IV. Messung der Chlorophyllfluoreszenz

Chlorophyllfluoreszenzmessungen wurden mit einem Junior-PAM (Pulse amplitude modulation) Fluorimeter der Firma Walz an dunkeladaptierten Blättern durchgeführt. Der Quotient aus F_v/F_m ist ein Indikator für Stress. Die Elektronentransportrate spiegelt die Photosyntheseleistung wieder.

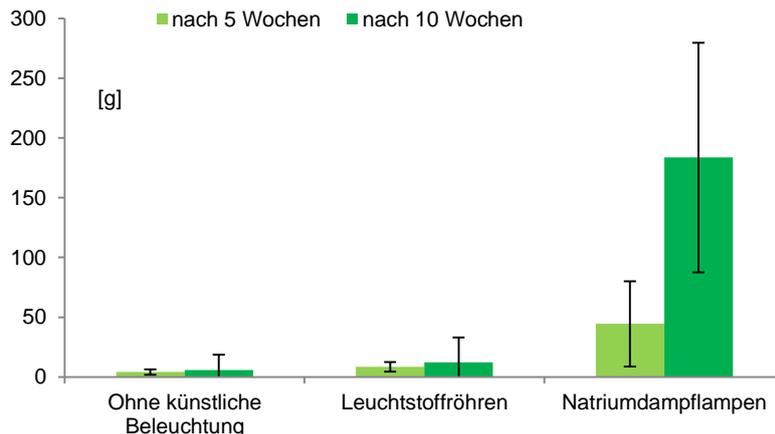


Abb. 6: *Aster tripolium*: Biomassezuwachs einzelner Pflanzen unter den verschiedenen Beleuchtungsregimen.

Wöchentlich wurden die Pflanzen auf Blütenbildung hin überprüft und der Beginn der Blütenbildung der entsprechenden Pflanzen protokolliert. Außerdem wurden wöchentlich neu gebildete Knospen abgeschnitten und gewogen, um die Wachstumsperiode zu verlängern, das Verhalten der Knospenbildung im Falle eines Abschneidens der Knospen zu beobachten und die Knospenmasse mit in die Gesamtbiomasse einbeziehen zu können.

VI. Messung von Leitfähigkeit und pH-Wert

Es wurden regelmäßig die Leitfähigkeit und der pH-Wert des Prozesswassers in den Lysimetern mit gemessen.

3.3.2 Versuchsdurchführung und Ergebnisse

3.3.2.1 Lysimeter-Betrieb bei unterschiedlicher Beleuchtung

Ziel des ersten Versuches war es, geeignete Beleuchtungsbedingungen für eine Pflanzenanzucht im Winter (Dezember 2010) zu finden. Für die Versuche wurden je drei Lysimeter mit *Aster* und mit *Plantago* bepflanzt. Eine dritte Lysimeter-Gruppe wurde nur mit Substrat gefüllt und diente als Kontrolle. Die Lysimetern wurden mit einer Nährlösung nach Hoagland mit 8 mM Nitrat und 0.5 mM Phosphat sowie 1.5% künstlichem Meersalz (15 psu) befüllt (Leitfähigkeit: 47.5 mS cm⁻¹ bei 20°C).

Drei unterschiedliche Versuchsbedingungen wurden gegeneinander getestet. Dazu wurden die Lysimeter durch dunkle Folien voneinander getrennt, um einen Streulichteinfall zu verhindern. Folgende drei Lichtregime wurden für fünf und zehn Wochen getestet:

- Tageslicht ohne zusätzliche künstliche Beleuchtung: Durchschnittliche Lichtintensität 15 cm über dem Substrat: Sonniger Tag: 180 μmol s⁻¹ m⁻² PAR, bedeckter Tag: 40 μmol s⁻¹ m⁻² PAR.
- Tageslicht und zusätzlich Beleuchtung mit Leuchtstoffröhren: Durchschnittliche Lichtintensität 15 cm über dem Substrat: Sonniger Tag: 140 μmol s⁻¹ m⁻² PAR, bedeckter Tag: 40 μmol s⁻¹ m⁻² PAR.

IV. Feststellung des Blütezeitpunkt

Wöchentlich wurden die Pflanzen auf Blütenbildung hin überprüft und der Beginn der Blütenbildung der entsprechenden Pflanzen protokolliert. Außerdem wurden wöchentlich neu gebildete Knospen abgeschnitten und gewogen, um die Wachstumsperiode zu verlängern, das Verhalten der Knospenbildung im Falle eines Abschneidens der Knospen zu beobachten und die Knospenmasse mit in die Gesamtbiomasse einbeziehen zu können.

- Tageslicht und zusätzlich Beleuchtung mit Natriumdampflampen: Durchschnittliche Lichtintensität 15 cm über dem Substrat: Sonniger Tag: $120 \mu\text{mol s}^{-1} \text{m}^{-2}$ PAR, bedeckter Tag: $80 \mu\text{mol s}^{-1} \text{m}^{-2}$ PAR.

Die Ergebnisse zeigen deutlich den Einfluss einer zusätzlichen Beleuchtung im Dezember 2010 bei winterlicher solarer Einstrahlung (Abb. 6). Der größte Biomassezuwachs wurde bei einer zusätzlichen Beleuchtung mit Natriumdampflampen gemessen. Im Vergleich dazu war ein Biomassezuwachs unter den beiden anderen Beleuchtungsregimen kaum messbar. Ein interessanter Befund war, dass der Biomassezuwachs der Pflanzen in zehn Versuchswochen (130 g) deutlich größer war als der innerhalb der ersten fünf Versuchswochen (45 g). Es kann vermutet werden, dass erst im Verlauf des zweiten Versuchsabschnitts eine vollständige Adaptation der Pflanzen an das Beleuchtungsregime erfolgt war. Unabhängig von dem Beleuchtungsregime blieb das Verhältnis von Trocken- zu Nassgewicht in allen Versuchsgruppen konstant.

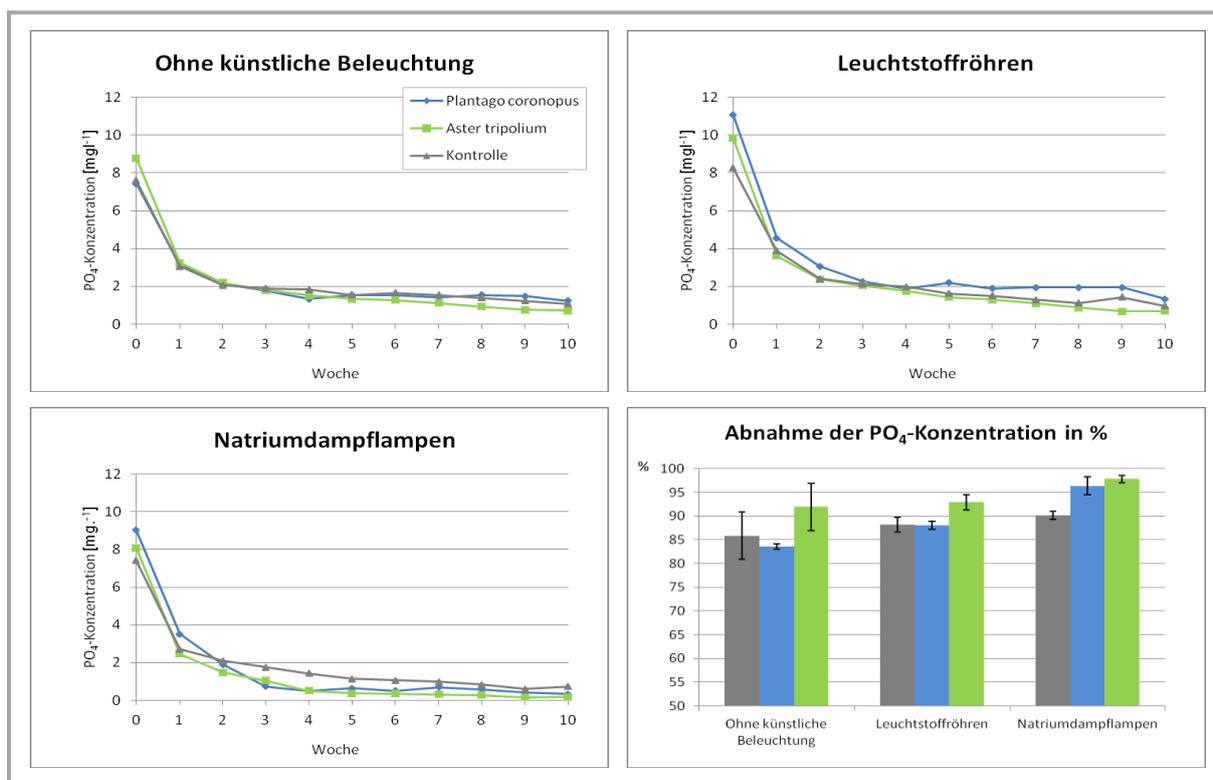


Abb. 7: Abnahme der Phosphatkonzentration im Prozesswasser der Lysimeter über 10 Versuchswochen unter verschiedenen Beleuchtungsregimen.

Die Messungen der Phosphatkonzentration in den Lysimetern deuteten in allen Experimenten auf eine starke Aufnahme von Phosphat in den ersten drei Versuchswochen hin. Die Konzentrationen sanken von 8 – 12 mg l⁻¹ auf Werte um 2 mg l⁻¹ ab. Hier ist hauptsächlich eine Immobilisierung durch die Bildung von Phosphat-Verbindungen im Sediment als eine Senke anzunehmen (Abb. 7). Die Kontroll-Lysimeter zeigen ebenso wie die bepflanzen Lysimeter eine starke Phosphatabnahme. Es können aber auch pflanzenphysiologischen Prozesse, wie z.B. die unmittelbare Umsetzung in ATP oder die Speicherung in organischen Molekülen⁶, angenommen werden. Nach der anfänglich sehr starken Abnahme der Phosphatkonzentration sinken die Phosphatkonzentrationen allmählich ab und schienen dem Wachstum der Pflanzen nachzufolgen. Die stärkste Abnahme wurde bei *Aster* beobachtet

⁶ Frank A. Loewus, Pushpalatha P.N. Murthy, 2000: myo-Inositol metabolism in plants. Plant Science 150:1–19

bzw. bei Beleuchtung der Lysimeter mit Natriumdampflampen, die die besten Wachstumsergebnisse brachten (Abb. 6).

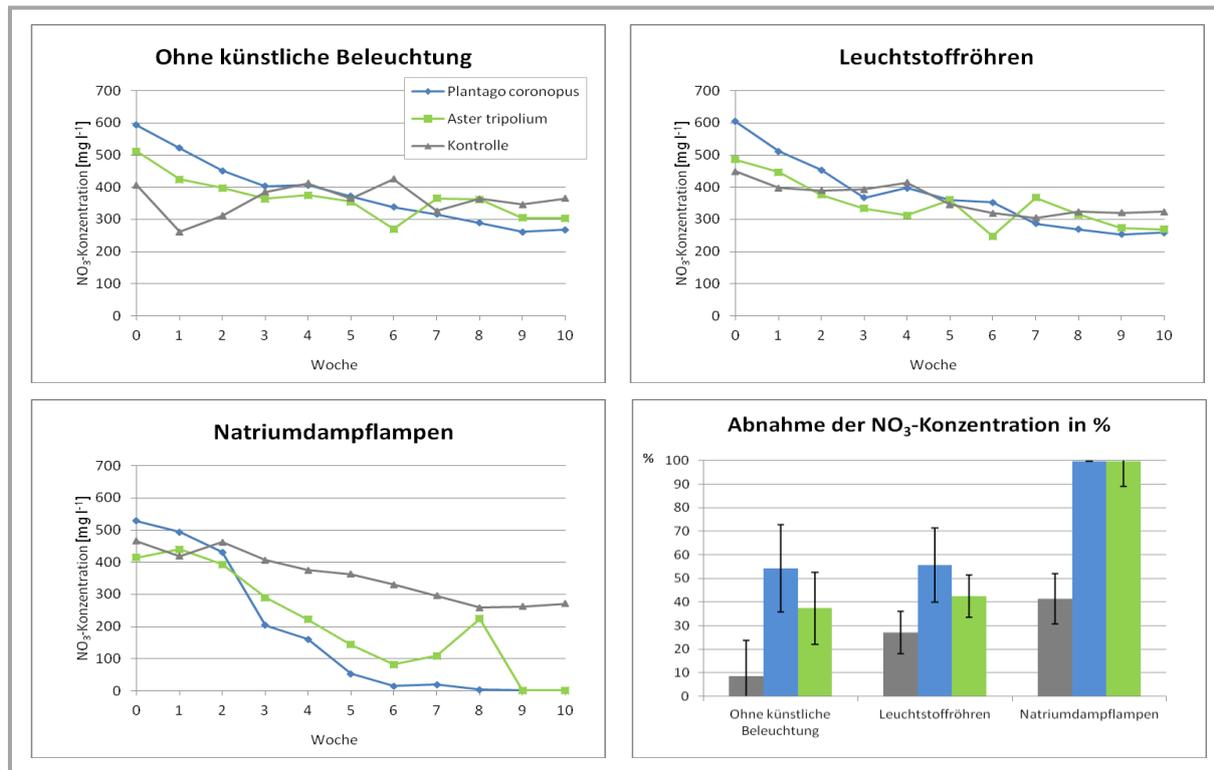


Abb. 8: Nitratkonzentration im Prozesswasser der Lysimeter über 10 Versuchswochen unter verschiedenen Beleuchtungsregimen.

Die Nitratkonzentrationen in den Lysimetern spiegeln deutlich die Wachstumsleistungen der Halophyten unter den verschiedenen Lichtregimen wider (Abb. 8). Die Abnahme der Nitratkonzentrationen in den Kontroll-Lysimetern weist auf Denitrifikationsprozesse hin, die in anaeroben Zonen des Pflanzsubstrates abgelaufen sind. Dabei ist auffällig, dass die Denitrifikation in den beleuchteten im Vergleich zu den unbeleuchteten Lysimetern kontinuierlicher war. Hier könnte die Aufheizung des Sediments durch die Leuchtmittel eine Rolle gespielt haben, die einen signifikanten Wärmestrom in das Sediment bedingten. Die Beleuchtung der Lysimeter mit Natriumdampflampen führte zu einer rapiden Abnahme des Nitratpools, wobei *Plantago* spp. schneller das Nitrat aufnahm als *Aster tripolium*. Der Anstieg von Nitrat im *Aster*-Lysimeter (Woche 8, Abb. 8) entzieht sich einer nachweislichen Erklärung.

Die Ammonium/Ammoniakkonzentration war über den gesamten Versuchszeitraum im Vergleich zu den tolerierbaren Konzentrationen in Fischzuchten hoch (Abb. 9). Es wurden anfängliche Werte von über 5 mg l⁻¹ gemessen, die sich nicht aus der Zusammensetzung der verwendeten Nährlösung nach Hoagland ableiten lässt. Die Zugabe von Stickstoff erfolgte als Nitrat. Es ist zu vermuten, dass der Abbau organischer Substanz ursächlich für die hohe Ammoniumkonzentration war. Bei Beleuchtung mit Natriumdampflampen verblieb über den gesamten Versuchszeitraum die Ammonium/Ammoniakkonzentration auf diesem Niveau. In Lysimetern, die bezüglich des Lichtes weniger gut versorgt wurden, traten nach vier Wochen deutlich ansteigende Ammonium/Ammoniakkonzentrationen auf, die bei Lysimetern ohne zusätzliche Beleuchtung bis zum Versuchsende gemessen wurden. In den Lysimetern, die mit Leuchtstoffröhren zusätzlich beleuchtet wurden, wurden erhöhte Ammonium/Ammoniakkonzentrationen während der Versuchswochen 4 bis 6 gemessen (Abb. 9). Die stark

ansteigenden Ammonium/Ammoniakkonzentrationen könnten ein Hinweis auf mikrobiellen Abbau von abgestorbenem organischen Material sein, wobei nicht auszuschließen ist, dass die limitierende Beleuchtungsintensität, die zu geringe Lichtmenge, auch zum Verlust von Wurzelmasse führte, die mikrobiell abgebaut wurde. In jedem Fall waren die Ammoniumkonzentrationen während des Versuchs auch im fischtoxischen Bereich. Die in sich geschlossene Wasserführung in den Lysimetern führte zu Effekten, die im Betrieb als Reinigungsstufe für Prozesswasser aus Aquakulturen nicht zu tolerieren wären.

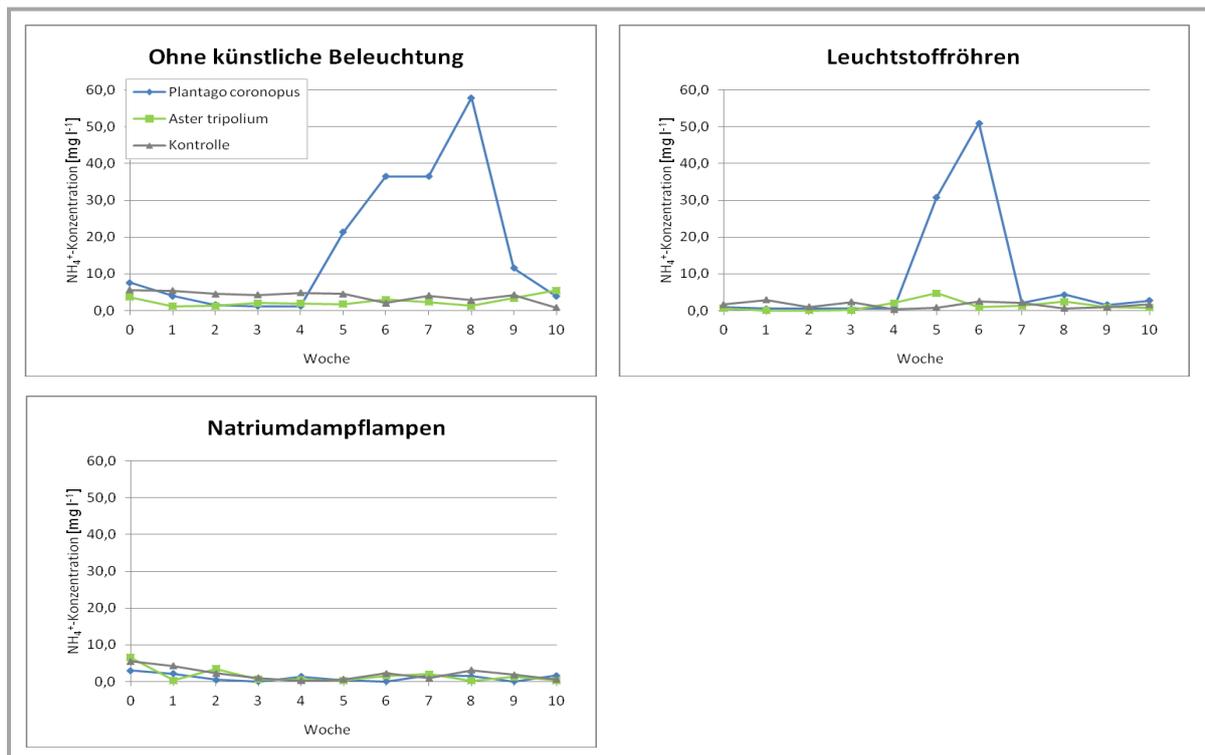


Abb. 9: Ammonium/Ammoniakkonzentration im Prozesswasser der Lysimeter über 10 Versuchswochen unter verschiedenen Beleuchtungsregimen.

Die Nitritkonzentration in den Lysimetern war zu Beginn der Experimente niedrig (Abb. 10). Die Konzentrationen lagen im Betrag deutlich unter den gemessenen Ammonium/Ammoniakkonzentrationen, sodass vermutet werden kann, dass die Nitrifikation kein signifikanter Prozess im Pflanzsubstrat war. Ebenso wie die Ammonium/Ammoniakkonzentration nahmen die Nitritkonzentrationen in den nur gering beleuchteten Lysimetern zum Ende des Versuchszeitraumes deutlich zu. Ein gedämpfter Anstieg war auch in den mit Natriumdampflampen beleuchteten Lysimetern zu messen (Abb. 10), was vermuten lässt, dass auch eine unvollständige Denitrifikation, eventuell bedingt durch ein nicht ausreichendes Angebot an organischem Substrat, zu der Erhöhung der Nitritkonzentration beigetragen haben könnte.

Die Stickstoff- und Phosphatgehalte in den Pflanzen wurden vom IMARE, Bremerhaven, analysiert. Sowohl der Stickstoff- als auch der Phosphatgehalt (ermittelter Phosphorgehalt in μg Phosphat pro mg Trockengewicht umgerechnet) im getrockneten Pflanzenmaterial waren zu Versuchsbeginn höher als bei Versuchsende (Abb. 11). Die Versuchsgruppen, die mit zusätzlicher Beleuchtung mit Natriumdampflampen versorgt wurden, zeigten den stärksten Frischmassezuwachs und gleichzeitig waren der Stickstoff- und Phosphorgehalt im getrockneten Pflanzenmaterial am niedrigsten. Bei starkem

Biomassezuwachs nahm der Anteil von Stickstoff und Phosphor in der Pflanze ab, ohne dass Mangelerscheinungen beobachtet wurden.

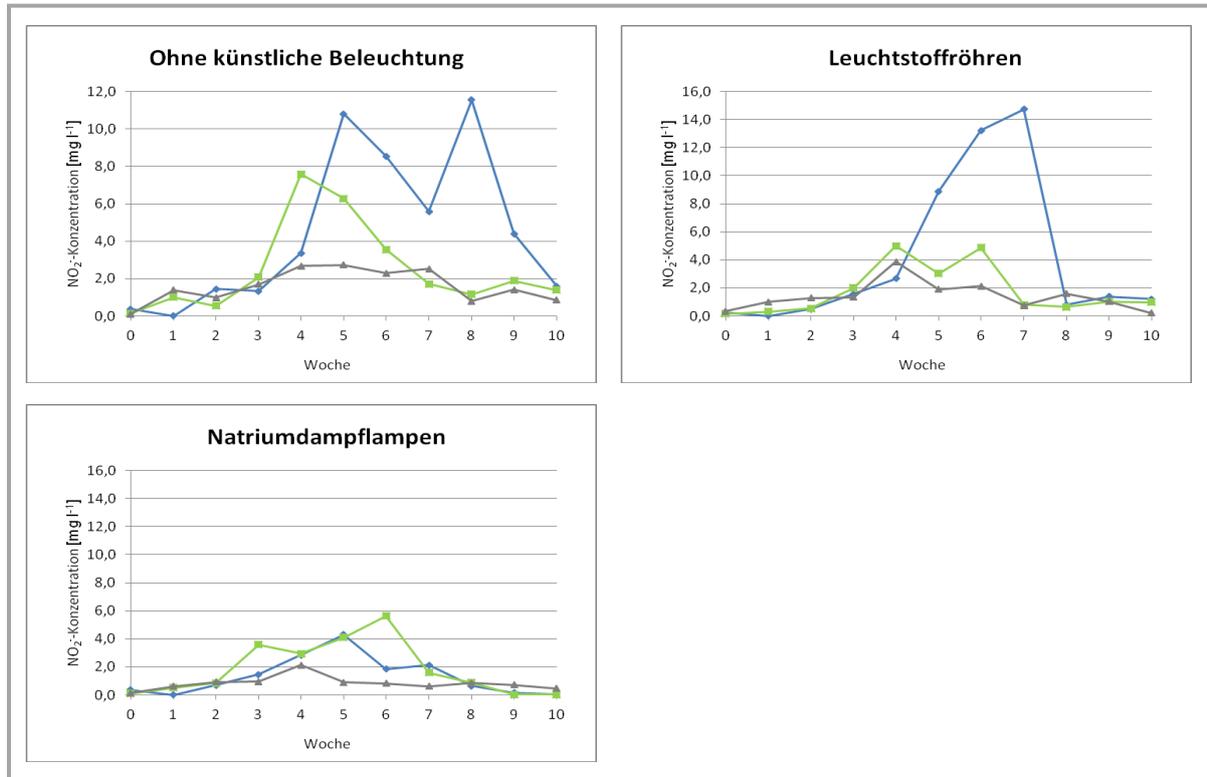


Abb. 10: Nitritkonzentration im Prozesswasser der Lysimeter über 10 Versuchswochen unter verschiedenen Beleuchtungsregimen.

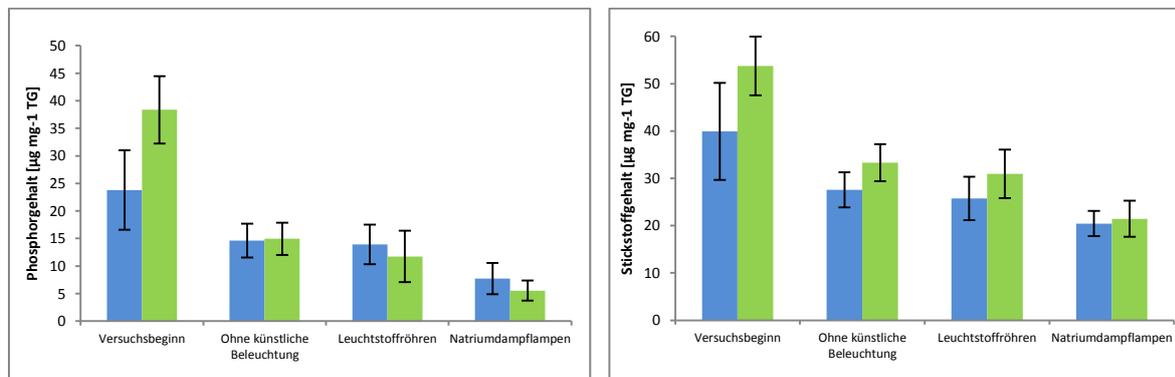


Abb. 11: Stickstoff- und Phosphorgehalt im getrockneten Pflanzenmaterial zu Versuchsbeginn und zu Versuchsende für alle drei Versuchsgruppen mit unterschiedlicher Beleuchtung.

3.3.2.2 Lysimeterbetrieb mit unterschiedlich langen Bewässerungszeiten

Die Lysimeter waren bislang mit kontinuierlicher Umwälzung des Prozesswassers betrieben worden, was der natürlichen Umweltsituation nicht entspricht. Daher wurde eine „Ebbe-Flut“-Situation durch unterschiedlich lange Laufzeiten der Zirkulationspumpen simuliert. Bei Stillstand der Zirkulationspumpen sammelte sich das Wasser am Boden der Lysimeter, sodass die Wurzelschicht nicht mehr mit Wasser beaufschlagt wurde. Es zeigte sich, dass für *Plantago* ein halbtägiger Wechsel zwischen Wasserfluss und Stillstand optimale Wachstumsergebnisse ergab (Abb. 12). Für die Aster wurde fest-

gestellt, dass kurze aufeinanderfolgende Bewässerungsimpulse während des Tages und nächtliche Stagnation das beste Wachstum ergaben.

Darüber hinaus wurde festgestellt, dass die Abnahme der Phosphatkonzentration im Wasser bei *Plantago* am stärksten bei längeren Pumpenlaufzeiten ausgeprägt war. Im Gegensatz dazu war die Ausprägung bei der *Aster* am stärksten bei kurzen Pumpenlaufzeiten. Diese Ergebnisse zeigen eine Parallelität zum Wachstum (Abb. 12). Die Abnahme der Nitratkonzentration war bei allen getesteten Pumpenlaufzeiten vergleichbar. Diese Versuche werden im weiteren Projektverlauf noch einmal durchgeführt, da im Versuchsverlauf Probleme mit der Beleuchtung aufgetreten waren.

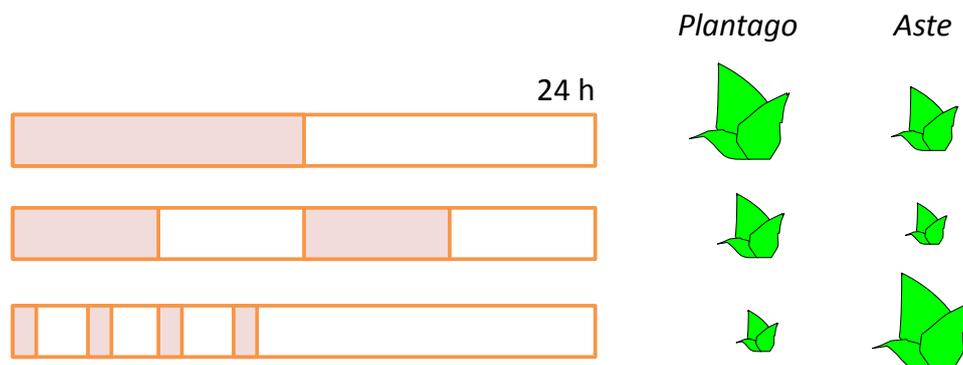


Abb. 12: Zusammenfassung der Ergebnisse der Versuche „Ebbe-Flut“-Situation. Die schraffierten Flächen stellen die Pumpenlaufzeiten dar, die unterschiedliche Größe der Pflanzenschemata den Biomassezuwachs. Mit folgenden Laufzeiten der Zirkulationspumpen wurde innerhalb eines Tages bewässert: 12 h Laufzeit, 2 x 6 h Laufzeit und 4 x 1 h Laufzeit am Tag, nachts ohne Bewässerung

3.3.2.3 Vergleich unterschiedlicher Bewässerungslösungen

Für die Bewässerung kann Prozesswasser an verschiedenen Stellen eines Fluid-Kreislaufes entnommen werden (Abb. 13). Je nach Entnahmestelle ist das Prozesswasser mehr oder weniger mit partikulären Stoffen belastet. Die Feststofffilter 1 und 2 klarieren das aus dem Produktionstank abfließende

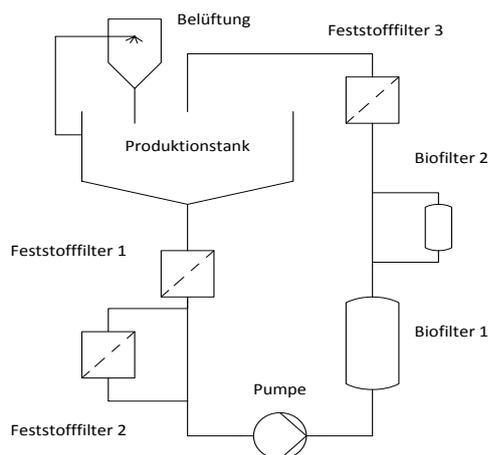


Abb. 13: Schema eines Fluid-Kreislaufs für die Aquakultur von marinen Fischen und Krebstieren, der ein Recycling ermöglicht.

Prozesswasser, das in guter Näherung als partikelfrei angesehen werden kann. Ebenso ist partikelfreies Prozesswasser nach dem Feststofffilter 3 zu erhalten, das zusätzlich aufgrund der vorangegangenen Nitrifikation im Biofilter 1 (Abb. 13) ammonium/ammoniak- und nitritarm ist. Die mit den Feststofffiltern separierte partikuläre Substanz kann einer Biovergasung zugeführt werden, aus der nach Fermentation die nährstoffreiche Restsubstanz als Dünger verwendet werden kann.

Es stellte sich die Frage, ob die unmittelbare Nutzung der in der Partikelfracht enthaltenen Nährstoffe in Lysimeterkulturen möglich ist. In diesem Fall würde das Prozesswasser vor den Feststofffiltern 1 und 2 entnommen werden (Abb. 13). Um verschiedene Strategien zu untersuchen, wurde das Wachstum der Pflanzen in Prozesswasser (1), in mit Schlamm versetztem Prozesswasser (2) und einer Nährlösung (3) untersucht. Im Vergleich zur Nährlösung traten sowohl unter Bedingung 1 (Prozesswasser) als auch in Bedingung 2 (mit Schlamm versetztes Prozesswasser) bei den Pflanzen Man-

gestellt, dass kurze aufeinanderfolgende Bewässerungsimpulse während des Tages und nächtliche Stagnation das beste Wachstum ergaben.

gellerscheinung in dem geschlossenen Wassersystem auf, die jedoch bei der Umsetzung in ein rezirkulierendes System an der HTW (siehe unten) nicht mehr auftraten.

3.3.2.4 Vergleich unterschiedlicher Kultivierungsmethoden

Wie sich gezeigt hatte, war der Betrieb der Lysimeter mit Substrat nicht unproblematisch. Die Wurzelmasse durchzog innerhalb kürzester Zeit das gesamte Sandsubstrat, sodass nach einer Kultivierungsmethode das Substrat wahrscheinlich gewechselt werden muss. Aus diesem Grund wurde versuchsweise auch die hydroponische Kultur untersucht. Für die Untersuchungen wurde in Weiterführung der unter 3.3.2.3 beschriebenen Versuche folgende Nährmedien benutzt:

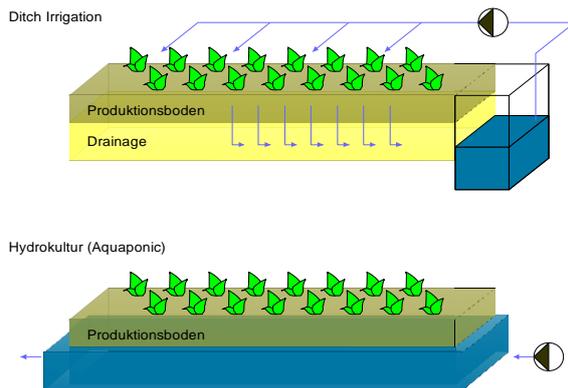


Abb. 14: Schematische Darstellung der Kultursysteme zur Kultivierung von Halophyten. Oben: Lysimeter, unten: Hydrokultur.

(1) Hoagland Nährlösung, Meersalzmischung 3%, Zugabe von Nitrat ($\approx 1.4 \text{ mM}$) und Phosphat ($\approx 0.2 \text{ mM}$).

(2) Nährlösung mit Zusatz von partikulären Reststoffen aus einem Fluid-Kreislauf für Fische.

(3) Prozesswasser aus einem Fluid-Kreislauf ohne zusätzliche Zumengung von partikulären Reststoffen, Nitrat-N: 20 mg l^{-1} , Phosphat: 20 mg l^{-1} , Ammonium-N: $0.3\text{-}0.5 \text{ mg l}^{-1}$, Nitrit-N: $0.1\text{-}0.3 \text{ mg l}^{-1}$, Salzgehalt 3% entsprechend 30 psu.

Die beiden verwendeten Kultursysteme sind in

Abb. 14 dargestellt. In diesem Vorhaben wurde die hydroponische Kultur nur für *Plantago* untersucht, da diese Kulturform für die Aster bereits etabliert ist. Die Etablierung eines hydroponischen Kultursystems für *Plantago* verlief erfolgreich (Abb. 15). Diese Form der Pflanzenkultivierung bietet viele Vorteile und sollte in einer Pilotanlage skaliert werden.



Abb. 15: Hydroponischen Kultur von *Plantago*. Die Pflanzen werden in Löcher in Styroporplatten gesetzt. Von links nach rechts: Nährlösung; Prozesswasser; Wurzelwachstum; Vergleich Wurzelwachstum: links Sand, rechte Hydrokultur.

Die Vorteile sind:

- Leicht kontrollierbarer Wasserkörper.
- Vergleichsweise einfache Bestimmung der Nährstoffkonzentrationen.

- Gute Verfügbarkeit von Nährstoffen. Phosphat wird nicht im Substrat festgelegt.
- Kulturbecken sind leicht zu reinigen (weniger Algenwachstum).
- Einfache, saubere und hygienische Ernte des Pflanzenmaterials.

3.3.2.5 Bestimmung der Salztoleranz von *Plantago* in hydroponischer Kultur

Aus der Literatur ist bekannt, dass *Plantago coronopus* nur Salzgehalte bis 1.5% verträgt (Koyro, 2005). Zur Zucht mariner Fischarten sind jedoch höhere Salzkonzentrationen erforderlich (Tab. 2), die eben nicht von allen Halophyten toleriert werden können. Deshalb wurde die Salztoleranz von Halophyten unter den typischen Bedingungen und Salzgehalten in der marinen Aquakultur getestet.

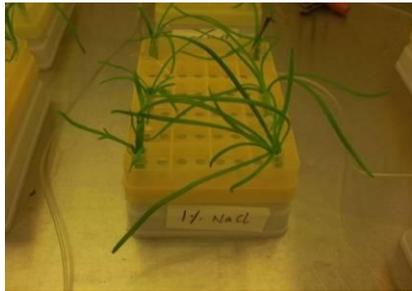


Abb. 16: Pipettenbox-Kultur von *Plantago* zur Untersuchung seiner Salzgehaltstoleranz.

Drei Wochen alte *Plantago*-Pflanzen wurden in hydroponische Kulturen in kleinem Maßstab (Pipettenboxen, 300 ml) (Abb. 16) in Hoagland-Nährlösung transferiert und dann jeweils für zwei Wochen schrittweise in höheren Meersalzkonzentrationen (0, 0.5, 1, 1.5, 1.75, 2, 2.25, 2.5, 2.75, 3%) in einer Klimakammer unter konstanten Bedingungen kultiviert. Das Kulturmedium wurde zweimal pro Woche ausgetauscht. Die Kulturen wurden mit Kleinkompressoren (Aquariumzubehör) belüftet. Die Kulturen wurden täglich 12 h beleuchtet ($35 \mu\text{mol s}^{-1} \text{m}^{-2}$). Die Versuchstemperatur betrug 22°C.

Anhand des Biomassezuwachses, der Blattverluste sowie der PAM-Messungen ließ sich in diesem Versuch eindeutig eine Obergrenze von 1.75% Meersalz für die Kultur von *Plantago* festlegen. Sollte Prozesswasser mit höheren Konzentrationen verwendet werden, muss dieses verdünnt oder andere Pflanzenarten eingesetzt werden. Tab. 2 stellt die Ergebnisse eigener Versuche den Anforderungen typischer mariner Fischarten für die Aquakultur gegenüber. In vielen Fällen kann *Plantago* eingesetzt werden. Bei strikt marinen Fischen ist die *Aster* auszuwählen.

Tab. 2: Vergleich von marinen Fischarten und Halophyten in Bezug auf ihre Nährstoff- und NaCl-Toleranzbereiche.

Art	Nitrat N [mg l^{-1}]	Phosphat [mg l^{-1}]	NaCl [%]
<i>Seriola lalandi</i> (Gelbschwanzmakrele)	30	20	3.0
<i>Dicentrarchus labrax</i> (Wolfsbarsch)	50	20	1.5
<i>Sparus aurata</i> (Dorade)	50	20	1.5
<i>Ascipenser spec.</i> (Stör)	30	20	1.5
<i>Plantago coronopus</i> (Krähenfuß-Wegerich)	kein Mangel	kein Mangel	bis 1.75
<i>Aster tripolium</i> (Strand-Aster)	kein Mangel	kein Mangel	bis 3.5

3.3.2.6 Untersuchungen zu möglichem Eisenmangel

Drei Wochen alte *Plantago*-Pflanzen wurden in hydroponische Kulturen (Pipettenboxen, 300 ml) in verschiedenen Nährlösungen für jeweils drei Wochen kultiviert und PAM-Messungen durchgeführt. Zweimal in der Woche wurde das Kulturmedium ausgetauscht. Am Ende des Versuches erfolgten die Biomasse- und Eisenbestimmungen in den Pflanzenproben.

- I Hoagland-Nährlösung ohne Eisen, 1.5% Meersalz
- II Hoagland-Nährlösung, halbe Eisenmenge, 1.5% Meersalz,
- III Hoagland-Nährlösung, vorgesehene Eisenmenge, 1.5% Meersalz
- IV Künstliches Meerwasser, plus Hoagland-Nährlösung ohne Eisen
- V Künstliches Meerwasser, plus Hoagland-Nährlösung, halbe Eisenmenge,
- VI Künstliches Meerwasser, plus Hoagland-Nährlösung, vorgesehene Eisenmenge

VII Prozesswasser

VIII Prozesswasser, halbe Eisenmenge (wie Hoagland),

IX Prozesswasser, vorgesehene Eisenmenge (wie Hoagland)

Die Biomassezunahme und der Eisengehalt in getrocknetem Pflanzenmaterial zeigen für die Ansätze in künstlichem Meerwasser, dass der Eisengehalt im Blattmaterial mit höherem Eisengehalt in der Lösung zunimmt. Die Pflanzen wuchsen besser bei einer Zugabe der halben Eisenmenge im Vergleich zu künstlichem Meerwasser ohne Eisenzugabe. Das Wachstum konnte durch die Zugabe der vollen Eisenmenge jedoch nicht weiter gesteigert werden. Die anderen Versuchsansätze lieferten keine eindeutigen Ergebnisse, was darauf zurückzuführen ist, dass die Pflanzen beim Einpflanzen in die hydroponische Kultur zu jung waren, was bei den Pflanzen zu Stress (dies zeigen auch die PAM-Ergebnisse) und bei vielen zum Absterben geführt hat. Der Versuch wird wiederholt.

3.4 Laufende Laborversuche

3.4.1 Wiederholung des Bewässerungszeiten Versuchs

Der Versuch zum Einfluss unterschiedlich langer Bewässerungszeiten auf das Pflanzenwachstum wird zurzeit wiederholt, da der Versuch beim ersten Mal aufgrund von technischen Problemen vorzeitig abgebrochen werden musste. Die geplante Versuchslaufzeit beträgt acht Wochen. Zu den Versuchsbedingungen und Pflanzenarten siehe Kapitel 3.3.2.2.

3.4.2 Biofilterleistung und Biomasseproduktion in der Hydrokultur

Das in einem vorangegangenen Versuch (siehe 3.3.2.4) entwickelte Hydrokultursystem wird über einen Zeitraum von acht Wochen auf die Biofilterleistung und Biomassebildung darin eingesetzter Pflanzen hin untersucht (Abb. 17, Abb. 18). Es wird mit *Plantago coronopus* und *Aster tripolium* gearbeitet und der Biomassezuwachs, Stickstoff- und Phosphatgehalt im getrockneten Pflanzenmaterial, sowie die Nitrat- und Phosphataufnahme und die Bildung von Nitrit und Ammonium im Wasser ermittelt.



Abb. 17: Hydrokultur mit *P. coronopus*



Abb. 18: Hydrokultur mit *A. tripolium*

3.4.3 Langzeitversuch mit *Aster tripolium* und *Plantago coronopus*

Um eine sinnvolle Aussaat und ein Erntesystem für die verschiedenen Halophytenarten zu entwickeln, ist es notwendig auszuprobieren, wie lange es möglich ist die Pflanzen in den Lysimetern wachsen zu lassen. Bei den Versuchspflanzen wird wöchentlich abgestorbenes Pflanzenmaterial abgesammelt, um Faulen zu verhindern. Wöchentlich werden die ab einem bestimmten Zeitpunkt auftretenden Knospen abgeschnitten, um den Wachstumszyklus der Pflanzen zu verlängern. Der Biomassezuwachs, die Nitrat- und Phosphatabnahme im Wasser, das Auftreten von Nitrit und Ammoni-

um im Wasser und Stickstoff- und Phosphatgehalt werden im getrockneten Pflanzenmaterial dokumentiert. In regelmäßigen Abständen werden kontrolliert Nährstoffe zugefügt, um einen Nährstoffmangel, der bei monatelangem Wachstum in einer unveränderten Nährlösung entstehen würde, zu verhindern.

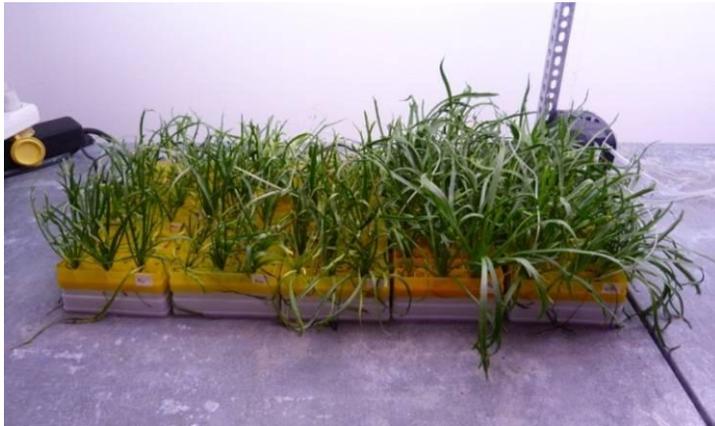


Abb. 19: Hydrokulturen von *P. coronopus* mit unterschiedlichen Eisenzugaben.

3.4.4 Wiederholung des Versuchs zur Bestimmung von möglichem Eisenmangel

Der Versuch wie unter 3.3.2.6 beschrieben wird mit denselben Versuchsansätzen wiederholt, um einen möglicherweise in Prozesswasser für die Pflanzen eintretenden Eisenmangel zu untersuchen. Da beim letzten Versuch, aufgrund von durch die Versuchsbedingungen gestressten Pflanzen, kein eindeutiges Ergebnis erzielt werden konnte, wird diesmal mit älteren *Plantago*-Pflanzen gearbeitet (5 Wochen), die langsam an die Versuchsbedingungen (Hydrokultur, Salzgehalt von 1.5%) gewöhnt wurden. Die Pflanzen wurden zunächst eine halbe Woche in den Hydrokulturboxen ohne weitere Behandlung gezogen und danach wurde die Nährlösung über eine Woche hinweg in Etappen auf einen Salzgehalt von 1,5% hochgesetzt. Erst dann begann der eigentliche Versuch. Die Pflanzen zeigen schon jetzt sichtbare Wachstumsunterschiede zwischen den Versuchsansätzen (Abb. 19).

Die Pflanzen zeigen schon jetzt sichtbare Wachstumsunterschiede zwischen den Versuchsansätzen (Abb. 19).

3.5 Bilanzierung der Laborversuche

	<i>Plantago coronopus</i>	<i>Aster tripolium</i>
Salzgehalt	1.75%	3.0%
Filterleistung	NO ₃ ⁻ : ~900 mg m ⁻² pro Tag PO ₄ ³⁻ : ~20 mg m ⁻² pro Tag	NO ₃ ⁻ : ~250 mg m ⁻² pro Tag PO ₄ ³⁻ : ~15 mg m ⁻² pro Tag
Biomassezuwachs (Frischmasse)	bis zu 140 g m ⁻² pro Woche	bis zu 160 g m ⁻² pro Woche
Bedingungen für Wachstum im Winter	Gewächshaus, Natriumdampflampen 20°C tagsüber, 15°C nachts	
Bewässerungsdauer:	12h	4x1h
Zusätzliche Nährstoffzugabe	voraussichtlich Eisen und Mangan	

3.6 Aufbau des Feldversuches

3.6.1 Technische Auslegung und Aufbau

Die Kreislaufanlage in Völklingen gliedert sich in einen primären und in einen sekundären Kreislauf (Abb. 1 und 2). Im primären Kreislauf werden die Fische gehalten. Der primäre Kreislauf hat die Aufgabe, aquakulturtypische Nährstoffflüsse für den Betrieb des Halophyten-Reaktors (Lysimeter) als

sekundären Kreislauf aufzubauen. Das Prozesswasser aus dem primären Kreislauf wird zum sekundären Kreislauf geführt und in den sekundären Komponenten, den Lysimetern, aufbereitet und dem Primärkreislauf wieder zugeleitet (Abb. 20).

Der Aufbau des Feldversuches wurde durch die Mitarbeiter im Projekt in enger Zusammenarbeit mit dem Institut für Physikalische Prozesstechnik der HTW durchgeführt. Dadurch war es möglich, den

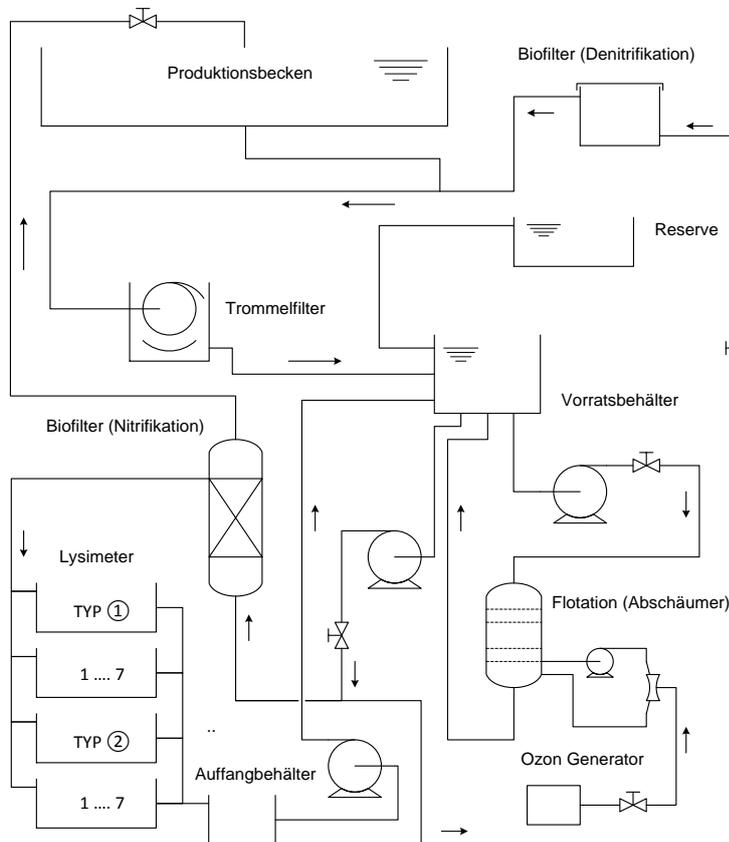


Abb. 20: Schematischer Aufbau des Feldversuches mit primärem und sekundärem Fluid-Kreislauf. Der primäre Kreislauf ist mit Fischen besetzt und stellt die Nährstoffquelle dar. Der sekundäre Kreislauf mit Halophyten ist die Nährstoffsенke.

primären und sekundären Kreislauf mit den notwendigen Basiskomponenten auszustatten und weitgehend zu automatisieren. Das Lastenheft, der erste Schritt bei der Erstellung der experimentellen Anlagen hatte in dieser Zusammenarbeit strategische Bedeutung. Es war Grundlage für die Beschaffung der Komponenten und für die Definition der Pflichten, die teilweise durch Studierende der HTW als Examensarbeiten durchgeführt wurden. Weitere Unterstützung erhielt das Projekt durch die Mitarbeit von Herr Fulvio Mafucci, einem Gastwissenschaftler der Biologischen Station Anton Dohrn in Neapel. Für die Beschaffung der Komponenten wurden in großem Umfang Mittel über parallel laufende Projekte (ARTESS, EnAlgae) eingesetzt.

Der Aufbau und die Automatisierung des Fluid-Kreislaufs sind in Abb. 20 dargestellt. Die Komponenten des Fluid-Kreislaufs sind in Tab. 3 zusammengestellt und grundlegend

beschrieben. Der Fluid-Kreislauf besteht aus einem Produktionsbecken, welches mit der Prozesswasseraufbereitung verbunden ist. Der Einlauf für das aufbereitete Prozesswasser ist an der Wasseroberfläche montiert, der Auslauf ist zentral am Beckenboden eingebaut.

Zusätzlich gibt es ein in der Beckenwand montiertes Überlaufrohr (Skimmer), das über eine Leitung direkt mit dem Vorratsbehälter verbunden ist. Im Normalbetrieb fließt das Wasser durch die Abflussleitung am Beckenboden in den Trommelfilter. Die Höhe des Einlaufs am Trommelfilter bestimmt den Wasserpegel im Fischbecken. Nach der ersten mechanischen Filtration im Trommelfilter, die der Abscheidung größerer Partikel dient ($> 40 \mu\text{m}$), wird das Prozesswasser zu einem Vorratsbehälter geführt. Aus dem Vorratsbehälter wird das Prozesswasser mittels einer Pumpe dem Abschäumer zur Feinfiltration zugeführt, wo es zusätzlich mit Ozon behandelt wird. Die Dosierung von Ozon, welches vor Ort in einem Ozongenerator hergestellt wird, erfolgt mittels der Messung des Redox-Potentials.

Die Hauptförderpumpe fördert das physikalisch/chemisch aufbereitete Prozesswasser zum aeroben, nitrifizierenden Biofilter, von wo es frei über ein Strahlrohr zurück in den Fischtank fällt. Im Fischtank

wird damit eine zirkuläre Grundströmung angeregt. Im Fischtank wird zusätzlich mittels eines Lufthebers Wasser am Boden angesaugt, belüftet und mit einem Strahlrohr an der Oberfläche zur Strömungsinduktion abgeleitet.

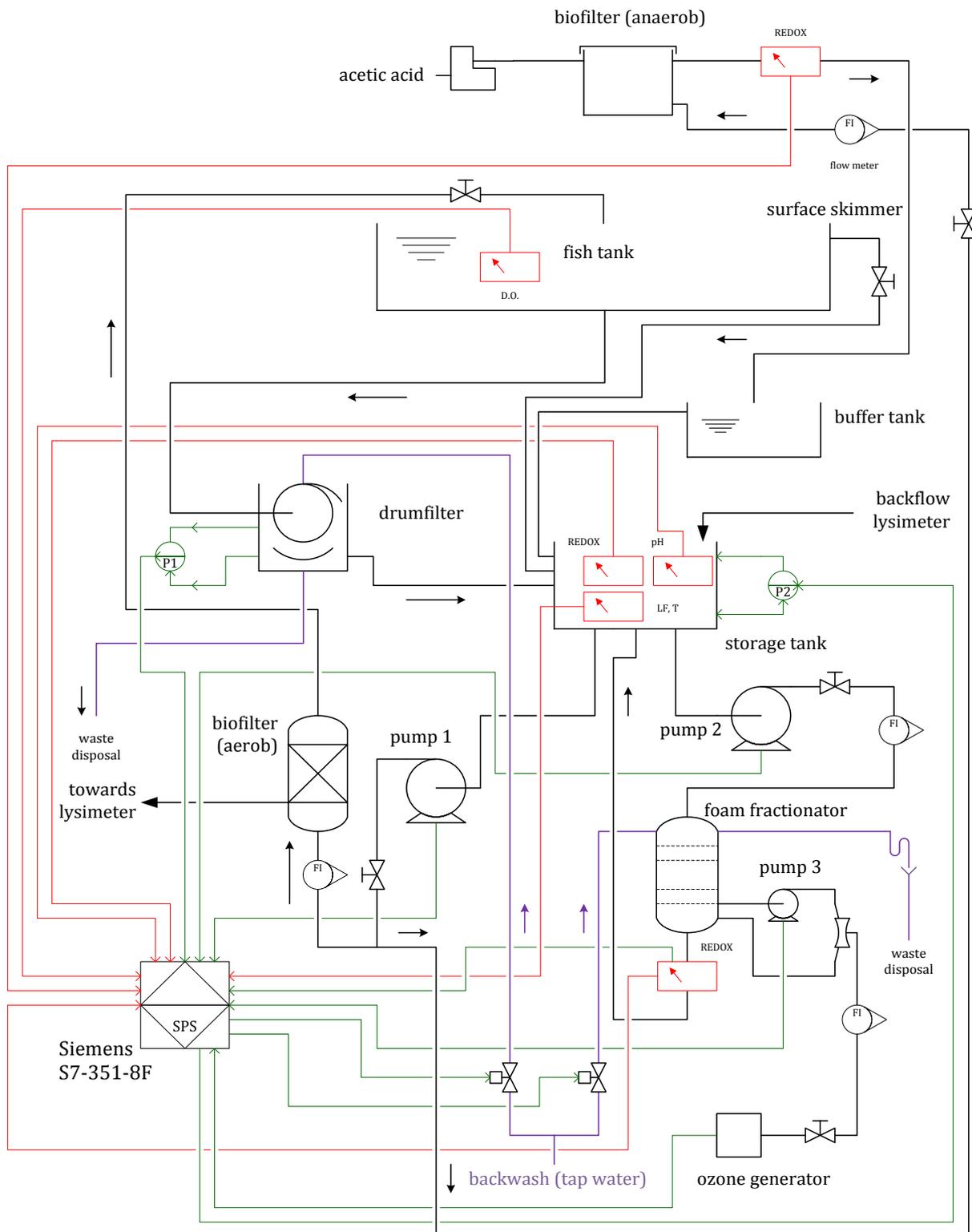


Abb. 21: Schematischer Aufbau und des Fluid-Kreislaufs für die experimentellen Untersuchungen mit Halo-phyten. Leitungen schwarz: wasserführend, Leitungen rot: analoge Signale, Leitungen grün: digitale Signale, Leitungen violett: Stadtwasser, Abwasser.

Der Trommelfilter und der Abschäumer werden beim momentanen Stand der Ausrüstung noch mit Stadtwasser rückgespült, um die aus dem Prozesswasser entfernten Partikel abzutransportieren. Die



Abb. 22: Blick auf zwei technisch identischen Fluid-Kreisläufe in der Forschungshalle Völklingen (HTW). Links: Fluid-Kreislauf vom Landmark-Projekt. Rechts: Fluid-Kreislauf der Halophyten-Anlage. Während der Automatisierungsphase war zunächst immer nur ein Fluid-Kreislauf besetzt, während der unbesetzte Fluid-Kreislauf für die Funktionsprüfungen und Stresstests verwendet wurde.

Druckpumpen für eine Erweiterung der Anlagen sind vor Ort, können aber aufgrund noch fehlender Komponenten nicht angeschlossen werden. Es bestehen Kontakte zu Unternehmen, die an einer Zusammenarbeit interessiert sind. Der Trommelfilter wird zeitlich kontrolliert und in Abhängigkeit vom Pegelstand gespült, die Spülung des Abschäumers erfolgt zeitgesteuert. Im Haupttank sowie im Vorratsbehälter sind Sonden für die Messung des pH-Werts, des Redox-Potentials, der Leitfähigkeit und der Konzentration von gelöstem Sauerstoff eingebaut. Die Wassertemperatur wird als sekundäre Messgröße der Leitfähigkeitssonde erfasst. Die analogen Messwerte werden über Analog/Digitalwandler an die

speicherprogrammierbare Steuerung (SPS) übergeben. Die SPS nimmt zusätzlich die binären Signale der Pegelsonden im Trommelfilter sowie im Vorratsbehälter auf. Im Nebenstrom ist zusätzlich ein Denitrifikationsfilter eingebaut, der mit Essigsäure als organisches Substrat betrieben werden kann. Die Dosierung der Essigsäure kann in Abhängigkeit vom im Auslauf gemessenen Redox-Potentials über die SPS erfolgen. Die Regulation des pH-Wertes im Prozesswasser erfolgt zurzeit mittels Kalziumhydroxid-Dosierung (Kalkmilch). Sinkt der pH-Wert aufgrund der Kohlenstoffdioxidausscheidung der Fische unterhalb des festgelegten Wertes von $\text{pH}_{\text{soll}} \geq 7.4$, wird Kalkmilch über eine Schlauchpumpe zudosiert.

Tab. 3: Beschreibung der zentralen Komponenten des primären und sekundären Fluid-Kreislaufs für die experimentellen Untersuchungen mit Halophyten.

Bezeichnung	Beschreibung
Fischbecken	Das Fischbecken ist aus GFK gefertigt und hat die Dimensionen (LxBxH) von 5.07 x 2.02 x 0.7 m (7.1 m ³). Die Ecken sind abgerundet. In der Mitte am Boden befindet sich ein zentraler Wasserablauf, der mit einem Standrohr verbunden ist, so dass der Wasserstand innerhalb des Fischbeckens eingestellt werden kann.
Trommelfilter	HYDROTEC Trommelfilter mit Kunststoff-Filtergaze. Das Prozesswasser wird druckfrei filtriert. Die Reinigung der Filtergaze erfolgt durch Rückspülung der Filtergaze mittels eines Düsensystems bei drehender Trommel. Die Schlämme werden in einer Spülrinne aufgefangen und können gezielt entsorgt werden.

Bezeichnung	Beschreibung
	<p>Hersteller: Hydrotec Typ: HDF501-1P in GRP Wasserfluss typisch: 7.2 m³/h bei 25 mg/l suspended solids. Wasserfluss maximal: 15 m³/h Filterporengröße: 40 µm Elektrischer Anschluss: 3x380-415V, 50Hz</p>
Vorratsbehälter	<p>Der Vorratsbehälter ist aus GFK gefertigt und hat die Dimensionen (LxBxH) von 1.79 x 0.68 x 0.5 m (0.61 m³). Der Wasserstand im Behälter wird durch eine Pegelsonde (1/0) über die SPS überwacht und bei Niedrigstand die an den Vorratsbehälter angeschlossenen Pumpen ausgeschaltet.</p>
Puffertank	<p>Der Puffertank nimmt bei Anlagenstillstand das Restwasservolumen auf, das nicht im Sammelbehälter gespeichert werden kann. Er hat die Dimensionen (LxBxH) von 1.15 x 0.96 x 0.66 m (0.73 m³).</p>
Pumpe 1	<p>Kreiselpumpe aus Kunststoff, Fabrikat BADU 44/4. Maximale Fördermenge 21 m³ bei 2.2 m Förderhöhe (gemessene Fördermenge).</p>
Abschäumer	<p>Der Abschäumer dient der Entfernung (Filterung) feiner partikulärer Substanz. Die grundlegende Funktionsweise ist die Aufbereitung des Wassers im Gegenstrom mit einem Luft/Ozon-Gemisch. Die Zufuhr des Luft/Ozongemisches erfolgt durch einen Venturi Injektor. Durch die Luft/Ozon-Zugabe entsteht an der atmosphärischen Grenzfläche aus oberflächenaktiven Substanzen Schaum, an dem Partikel anhaften. Das Filtersubstrat sind also Luft bzw. Ozonblasen mit einer organischen Grenzflächenmembran zwischen Luft/Gasraum und Fluid (Prozesswasser). Die Abfuhr des Schaums und der Partikel erfolgt über einen Schaumauffangbehälter nach Übertritt des wasserhaltigen Schaums an der Oberkante eines Schaumsammelrohrs. Der Prozesswasser-Auslauf erfolgt druckfrei.</p> <p>Hersteller: Erwin Sander Elektroapparatebau GmbH Typ: Helgoland 500 Nennhöhe HN 2000 mm Wasserdurchsatz 11 m³/h Verweilzeit 1.5 min Eingesaugte Luftmenge 5 m³/h Wasserinhalt 270 l</p>
Ozon-Generator	<p>Ozon-Generator: Ozon wird durch den sogenannten Corona-Effekt erzeugt. Luft oder Sauerstoff wird zwischen zwei Elektroden geführt. Elektrische Entladungen erzeugen das Ozon aus den Sauerstoffmolekülen. Das Ozon wird dem Abschäumer zugeführt. Die Menge des zugeführten Ozons kann durch die Messung des REDOX-Potentials im Prozesswasser geregelt werden, da die Zuführung von Ozon das REDOX-Potential im Wasser anhebt. Als Regelalgorithmus kann eine nicht-lineare Regressionsgleichung, die den Zusammenhang zwischen der Ozonkonzent-</p>

Bezeichnung	Beschreibung
	<p>ration und dem REDOX-Potential beschreibt, verwendet werden. Hersteller: Erwin Sander Elektroapparatebau GmbH Typ: Multizon 5</p>
Pumpe 2	<p>Kreiselpumpe aus Kunststoff, Fabrikat BADU 21/40 53. Maximale Fördermenge 21 m³/h bei 2 m Förderhöhe (Herstellerangabe).</p>
Biofilter (aerob)	<p>Der Biofilter dient der Entgiftung des Prozesswassers. Giftiges Ammoniak, das Hauptexkretionsprodukt von aquatischen Organismen, wird in Nitrat umgesetzt. Der Biofilter ist ein umschlossener Reaktionsraum, in dem ein Trägermaterial (Füllkörper) mit einem spezifischen Gewicht nahe dem des Prozesswassers als Aufwuchsfläche für Bakterien bewegt wird. Die Bakterien wandeln den in das Wasser exkretierten Ammoniumstickstoff in Nitratstickstoff um, der in erster Näherung als nicht toxisch angenommen werden kann. Die Bewegung der Biokörper erfolgt mittels eines Luftstroms (Luftblasen) aus einer Düse am Boden des Biofilters. Der Biofilter ist aus PE/PP gefertigt und verschweißt. Es werden Füllkörper der Fa Kaldness verwendet.</p> <p>Abmessungen: Durchmesser 0.7 m Gesamthöhe 2.5 m Auslaufhöhe 2.2 m Volumen 0.85 m³</p>
Biofilter (anaerob)	<p>Der anaerobe Biofilter dient der Entfernung des Nitratstickstoffs (Denitrifikation). Konstruktiv ist die Denitrifikation als Festbettfilter ausgeführt und wird im Nebenstrom zum aeroben Biofilter mit einem geringen Prozesswasserfluss betrieben. Als Kohlenstoffquelle wird Essigsäure in den Zulauf dosiert, die einerseits den mikrobiellen Abbau des im Wasser gelösten Sauerstoffs fördert, andererseits ist sie die Kohlenstoffquelle für die Denitrifikanten (Bakterien). Während des Experimentes sichert die Denitrifikation die Stickstoffentfernung, wenn nicht ausreichend Stickstoff in den Lysimetern festgelegt werden kann.</p>
Lysimeter	<p>Die sekundäre Komponente im System, die Lysimeter, dienen der biologischen Prozesswasserreinigung durch die integrierte Kultur von Halophyten (salztolerante Pflanzen). Die Halophyten werden in den Lysimetern mit an die jeweilige Art angepasstem Pflanzsubstrat und einer darunter liegenden Drainageschicht kultiviert. Die Lysimeter sind aus Kunststoff gefertigt und haben die Dimensionen (LxBxH) 900 x 360 x 360 bzw. 800 x 600 x 425 mm. Die Bewässerung der Halophyten erfolgt mittels Prozesswasser aus dem primären Kreislauf. Die Wasseraufbereitung in den Lysimetern geschieht durch ein Zusammenwirken von Bodenmaterial (mechanische Reinigung), durch das Aufnehmen, Umwandeln oder Abbauen der Wasserinhaltsstoffe durch Bakterien, durch die Nährstoffaufnahme im Rahmen des Pflanzenwachses (biologische Reinigung), durch die Anlagerung von Stoffen an Bodenpartikel (physikalische Reinigung) sowie durch Fällungsreaktionen zwischen den Wurzeln (chemische Reinigung).</p>

Ausgehend von den im Projekt verfügbaren Investitionsmitteln, war der Fluid-Kreislauf so ausgelegt und gerechnet worden, dass das für die Experimente benötigte Prozesswasser in ausreichender Menge mit dem notwendigen Nährstoffgehalt konditioniert werden konnte. Die dabei unveränderbare feste Größe war das Volumen des Haltungstanks mit den folgenden Dimensionen (L * B * T):

$$Volumen_{\text{Haltungstank}} = 5.05 \text{ m} * 2.02 \text{ m} * 0.7 \text{ m} = 7.14 \text{ m}^3$$

Ausgehend von einer maximalen Besatzdichte von $50 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$ und einem angestrebten Endgewicht (typisches Vermarktungsgewicht) nach einem Jahr von 350 g ergab sich die maximal mögliche Individuenzahl von:

$$Individuenzahl_{\text{maximal}} = \frac{7.1 \text{ m}^3 * 50 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}}{0.35 \text{ kg}} = 1014$$

Zum Zeitpunkt des Aufbaus der Anlage waren juvenile Wolfsbarsche (*D. labrax*) mit einem Gewicht von im Mittel 6 g in ausreichender Anzahl bei einer französischen Brutanstalt verfügbar. Diese wurden, da der primäre Fluid-Kreislauf für dieses Projekt noch nicht betriebsbereit automatisiert war, in einen identischen zweiten Fluid-Kreislauf eingesetzt, der bereits funktionsfähig aufgebaut und im Rahmen des ARTESS Projektes der Hochschule für Technik und Wirtschaft des Saarlandes weitgehend automatisiert worden war. Berechnungen ergaben, dass alle 2000 Tiere zunächst in diesen einen Fluid-Kreislauf eingesetzt werden konnten. Es errechnete sich für den Erstbesatz in diesem Fluid-Kreislauf eine anfängliche Biomasse von: $Biomasse_{\text{Anfang}} = 2000 * 6 \text{ g} = 12000 \text{ g} = 12 \text{ kg}$.



Abb. 23: Blick in den Haltungstank mit 2000 juvenilen Wolfsbarschen. Besatzdichte 1.7 kg/m^3 .

Es resultiert eine anfängliche Besatzdichte von:

$$Besatzdichte_{\text{Anfang}} = \frac{12 \text{ kg}}{7.14 \text{ m}^3} = 1.68 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$$

die als äußerst gering anzusehen ist, aber den Vorteil bot, dass der Fluid-Kreislauf langsam auf die endgültige Last hochgefahren werden konnte. Damit waren keine Probleme bei der Ausbildung der biologischen Aktivität des Biofilters (Nitrifikation) zu erwarten. Bei zu hohen anfänglichen Besatzdichten kann es zu Problemen mit der Wasseraufbereitung kommen, da die beiden Schritte der Nitrifikation nicht rechtzeitig ausreichend ausgebildet werden. Der Endbesatz des Fluid-Kreislaufs muss deutlich unter 1000 Fischen bei einem Individualgewicht von 350 g

bleiben, um die Biofilterkapazität (maximal 90 – 100 m² aktive Filteroberfläche) nicht zu überschreiten. Es wurde angenommen, dass maximal 900 g Futter pro Tag verarbeitet werden können.

Im Juli 2011 erfolgte der Erstbesatz des Fluid-Kreislaufs der Halophyten-Anlage. Ungefähr 800 Tiere wurden aus einem schon operativen Fluid-Kreislauf in die Halophyten-Anlage umgesetzt. Die Tiere hatten zu diesem Zeitpunkt ein Gewicht von im Mittel 20 g. Die erste experimentelle Phase in Völklingen lief von Anfang Mai bis Mitte Oktober 2011. In dieser Zeit sollte das Wachstum der Halophyten unter dem wechselnden Licht- und Temperatur-Regime bestimmen werden und parallel dazu die biologische Filterleistung der einzelnen Lysimeter näher untersucht werden. Um die Last (Nährstoffstrom) auf einem mittleren Niveau zu halten, damit eine Erhöhung bzw. Verringerung im Verlauf des Experimentes möglich blieb, wurde die tägliche Wachstumsrate vom Wolfsbarsch (IRGR, Instantaneous Relative Growth Rate) auf 0.01 festgesetzt. Die Nahrungsverwertung (FCR, Feed Conversion Ra-

tio) wurde mit 2.0 etwas höher im Vergleich zu Literaturdaten und eigenen Ergebnissen aus Vorarbeiten angenommen.

Der Pflanzenreaktor (= Summe aller Lysimeter) bestand aus 14 Lysimetern, die analog zu den von der LUH verwendeten Lysimetern aufgebaut worden waren (Abb. 4). Die Lysimeter wurden in einem Gewächshaus (nutzbare Bodenfläche 12 qm) auf dem Gelände der Forschungshalle Völklingen aufgestellt und in einem sekundären Kreislauf (Abb. 20) mit Prozesswasser aus dem primären Kreislauf betrieben. Das Gewächshaus ist über ein Bodenrohr mit der Forschungshalle verbunden, so dass alle Arten von Anschlüssen, elektrisch, pneumatisch oder hydraulisch, von und zu dem Pflanzenreaktor geführt werden konnten. Die Bauausführung erfolgte durch ein Bauunternehmen aus Völklingen, PBS Bau, das über den beauftragbaren Umfang (Projektmittel) die notwendige Bodenbefestigung mit Verbundsteinen unentgeltlich herstellte. In der momentanen



Abb. 24: Aufstellung der Lysimeter im Gewächshaus. Im Vordergrund die Prozesswasserzufuhr mit Durchflussmesser und der Rücklauf über den Pumpensumpf.

Ausrüstung der Anlage wird der Bodenentleerungshahn des Biofilters für die Zuleitung des Prozesswassers zum Pflanzenreaktor benutzt. Der Biofilter ist quasi wie ein Hochbehälter der Bewässerung der Lysimeter mit Tropfdüsen vorgeschaltet. Damit ist der Druck auf der zuführenden Leitung konstant. Mittlerweile wird mittels einer Kreispumpe der Leitungsdruck erhöht, um das notwendige Prozesswasservolumen zu den Lysimetern zu befördern. Das Prozesswasser tritt frei aus den Bodenabläufen der Lysimeter aus und wird in einem Pumpensumpf gesammelt. Mittels eines Schwimmerschalters wird der Pumpensumpf in Abhängigkeit vom Füllstand leergepumpt. Das zurückgepumpte Prozesswasser wird in den Vorratsbehälter unmittelbar am Zulauf zur Flotation eingemischt und in der Flotation (Abschäumer) klariert und mit Ozon behandelt, bevor das von Nährstoffen befreite Prozesswasser in den Fischtank geleitet wird.

Insgesamt waren 14 Lysimeter für die sekundäre Prozesswasseraufbereitung angeschlossen. Es wurden zwei unterschiedlich große Lysimeter-Typen verwendet. Typ A war aus PE/PP gefertigt und hat die Dimensionen (L*B*H) 900 x 360 x 360 mm. Typ B war etwas tiefer mit den Maßen (L*B*H) 800 x 600 x 425 mm. Jedes Lysimeter wurde mit 15 cm Kies (Korngröße 16-32 mm) befüllt. Es folgte eine Vlieschicht und als Pflanzsubstrat eine Schicht aus 18 cm trockenem Sand (Korngröße 0-2 mm). Der Bodenablauf war so konstruiert, dass gezielt Wasserproben für die Nährstoffanalyse genommen werden konnten.

- Das Typ A Lysimeter hatte eine Fläche von 0,324 m² (Volumen 0,117 m³). Insgesamt standen von diesem Typ sechs Lysimeter zur Verfügung, so dass die Gesamtfläche 1,944 m² betrug. Pro Lysimeter waren 18 Pflanzen der Art *Plantago coronopus* eingesetzt worden.
- Der Typ B hatte eine Fläche von 0,480 m² (Volumen 0,204 m³). Von diesem Typ B wurden acht Lysimeter für die Bepflanzung mit *Aster tripolium* verwendet, so dass eine Gesamtfläche von 3,84 m² bereitgestellt wurde. Pro Lysimeter (Typ B) wurden 15 Pflanzen der Art *Aster tripolium* eingesetzt.

Unmittelbar nach der Lieferung aus Hannover, wurden die Pflanzen von den Töpfen unter Erhalt von möglichst viel Feinwurzelmasse in das Substrat der Lysimeter umgesetzt. Danach wurden die Pflanzen schrittweise an den Salzgehalt im Fluid des Primärkreislaufs adaptiert. Zu Beginn benö-

tigten die Pflanzen einige Tage, um sich an die neuen Bedingungen zu gewöhnen, da die Temperaturen und die Sonneneinstrahlung im Gewächshaus sehr hoch waren (Ausbleichen, niedriger Turgor).

Die Bemessung des Prozesswasserflusses zu den Lysimetern folgte folgender Annahme:

Die maximale Futtermenge, die der Biofilter pro Tag verarbeiten kann wurde mit 900 g pro Tag angenommen (s.o.). Das bedeutet:

$$\begin{aligned} 900 \text{ g Futter} * 0.5 &= 450 \text{ g Protein} \\ 450 \text{ g Protein} * 0.16 &= 72 \text{ g N} \\ 72 \text{ g N} * 0.5 &= 36 \text{ g N Exkretion} \end{aligned}$$

Unter der Annahme einer maximalen Stickstoffkonzentration im Prozesswasser von 50 mg/l ergibt sich dann das Prozesswasservolumen, dass täglich den Lysimetern aus dem primären Kreislauf zugeführt werden musste, mit $\frac{36000 \text{ mg N}}{50 \frac{\text{mg N}}{\text{l}}} = 720 \text{ l}$.



Abb. 25: Das Gewächshaus mit den Lysimetern. Bild rechts: *Plantago cronopus* auf der linken Seite, *Aster ripolium* auf der rechten Seite des Gewächshauses.

Das bedeutet, dass unter Vollastbedingungen, d.h. 900 g Futterzufuhr pro Tag, 720 l Prozesswasser in den Lysimetern von Stickstoff befreit werden müssen, um die Stickstoffzufuhr von 36 g/d zu kompensieren. In der Auslegung wurde zur Sicherheit der dreifache Prozesswasserstrom angenommen, sodass zumindest $\frac{1}{3}$ der Stickstofffracht im Prozesswasser während der Passage der Lysimeter abgebaut werden musste. Die Zu- bzw. Ableitung wurden entsprechend ausgelegt (Abb. 24).

3.6.2 Routineabläufe und Datenerhebung

Einen erheblichen zeitlichen Aufwand stellte die Versorgung des primären Fluid-Kreislaufs dar. Die Fische wurden täglich zweimal per Hand gefüttert und beobachtet, um einen Gesamteindruck über den Zustand und die Leistungsfähigkeit der Tiere zu bekommen. Belüftung, Pufferung etc. wurden täglich an die aktuelle Situation angepasst und befanden sich auf optimalem Niveau. Beobachtungen und Maßnahmen wurden entsprechend den Richtlinien des Tierschutzes protokolliert. Die Wasser-

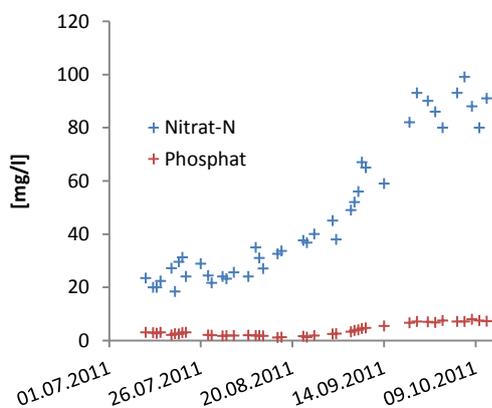


Abb. 26: Nährstoffkonzentrationen im Produktionstank des primären Fluid-Kreislaufs gemessen im zentralen Vorratsbehälter.

qualität wurde regelmäßig mit der Bestimmung der Konzentrationen von Ammonium/Ammoniak, Nitrit, Nitrat und Phosphat überprüft. Weitere Messwerte wurden automatisch durch die SPS protokolliert. Jeden Morgen wurde der aktuelle Zustand der Anlage durch ein abzuarbeitendes Protokoll systematisch überprüft.

Während dieser Projektphase wurden in wiederkehrenden intensiven Messphasen die Konzentrationen von Ammonium/Ammoniak, Nitrit, Nitrat und Phosphat an verschiedenen Messpunkten im Fluid des primären und sekundären Kreislaufes photometrisch gemessen. Zusätzlich wurden die Messwerte der Sonden für Temperatur, Sauerstoff, Salzgehalt, REDOX und pH automatisch bzw. per Mitschrift protokolliert.

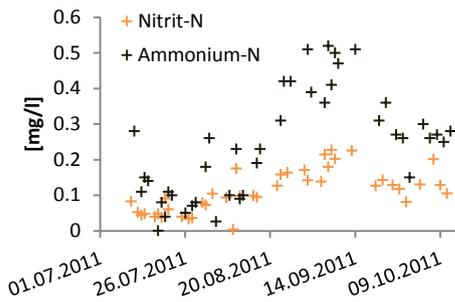


Abb. 27: Konzentrationen von Ammonium/Ammoniak und Nitrit, im Produktionstank des primären Fluid-Kreislaufs gemessen im zentralen Vorratsbehälter.

Das Wachstum der Pflanzen wurde als Gewichtszunahme (Frischmasse) des Blatt- und Sprossmaterials (oberirdische Pflanzenteile) bestimmt. Hierfür wurden jeden Monat drei Pflanzen pro Art geerntet und das Frischgewicht ermittelt. Anschließend wurden die Blätter und Sprosse zusätzlich bei 100 °C getrocknet und das Trockengewicht gewogen. Für weitere Analysen wurden Unterproben im Exsikkator gelagert, die in der zweiten Projektphase mittels CN-Analyser, der sich momentan in der Beschaffung befindet, analysiert werden.

Die biologische Filterleistung einzelner Lysimeter wurde analysiert, indem im Zu- und Ablauf der Lysimeter die Nährstoffkonzentrationen photometrisch bestimmt wurden.

Die Bewässerung der Lysimeter erfolgte mit Eintreffen der Pflanzen aus Hannover (LUH) mittels Hand. Das war notwendig, da zu diesem Zeitpunkt noch nicht die automatische Prozesswasserzufuhr realisiert worden war. Es wurden daher mehrfach am Tag die Lysimeter mit einer Handgießkanne bewässert. Die Wassermenge pro Tag und Lysimeter betrug 40 l Prozesswasser mit einem Salzgehalt von 20 psu. Ab August 2011 wurde der Pflanzenreaktor automatisch bewässert.

3.6.3 Ergebnisse erster intensiver Messperioden

3.6.3.1 Wachstum der Pflanzen im Pflanzenreaktor und Nährstoffretention

Die Abb. 26 zeigt die ersten Ergebnisse der Nährstoffmessungen im Fluid des primären Kreislaufs. Als Folge der Zufuhr von Futter kam es insgesamt zu einer kontinuierlichen Zunahme der Nährstoffe. Die Kapazität des Pflanzenreaktors (= Summe aller Lysimeter) war nicht ausreichend, um den Stickstoffzustrom zu kompensieren. Trotz der Entnahme von Stickstoff durch die Halophyten nahm die Konzentration von Nitrat-N von 23.4 mg/l auf 91.0 mg/l zu. Phosphat stieg von 3.1 mg/l auf 7.2 mg/l an. Beide Konzentrationen blieben weit unterhalb kritischer Grenzen, wenn auch beim Stickstoff die anvisierte Maximalkonzentration von Nitratstickstoff (50 mg/l) in dieser ersten Projektphase nicht gehalten werden konnte.

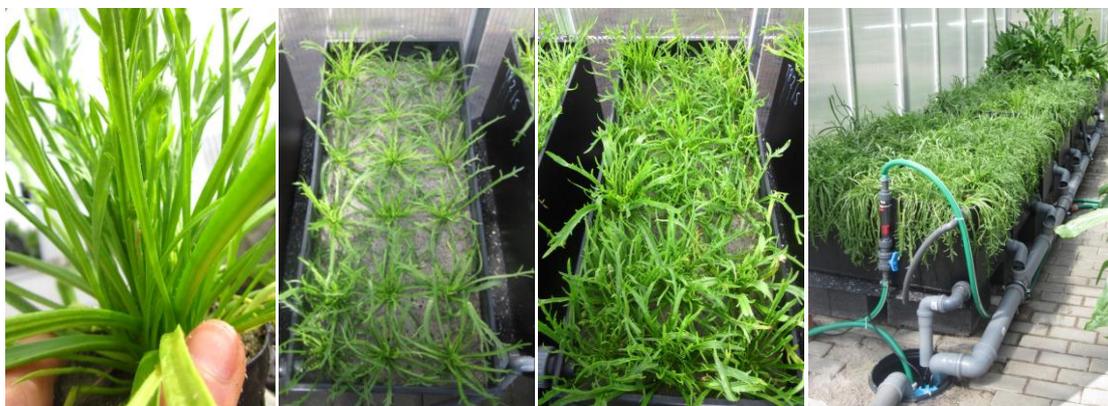


Abb. 28: Wachstum von *Plantago coronopus* in den Lysimetern. Von links nach rechts: Von links nach rechts: April, Mai, Juni, Juli 2011.

Auch für Ammonium/Ammoniak und Nitrit, zwei fischtoxische Substanzen wurden im Verlauf der ersten Projektphase zeitweise zunehmende Konzentrationen gemessen (Abb. 27). Diese sind unter anderem auf eine drastische Erhöhung der Futtermenge auf bis zu 850 g Futter pro Tag nach Anschluss der Lysimeter zurückzuführen. Nachdem sich zeigte, dass die Kapazität des Pflanzenreaktors nicht ausreichte, die zugeführte Stickstoffmenge zu kompensieren und, dass die Konzentrationen fisch- und pflanzentoxischer Stickstoffverbindungen zunahm, wurde die Fütterung wieder auf Mengen unterhalb 500 g bzw. 1% des Besatzgewichtes pro Tag reduziert. Danach nahm sofort die Konzentrationen von Ammonium/Ammoniak und Nitrit wieder ab. Ebenso zeigte der Nitratstickstoff kaum noch ansteigende Tendenz.



Abb. 29: Wachstum von *Aster tripolium* in den Lysimetern. Von links nach rechts: April, Mai, Juni, Juli 2011.

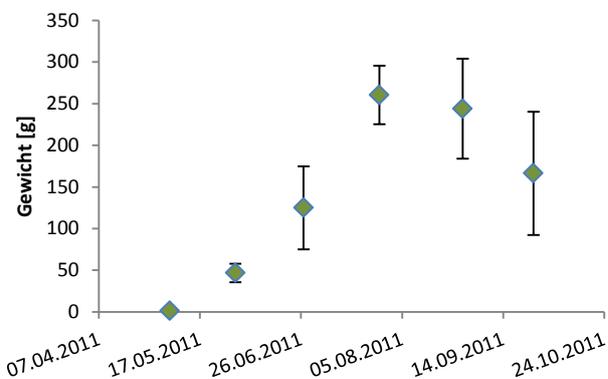


Abb. 30: Das Wachstum von *Plantago coronopus* im Pflanzenreaktor.

Die Halophyten gediehen zu Beginn der experimentellen Phase mit Handbewässerung prächtig und wuchsen zusehends heran. Während *Plantago* (Abb. 28) aufgrund seiner Wuchsform unproblematisch in den Lysimetern in der Größe zunahm, erreichte die Aster schnell eine Länge, sodass die Pflanzen am Dach des Gewächshauses anstießen (Abb. 29). Anfang August wurde die automatische Prozesswasserzufuhr realisiert und damit während des Tages im Mittel 2200 l nährstoffreiches Prozesswasser zugeführt. Mit Beginn der kontinuierlichen Prozesswasserzufuhr zeigte sich ein anderes Bild. *Plantago* stagnierte im Wachstum (Abb. 30), wobei entweder der nun kontinuierlich hohe Salzgehalt des Prozesswassers (20 psu) und/oder die hohen Sommertemperaturen ausschlaggebend waren.

Plantago coronopus wuchs innerhalb der ersten drei Monate kontinuierlich und die Biomasse erhöht sich von anfänglich $1.4 \text{ g} \pm 0.3 \text{ g}$ auf $260.3 \text{ g} \pm 35.1 \text{ g}$. Danach nimmt die deutliche Gewichtszunahme im Gewicht des Blatt- und Sprossmaterials ab (Abb. 30).

Die Aster (*Aster tripolium*) wuchs unverändert weiter (Abb. 29). Nach einer fünfmonatigen Wachstumsphase zeigte die Strandaster eine deutliche Zunahme im Gewicht des Blatt- und Sprossmaterials.

Das Gewicht von *Aster tripolium* nahm von anfänglich $21.65 \text{ g} \pm 5.93 \text{ g}$ auf $944.96 \text{ g} \pm 346.72 \text{ g}$ zu. Die dargestellten Ergebnisse beziehen sich auf das Frischgewicht pro Pflanze.

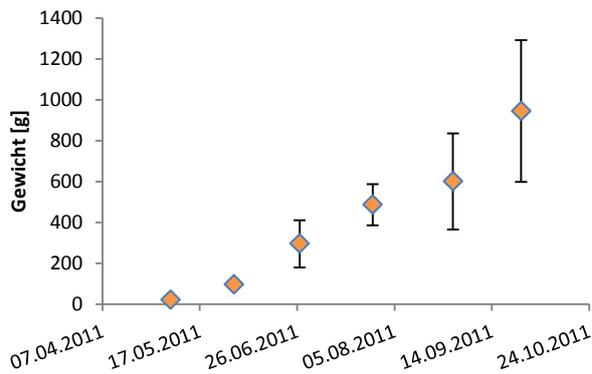


Abb. 31: Das Wachstum von *Aster tripolium* im Pflanzenreaktor.

Die nachstehenden Abbildungen (Abb. 32) beziehen sich auf die Nährstoffretention durch den Pflanzenreaktor. Um die Filterleistung der Halophyten bzw. der Substratbiologie in den Lysimeter zu beurteilen, wurden sowohl im primären als auch im sekundären Kreislauf die Nährstoffkonzentrationen der gelösten Nährstoffe verfolgt.

Abb. 32 gibt einen Überblick über die Nährstoffverteilung im Gesamtsystem des primären und sekundären Fluid-Kreislaufs. Die Nährstoffkonzentrationen im Produktionsstank entsprachen dabei den Nährstoffkonzentrationen im Zulauf zum Pflanzenreaktor. Das mit Nährstoffen beaufschlagte Prozesswasser wurde dem Gewächshaus über eine Schlauchleitung zugeführt (Zulauf) und dort in den Lysimeter biologisch aufbereitet. Das aufbereitete Wasser wurde anschließend in einem Pumpensumpf im Gewächshaus gesammelt und in den Primärkreislauf zurückgeführt (Rücklauf).

Das mit Nährstoffen beaufschlagte Prozesswasser wurde dem Gewächshaus über eine Schlauchleitung zugeführt (Zulauf) und dort in den Lysimeter biologisch aufbereitet. Das aufbereitete Wasser wurde anschließend in einem Pumpensumpf im Gewächshaus gesammelt und in den Primärkreislauf zurückgeführt (Rücklauf).

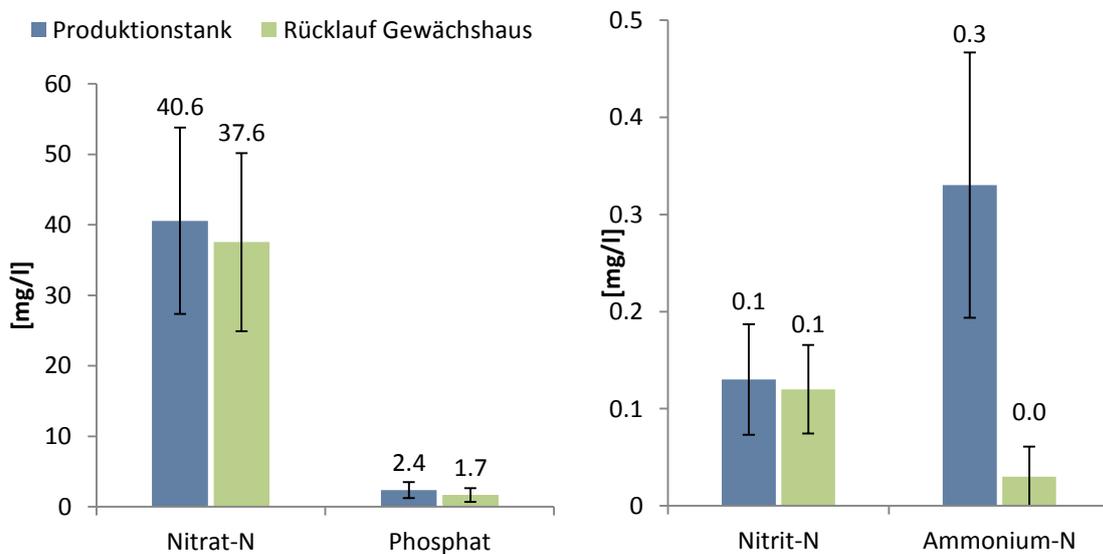


Abb. 32: Mittlere Nährstoffkonzentrationen von NO_3^- -N und PO_4^{3-} bzw. NH_4^+ -N und NO_2^- -N im Produktionsstank (Zulauf) und in der Rückführung (Rücklauf Gewächshaus) aller Lysimeter (= Pflanzenreaktor).

Sowohl für Nitrat als auch für Phosphat wurden im Rücklauf der Lysimeter abnehmende Konzentrationen gemessen. Die Messwerte sind mit Mittelwerten und Standardabweichungen in Tab. 4 zusammengestellt. An den meisten Tagen, für die Datensätze erhoben werden konnten, konnte eine Abnahme der Nitratkonzentration im Auslauf festgestellt werden. Während 4 von 13 Tagen wurden aber auch keine Konzentrationsänderung bzw. zunehmende Konzentrationen im Auslauf gemessen. Im Mittel war im Vergleich zum Zulauf die Nitratkonzentration um 7%, die Phosphatkonzentration um 31% niedriger im Rücklauf (Tab. 4). Die Abnahme der Phosphatkonzentration war deutlich und für alle Versuchstage hoch. Zwischen 19 und 42% Abnahme wurden gemessen.

Tab. 4: Nährstoffkonzentrationen im Zu- und Rücklauf der Lysimeter im Gewächshaus.

Datum	NO ₃ ⁻ -N [mg/l]			PO ₄ ³⁻ [mg/l]		
	Zulauf	Rücklauf		Zulauf	Rücklauf	
08.08.2011	22.4	16.8	-25%	2.0	1.2	-40%
10.08.2011	35.0	25.0	-29%	1.8	1.1	-39%
11.08.2011	31.0	29.0	-6%	1.9	1.1	-42%
12.08.2011	27.0	30.0	11%	1.7	1.2	-29%
23.08.2011	37.6	32.0	-15%	1.6	1.0	-38%
17.08.2011	33.6	36.0	7%	1.3	1.0	-23%
24.08.2011	36.8	34.4	-7%	1.3	1.0	-23%
26.08.2011	40.0	38.0	-5%	1.8	0.7	-61%
31.08.2011	45.0	40.0	-11%	2.5	1.9	-24%
01.09.2011	38.0	38.0	0%	2.6	2.1	-19%
05.09.2011	49.0	52.0	6%	3.3	2.6	-21%
08.09.2011	67.0	53.0	-21%	4.5	3.5	-22%
09.09.2011	65.0	64.0	-2%	4.7	3.5	-26%
MW	40.57	37.55	-7%	2.38	1.68	-31%
Stabw	13.23	12.63	12%	1.13	0.97	12%

Tab. 5: Nährstoffkonzentrationen im Zu- und Rücklauf der Lysimeter im Gewächshaus.

Datum	NH ₄ ⁺ -N [mg/l]			NO ₂ ⁻ -N [mg/l]		
	Zulauf	Rücklauf		Zulauf	Rücklauf	
08.08.2011	0.10	0.00	-100%	0.09	0.09	0%
10.08.2011	0.23	0.06	-74%	0.00	0.08	/
11.08.2011	0.18	0.08	-56%	0.12	0.08	-33%
12.08.2011	0.20	0.01	-95%	0.10	0.07	-30%
23.08.2011	0.31	0.00	-100%	0.13	0.06	-54%
17.08.2011	0.23	0.00	-100%	0.09	0.10	11%
26.08.2011	0.42	0.08	-81%	0.16	0.19	19%
31.08.2011	0.51	0.03	-94%	0.17	0.17	0%
01.09.2011	0.39	0.00	-100%	0.14	0.15	7%
05.09.2011	0.36	0.00	-100%	0.14	0.11	-21%
08.09.2011	0.50	0.03	-94%	0.23	0.15	-35%
09.09.2011	0.47	0.01	-98%	0.20	0.13	-35%
MW	0.33	0.03	-91%	0.13	0.12	-16%
Stabw	0.14	0.03	14%	0.06	0.04	24%

Abb. 32 verdeutlicht auch, dass die Konzentration von Ammoniumstickstoff am deutlichsten reduziert wurde. Im Rücklauf sind nur noch Spuren von Ammoniumstickstoff detektierbar. Im Mittel wurde 91% des Ammoniumstickstoffs abgebaut (Tab. 5). Nitrit zeigte ein variables Bild. An zwei Tagen wurde eine Zunahme der Nitritkonzentration im Auslauf gemessen, an einem Tag wurde keine Ver-

änderung zwischen der Konzentration im Zulauf und im Ablauf festgestellt. Im Mittel nahm die Konzentration des Nitritstickstoff um 16% während der Passage des Pflanzenreaktors ab.

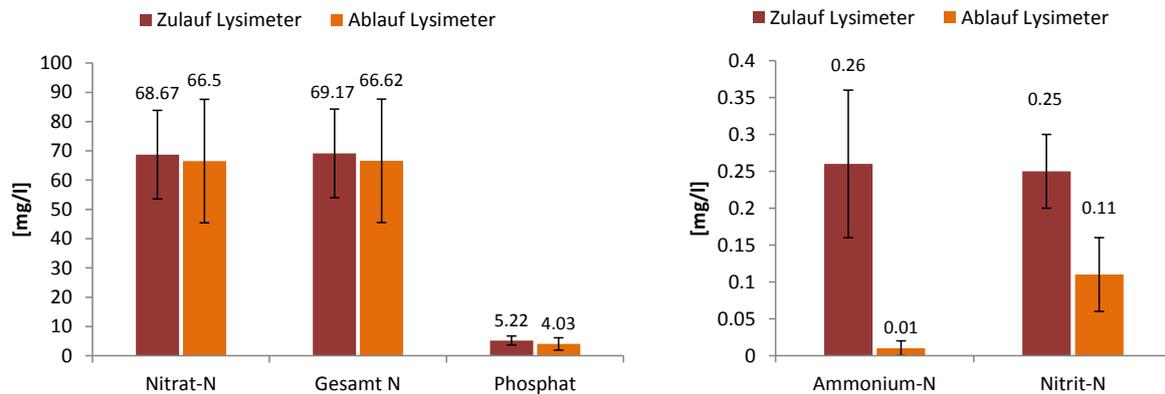


Abb. 33: Nährstoffe im Zu- und Ablauf des Lysimeter 1. Bepflanzung mit *A. tripolium*.

Tab. 6: Nährstoffkonzentrationen im Zulauf und Ablauf von Lysimeter 1, das mit *Aster tripolium* bepflanzt worden war.

Datum	NH ₄ ⁺ -N [mg/l]		NO ₂ ⁻ -N [mg/l]		NO ₃ ⁻ -N [mg/l]		Gesamt N		PO ₄ ³⁻ [mg/l]	
	Zulauf	Ablauf	Zulauf	Ablauf	Zulauf	Ablauf	Zulauf	Ablauf	Zulauf	Ablauf
05.09.2011	0.12	0.00	0.15	0.07	51.00	50.00	51.27	50.07	3.80	2.30
07.09.2011	0.34	0.03	0.24	0.14	57.00	50.00	57.58	50.17	4.10	2.90
08.09.2011	0.36	0.01	0.27	0.18	60.00	46.00	60.63	46.19	4.40	2.60
09.09.2011	0.36	0.00	0.28	0.16	72.00	70.00	72.64	70.16	4.70	3.00
13.10.2011	0.19	0.00	0.23	0.06	84.00	91.00	84.42	91.06	7.00	6.60
15.10.2011	0.20	0.00	0.30	0.06	88.00	92.00	88.50	92.06	7.30	6.80
MW	0.26	0.01	0.25	0.11	68.67	66.50	69.17	66.62	5.22	4.03
Stabw	0.10	0.01	0.05	0.05	15.12	21.11	15.14	21.07	1.53	2.08

Tab. 7: Futtermenge und Prozesswasserzulauf zum Lysimeter 1

Datum	Futter [g]	Lys 1 Vol l/h	Lys 1 Vol l/d
05.09.2011	800	18.0	150.7
07.09.2011	850	17.5	142.6
08.09.2011	850	18.0	133.2
09.09.2011	850	17.5	124.3
13.10.2011	560	16.8	135.7
15.10.2011	560	17.0	121.6
MW	745.00	17.47	134.67
Stabw	144.6	0.5	11.0

Die Tab. 6, Tab. 7, Tab. 8 und Tab. 9 und Abb. 33 und Abb. 34 zeigen die Ergebnisse der Untersuchung der Filterleistung von zwei einzelnen Lysimetern. Die Nährstoffkonzentrationen im Zu- und Ablauf des Lysimeters wurden photometrisch im Prozesswasser an sechs Tagen bestimmt. Die Ergebnisse für das Lysimeter 1 mit einer Fläche von 0.480 m², das mit 15 Strandastern bepflanzt war, sind in Tab. 6 zusammengefasst. Sowohl für die Stickstoffverbindungen als auch für den Gesamtstickstoff

und für Phosphat wurden im Ablauf von Lysimeter 1 abnehmende Nährstoffkonzentrationen gemessen. Der Ammoniumstickstoff und der Nitritstickstoff wurden im Mittel zu 96% und 56% abgebaut. Die Abnahme der Gesamtstickstoffkonzentration um 3.7% war hauptsächlich darauf zurückzuführen. Nitratstickstoff wurde nur zu 3.1% abgebaut. Insgesamt wurde also nur ein geringer Teil des Stickstoffs im Lysimeter 1 zurückgehalten (Abb. 33). Phosphat wurde zu 23% aus dem Prozesswasser eliminiert (Tab. 6). Tab. 7 fasst die Futtermengen und den Prozesswasserfluss zum Lysimeter 1 zusammen.

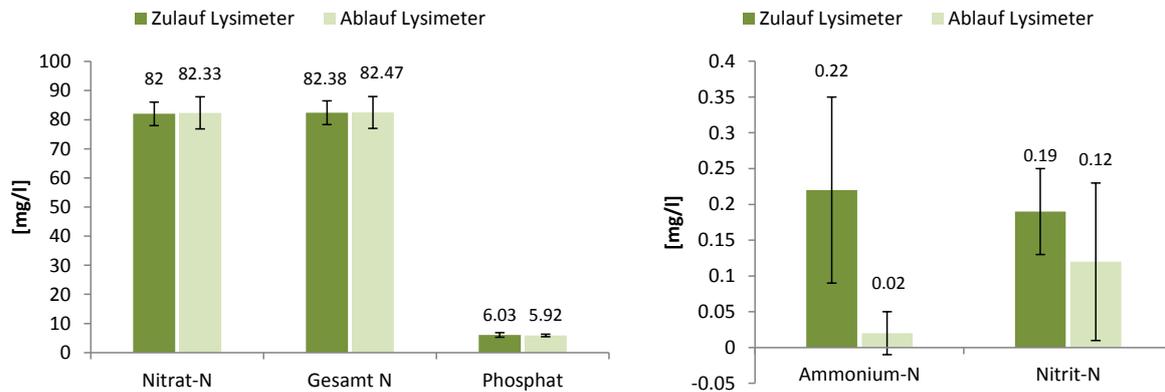


Abb. 34: Nährstoffe im Zu- und Ablauf des Lysimeter 14. Bepflanzung mit *P.coronopus*.

Tab. 8: Nährstoffkonzentrationen im Zulauf und Ablauf von Lysimeter 14, das mit *Plantago coronopus* bepflanzt worden war.

Datum	NH ₄ ⁺ -N [mg/l]		NO ₂ ⁻ -N [mg/l]		NO ₃ ⁻ -N [mg/l]		Gesamt N		PO ₄ ³⁻ [mg/l]	
	Zulauf	Ablauf	Zulauf	Ablauf	Zulauf	Ablauf	Zulauf	Ablauf	Zulauf	Ablauf
14.09.2011	0.42	0.07	0.22	0.33	83.00	76.00	83.60	76.40	5.50	5.10
19.09.2011	0.10	0.00	0.13	0.04	78.00	76.00	78.20	76.04	6.50	6.00
20.09.2011	0.23	0.01	0.18	0.09	88.00	82.00	88.40	82.10	6.50	6.10
21.09.2011	0.22	0.00	0.20	0.08	78.00	90.00	78.40	90.08	6.60	5.90
22.09.2011	0.28	0.04	0.27	0.13	80.00	85.00	80.50	85.17	6.40	6.00
29.09.2011	0.06	0.00	0.12	0.02	85.00	85.00	85.20	85.02	4.70	6.40
MW	0.22	0.02	0.19	0.12	82.00	82.33	82.38	82.47	6.03	5.92
Stabw	0.13	0.03	0.06	0.11	4.05	5.54	4.06	5.48	0.77	0.44

Tab. 9: Futtermenge und Prozesswasserzulauf zum Lysimeter 14

Datum	Futter [g]	Vol l/h	Vol l/d
14.09.2011	850	28.50	234.8
19.09.2011	900	28.50	255.1
20.09.2011	900	27.00	198.5
21.09.2011	560	28.30	240.6
22.09.2011	560	28.20	239.7
29.09.2011	560	27.50	193.9
MW	721.67	28.00	232.23
Stabw	178.0	0.6	24.1

Abb. 34, Tab. 8 und Tab. 9 zeigen die Ergebnisse der Filterleistung von Lysimeter 14, welches eine Fläche von 0.324 m² hatte und mit 18 Krähenfußwegerich-Pflanzen bepflanzt worden war. Auch hier zeigt sich eine deutliche Abnahme für den Ammonium- und Nitritstickstoff. Es wurden 91% des Ammoniumstickstoffs und 37% des Nitritstickstoffs aus dem Prozesswasser abgebaut. Der Nitratstickstoff wurde nicht zuverlässig abgebaut. Im Mittel über alle Versuchstage ergibt sich eine geringe Zunahme, die sich auch in den Gesamtstickstoffkonzentrationen widerspiegelt (Abb. 34). 18% des Phosphats konnte aus dem zulaufenden Prozesswasser eliminiert werden.

Ende Juli 2011 wurden die sekundären Komponenten des Fluid-Kreislauf, der Pflanzenreaktor, in den Prozesswasserstrom des primären Fluid-Kreislaufs integriert. Ab diesem Zeitpunkt wurde morgens der Prozesswasserzulauf zu den Lysimetern geöffnet. Am Nachmittag wurde der Prozesswasserzulauf wieder geschlossen. Die Tab. 7 und Tab. 9 zeigen den Prozesswasserstrom zu den Lysimetern 1 und 14. Insgesamt wurden zum sekundären Pflanzenreaktor täglich 2223 ± 415 l Prozesswasser gepumpt. Der minimale und maximale Prozesswasserstrom betrug 1750 und 3200 l/d.

3.6.3.2 Das Wachstum der Fische im primären Fluid-Kreislauf

Das Wachstum vom Wolfsbarsch wurde kontinuierlich sowohl vor als auch nach der Zuschaltung des Pflanzenreaktors kontrolliert. Die Abb. 35 zeigt das Wachstum der Fische vor und nachdem der Pflanzenreaktor zugeschaltet worden war.

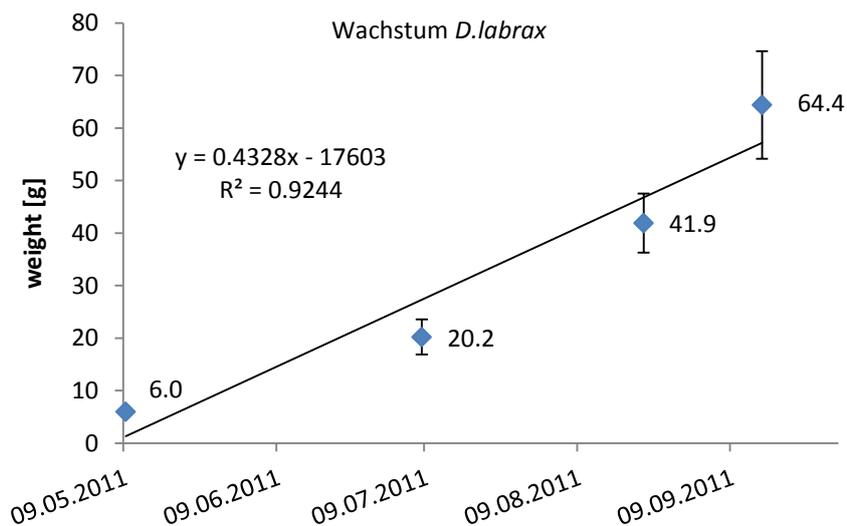


Abb. 35: Wachstum von *D. labrax* innerhalb der ersten experimentellen Phase.

3.6.3.3 Der pH-Wert im primären Fluid-Kreislauf

Die Regulation des pH-Wertes im Prozesswasser erfolgt im Fluid-Kreislauf mittels Kalziumhydroxid-Dosierung (Kalkmilch). Sinkt der pH-Wert aufgrund der Kohlenstoffdioxidausscheidung der Tiere unterhalb eines festgelegten Grenzwertes (pH 7.4), wird Kalkmilch über eine Schlauchpumpe zudosiert. Die Lysimeter wurden am 25.07.2011 als sekundäre Verfahren für die Wasseraufbereitung eingesetzt.

Seit Beginn der Integration der Halophyten wurden nicht nur Nährstoffe aus dem Fluid eliminiert, sondern die Lysimeter haben ebenfalls zu einer deutlich stabileren Anlagenfunktion beigetragen. Ein Beispiel ist in Abbildung 19 dargestellt. Eine pH-Regulation mittels Kalkmilch war in der Halophyten-Anlage nicht notwendig und der pH-Wert stabilisierte sich ohne zusätzliche Dosierung bei 7.5-7.8. Erst als die Temperaturen über 35-40°C im Gewächshaus am 23.08.2011 angestiegen sind, kam es zu einem deutlichen Abfall im pH-Wert.

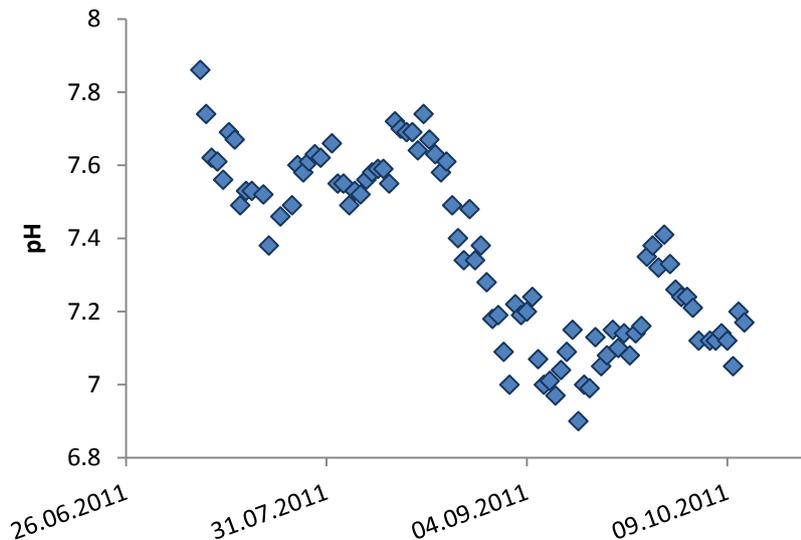


Abb. 36: Zeitlicher Verlauf der pH-Wert Stabilisierung in der Halophyten-Anlage.

3.7 Fazit

In der ersten Projektphase wurden zwei Halophyten-Arten, *A. tripolium* und *P. coronopus*, sowohl grundlegend in Laborversuchen und kontrollierten Experimenten im Gewächshaus als auch unter aquakulturtypischen Bedingungen im Freiland untersucht. Die Ergebnisse zeigen generell die Machbarkeit der Wiederverwertung von Nährstoffen aus der Aquakultur mit Fischen auf. Darüber hinaus erscheinen die sekundären Effekte, zum Beispiel die parallel in den Pflanzenreaktor ablaufenden Prozesse, die den pH-Wert stabilisieren, zusätzliche Argumente für eine Integration von Halophyten in marine Produktionskreisläufe zu sein. In der ersten Versuchsphase konnten die Freilanduntersuchungen nur über wenige Wochen hinweg messend verfolgt werden, sodass in der zweiten Projektphase entscheidende weitere Datensätze erhoben werden müssen, um das bislang erzielte Resultat zu bestätigen.

Gemessen an der ursprünglichen Planung, konnte durch Gastwissenschaftler (Fulvio Mafucci, Statione Anthon Dohrn, Neapel, Italien), Praktikanten (Thies Heinrich, Konstantin Waller), Bachelor- und Masterarbeiten (Benjamin Schmitt, Jochen Bauer) sowie durch zusätzliche Mitarbeiter des Institut für Physikalische Prozesstechnik der HTWdS und zusätzliche Mittel beider beteiligter Hochschulen ein weitaus besserer technisch/biologischer Stand erreicht werden, als auf Basis der Bewilligung möglich gewesen wäre. Dadurch war es möglich, dass erste Messungen am Gesamtsystem primärer und sekundärer Fluid-Kreislauf vorgenommen werden konnten und einzelne Messungen an den Arten zum Vergleich der Leistungsfähigkeit (Filterleistung, Wachstum, Salz- und Temperatur-Toleranzen) schon jetzt erfolgt sind.

Die den Freilanduntersuchungen vorangegangenen Klimakammer- und Gewächshausuntersuchungen zur Salzgehaltstoleranz zeigten deutlich die physiologischen Grenzen der beiden Arten auf. *P. coronopus* kann nur in Fluiden Kreisläufen eingesetzt werden, in denen der Salzgehalt 18 psu nicht überschreitet. Dieses Ergebnis wird von den Freilanduntersuchungen bestätigt, in denen *P. coronopus* mit Beginn der kontinuierlichen Bewässerung mit Salzwasser (≈ 20 psu) das Wachstum einstellte, sogar Biomasse durch Blattverluste verloren ging. *P. coronopus* ist somit eine gute Wahl für Brackwasserbedingungen, die von vielen Fischarten und Krebstieren toleriert werden. Auch der Wolfsbarsch, *D. labrax*, der hier in den Experimenten als Zuchtfisch benutzt wurde, würde niedrigere Salzgehalte tolerieren. Deshalb wurden noch einmal von der LUH Setzlinge für die Freilandversuche aufgezogen,

die momentan in den Lysimetern wachsen. In dieser laufenden Untersuchung wird der Salzgehalt im Fluid-Kreislauf um 2 psu auf 18 psu abgesenkt, sodass die Ergebnisse zeigen werden, ob *P. coronopus* unter diesen Bedingungen das erwartete Potential zeigt. Dabei ist auch die Funktion des Flotationsprozesses (Abschäumer) zu überwachen, da Blasengröße, das Blasenbild und damit die Effizienz des Flotationsprozesses sich verändern könnte. Der für den hier eingesetzten Flotationsprozess minimale Salzgehalt liegt nach eigenen Erfahrungen in demselben Bereich. Das wäre dann ein Ausschlusskriterium für die Verwendung von *P. coronopus* für die hier gezüchtete und viele andere Seewasserschichten. Die Aster, *A. tripolium*, wuchs hingegen auch in hohen Salzgehalten und zeigte durchgängig gutes Wachstum in den Freilandversuchen bei Bewässerung mit Prozesswasser aus dem Fischkreislauf.

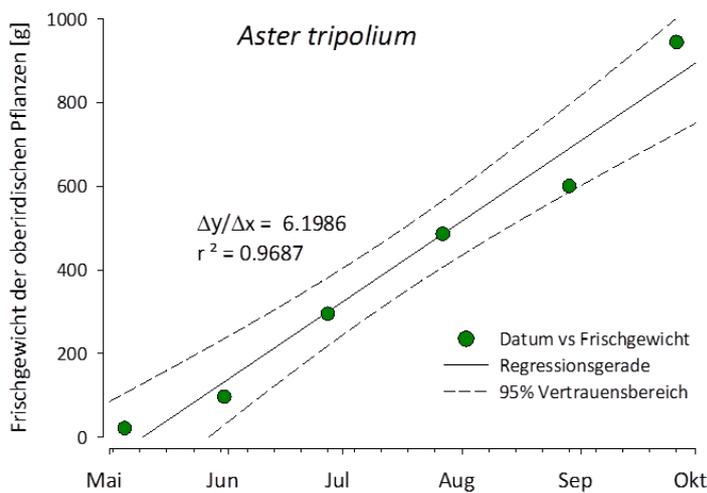


Abb. 37: Regression für die für *A. tripolium* gemessenen Gewichte der oberirdischen Pflanzen während des Feldversuches.

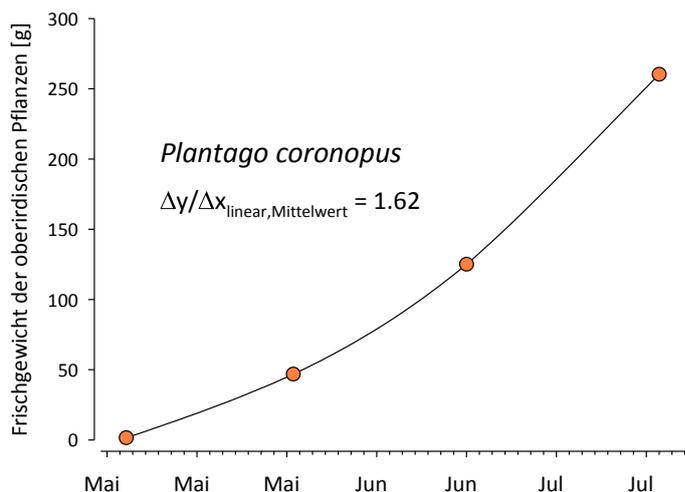


Abb. 38: *P. coronopus*: Gemessene Gewichte der oberirdischen Pflanzen während des Feldversuches. Die Wachstumsrate ist als Mittelwert der linearen Wachstumsraten für die einzelnen Messwerte angegeben.

Durch den späten Projektbeginn wurden die ersten Laboruntersuchungen unter herbstlichen und winterlichen Lichtbedingungen durchgeführt. Es zeigte sich schon in den Gewächshausversuchen, dass eine zusätzliche Beleuchtung mit Natriumdampflampen notwendig war, um gute Wachstumser-

gebnisse zu erzielen. Während in den Gewächshausversuchen das Wachstum der gesamten Pflanzen unter 1 g pro Tag ausfiel, konnte unter Sommerbedingungen für die Aster ein mittleres tägliches Wachstum um 6 g festgestellt werden (Abb. 37). *Plantago* erreichte in der Adaptationsphase mit steigenden Salzgehalten unter 20 psu Wachstumsraten von im Mittel 1.6 g Frischgewicht pro Tag (Abb. 38), lag also deutlich unter der Leistungsfähigkeit der Aster. Die Ergebnisse zeigen, dass es unbedingt notwendig ist, die Ausdehnung der Vegetationsperiode, beziehungsweise Perioden mit sehr gutem, gutem und weniger gutem Wachstum über einen Jahreszyklus zu untersuchen. Diese Ergebnisse stellen die notwendige Datenbasis für die numerische Analyse der Abbauleistung in Abhängigkeit von der Jahreszeit dar. Sie fehlen bislang und müssen in der zweiten Projektphase erarbeitet werden. Die apparativen Voraussetzungen dafür sind in der ersten Projektphase geschaffen worden. Weiterhin sollten weitere Halophyten-Arten einbezogen werden, um ein optimal auf die jeweilige Fischart abgestimmtes hydrobotanisches System zu etablieren.

Selbst bei geringem Wachstum spielte die Denitrifikation im Pflanzsubstrat der Lysimeter eine wichtige Rolle bei der Nitratelimination. Die Ergebnisse der LUH zeigen auf, dass in den Lysimetern auch ohne Pflanzen (Kontroll-Lysimeter) der Nitratstickstoff zwar bei kleinerer Rate aber kontinuierlich abgebaut wurde. Es deutete sich ein Temperatureffekt, hervorgerufen durch den Wärmefluss der Beleuchtung, an. Die Denitrifikation könnte also auch in Perioden mit lichtlimitiertem Wachstum einen Beitrag zur Nitrateliminierung im primären Kreislauf leisten, was bedeuten würde, dass der denitrifizierende Biofilter anders bemessen werden könnte. Hier sind allerdings die Ergebnisse eines Jahreszyklus (Wachstum, Nährstoffaufnahme) abzuwarten, um eine tragfähige Aussage erarbeiten zu können.

Die Gewächshausexperimente zeigen im Vergleich zu den Ergebnissen des Feldversuches, deutliche Perioden mit deutlich erhöhten Ammoniak/Ammoniumkonzentrationen im Prozesswasser. Die Werte erreichen 60 mg/l und sind hoch fischtoxisch. Da Ammoniak/Ammonium aufgrund der Dissoziation im Wasser generell zu einer Verschiebung von Wasserstoffionengleichgewichten auf zellulärer Ebene führen, ist es wahrscheinlich, dass diese hohen Werte auch limitierend für Pflanzen und insbesondere für den Wurzelmetabolismus sein können. In dem in sich geschlossenen Wasserkreislauf fehlte offensichtlich ein paralleler nitrifizierender Prozess, der die Konzentrationen begrenzt hätte. Konzentrationen über 20 mg/l hielten sich über mehrere Wochen im Prozesswasser. Eine Substratinhibition der Nitrifikation kann während dieser Zeiten vermutet werden. Letztendlich fielen im Verlauf der Experimente die Konzentrationen wieder auf ein als sicher anzunehmendes Niveau ab. Die Kausalität lässt sich aus den Messwerten nicht ableiten. Derartig extreme Zunahmen der Ammoniak/Ammoniumkonzentrationen wurden in dem Feldversuch nicht beobachtet. Die Messwerte zeigen deutlich auf, dass die Nitrifikation offensichtlich ein begleitender Prozess im Pflanzenreaktor war. Zu allen Messzeitpunkten wurde eine Abnahme der Ammoniak/Ammoniumkonzentrationen gemessen (Abb. 39). Die Funktion des Pflanzenreaktors ist also von der Prozesswasserführung abhängig und relevante Ergebnisse für die Integration in Fluide-Kreisläufe können nur Feldversuche, wie sie hier durchgeführt wurden, erbringen und müssen in der zweiten Projektphase weitergeführt werden.

Im Feldversuch wurden beide Halophyten-Arten in einem sekundären Fluid-Kreislauf für die biologische Wasseraufbereitung eingesetzt. Die Ergebnisse, die bislang erzielt werden konnten, sind vielversprechend und zeigen, dass die Nutzung von aquakulturtypischen Nährstofffrachten für die Produktion von Pflanzen möglich ist. In der ersten Projektphase konzentrierten sich die Arbeiten stark auf biologische und biotechnische Aspekte, um systematische, weiterführende Untersuchungen in einer zweiten Projektphase vorzubereiten. Die nicht ausreichende sachliche Ausstattung des Projektes konnte durch die Einwerbung zusätzlicher Projektmittel (ARTESS, Projektförderung der HTWdS) auf-

gelöst werden, so dass für weiterführende Arbeiten die grundlegenden Strukturen verfügbar sind. In der zweiten Projektphase muss die Prozesswasserführung zu und von den Lysimetern angepasst werden. Die zunächst vorgesehene Prozesswasserzufuhr von einem Systemvolumen pro Tag (10,800 Liter) konnte technisch nicht realisiert werden. Die zugeführten Mengen lagen nur bei einem Fünftel. Selbst wenn die Nährstofffrachten offensichtlich ausreichten, *Aster tripolium* wuchs in fünf Monaten von 22 g auf 945 g, wäre es wünschenswert, den Prozesswasserstrom zu erhöhen, um eine zusätzliche Aufreinigung des Prozesswassers möglich zu machen. Dazu ist auch die Vergrößerung der Pflanzenreaktorfläche notwendig.

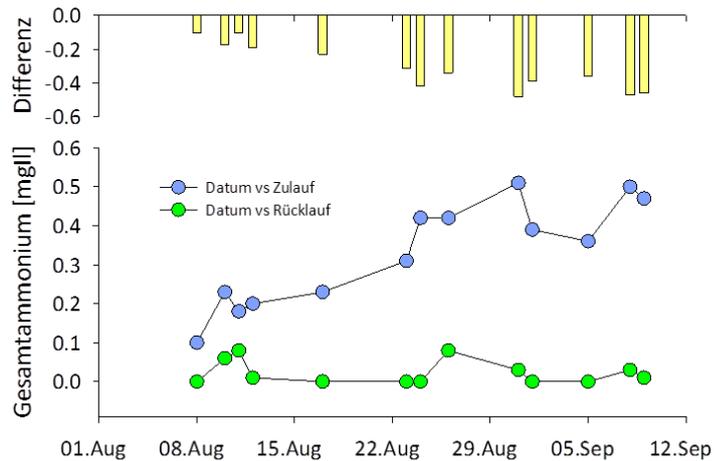


Abb. 39: Grafische Darstellung der Messergebnisse zu den einzelnen Untersuchungen von Wasserproben in dem Freiland-Pflanzenreaktor (siehe Tab. 5)

Die Strandaster zeigte insgesamt einen sehr guten Biomassezuwachs bei größerer Toleranz gegenüber den höheren Temperaturen (zum Teil Außentemperaturen im Gewächshaus über 35 - 40°C) und dem Salzgehalt von 20 psu. Die hohen Außentemperaturen Ende August beeinflussten offensichtlich aber das Wachstum beider Arten. *Aster tripolium* zeigte daraufhin eine leichte Abschwächung in Bezug auf den Biomassezuwachs, wohingegen *Plantago coronopus* das Wachstum komplett einstellte und an Biomasse verlor.

Die Bewässerungsrate von 1600-2000 Liter pro Tag zu den Lysimetern war ausreichend. Besonders zu erwähnen ist, dass es durch die Prozesswasserzufuhr zu den Lysimetern nicht zu einer Verschlämzung der Pflanzsubstrat-Oberflächen kam. Dies lässt sich damit begründen, dass schon im primären Fluid-Kreislauf durch die intensive Aufreinigung des Fluids (Prozesswasser) ein klares und extrem partikelarmes Fluid zugeleitet wurde. Ohne diese intensive Wasseraufbereitung hätten oberflächliche Verschlämmungen der Lysimeter zu eingeschränkten Sauerstoffbedingungen an den Wurzeln und Wachstumseinbußen führen können.

Ein sehr wichtiger Nebeneffekt der Prozesswasserführung über die Lysimeter im Pflanzenreaktor war der deutliche Einfluss auf das Säure-Basengleichgewicht. Im primären Fluid-Kreislauf konnte ohne die sonst typische Zugabe von Kalziumhydroxid der pH-Wert über lange Perioden auf 7.5 bis 7.8 gehalten werden. Vergleicht man dazu den Landmark Fluid-Kreislauf, der technisch identisch ist, mussten ab Juli täglich 50 bis 100 g Kalziumhydroxid zudosiert werden, um den pH-Wert auf 7.40 ± 0.1 einzustellen. Im Halophyten-Kreislauf konnte zunächst auf die teure Investition und Automatisierung verzichtet werden. Mit Abnahme der Wachstumsleistung der Halophyten Ende August musste auch im Halophyten-Kreislauf mit der Zudosierung von Kalziumhydroxid begonnen werden. Hier ist zu vermuten, dass unter Umständen auch mikrobielle Abbauprozesse im Wurzelbereich, aufgrund des ab-

nehmenden Wachstums und der damit einhergehenden erhöhten abgestorbenen Biomasse, dazu beigetragen haben.

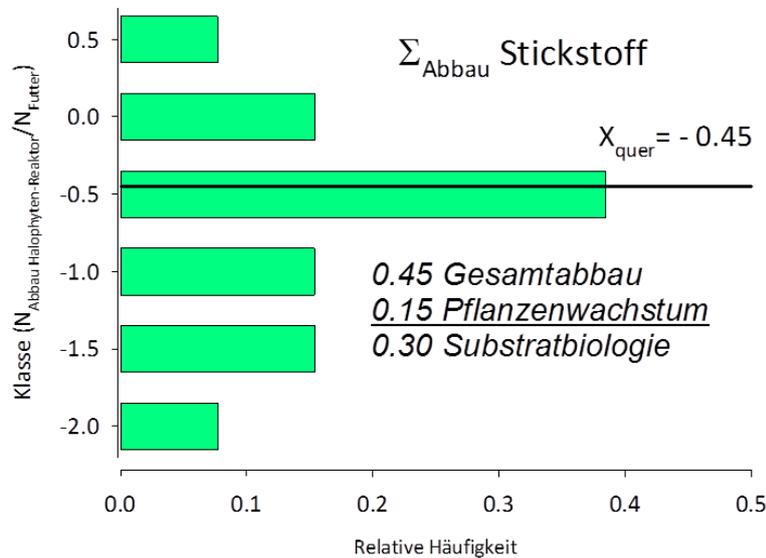


Abb. 40: Abschätzung der Leistungsfähigkeit des Pflanzenreaktors anhand der mit dem Futter täglich eingebrachten Stickstoffmenge und der über den Biomassezuwachs der Aster aufgenommenen Stickstoffmenge. Die mit *Plantago* besetzten Lysimeter haben in diesem Zeitraum keine Biomasse mehr produziert und wurden nicht in der Abschätzung berücksichtigt. Der Anteil der Substratbiologie ergibt sich aus der Differenz des Gesamtabbaus und der durch die Pflanzenbiomasse (oberirdische Pflanzenteile) gebundenen Stickstoffmenge.

Eine erste Bilanzierung mit den in den Feldversuchen erzielten Ergebnissen kommt zu folgender vorläufiger Schätzung. Die Berechnungen basieren auf wenigen Messwerten, die alle in einem relativ kurzen Zeitraum erhoben worden waren. Die weitere Berechnung ist also nur ein Anhaltspunkt und stellt kein überprüftes Ergebnis dar. Es ergaben sich aus den Resultaten einer ersten Schätzung folgende Erkenntnisse, die in jedem Fall die Machbarkeit des Konzepts aufzeigen. Der Abbau war nicht an allen Tagen, während derer der Pflanzenreaktor beprobt wurde, gleich. Abb. 40 und Abb. 41 zeigen die Häufigkeitsverteilungen für den relativen Abbau der mit dem Futter zugeführten Nährstoffe. Dafür wurde aus der Futtermenge (Futterprotein) die Stickstoffzufuhr geschätzt. Die durch die Passage durch den Pflanzenreaktor aus dem Prozesswasser abgeführte Stickstoffmenge wurde aus der Konzentrationsdifferenz und dem zugeführten Prozesswasservolumen geschätzt. Der Quotient aus dem Abbau und der zugeführten Stickstoffmenge ist in (Abb. 40) als Häufigkeitsverteilung dargestellt. Teilweise wurde in dem Pflanzenreaktor (= Gesamtheit aller Lysimeter) die doppelte Stickstoffmenge im Vergleich zu dem mit dem Futter zugeführten Stickstoff zurückgehalten (Abb. 40, Skalenwert = 2.0). An anderen Tagen wurden dem Prozesswasser im Pflanzenreaktor Stickstoff in einer Menge zugeführt, die der Hälfte des mit dem Futter zugeführten Stickstoffs entsprach (Abb. 40, Skalenwert = 0.5). Im Mittel wurden im Pflanzenreaktor beinahe die Hälfte des mit dem Futter zugeführten Stickstoffs zurückgehalten (Abb. 40, 0.45 entsprechend 45%).

Stellt man die Stickstoffaufnahme durch die produzierte Pflanzenbiomasse der im Pflanzenreaktor zurückgehaltenen Stickstoffmenge gegenüber, wurden 15% des Stickstoffs in der Pflanzenbiomasse (*A. tripolium*) zurückgehalten. Der Hauptteil der Rückhaltung, nämlich 30%, müssen momentan noch

auf substratgebundene Prozesse zurückgeführt werden. Der Pflanzenreaktor war offensichtlich zu klein.

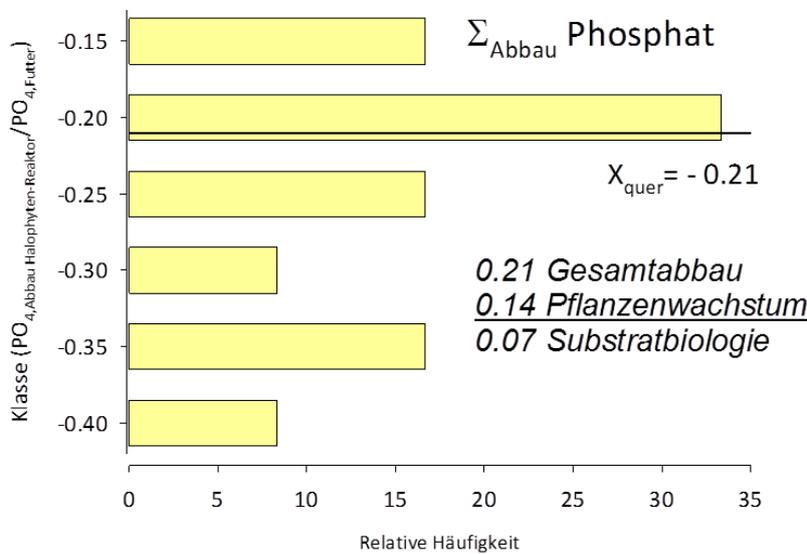


Abb. 41: Abschätzung der Leistungsfähigkeit des Pflanzenreaktors anhand der mit dem Futter täglich eingebrachten Phosphatmenge und der über den Biomassezuwachs der Aster aufgenommenen Phosphatmenge. Die mit *Plantago* besetzten Lysimeter haben in diesem Zeitraum keine Biomasse mehr produziert und wurden nicht in der Abschätzung berücksichtigt. Der Anteil der Substratbiologie ergibt sich aus der Differenz des Gesamtabbaus und der durch die Pflanzenbiomasse (oberflächliche Pflanzenteile) gebundenen Phosphatmenge.

Für die Rückhaltung von Phosphat im Pflanzenreaktor ergab sich mit den analog zum Stickstoff durchgeführten Abschätzungen ein besseres Bild. Im Mittel wurde 21% des Phosphats aus dem Prozesswasser des primären Fluid-Kreislaufs entfernt. Minimale Abbauraten lagen im Bereich um 15%. Maximal wurden über 40% des Phosphats aus dem Prozesswasser entfernt (Abb. 41). Zu keinem Zeitpunkt wurde Phosphat aus dem Pflanzenreaktor in den primären Fluid-Kreislauf zurückgeführt. Durch das Pflanzenwachstum ließ sich nur ein Anteil von 14% erklären, sodass zunächst 7% der Substratbiologie zugerechnet werden müssen. Dabei werden wahrscheinlich Bindungen des Phosphats an Eisenkomplexe oder Kalziumkarbonat eine Rolle gespielt haben. Die Bindung über Eisenkomplexe (FeOOH-Phosphat Komplex) würden dem Prozesswasser Eisen entziehen, sodass der festgestellte Eisenmangel zum Teil dadurch verursacht worden sein könnte. In anoxischen Sedimenten wird der Eisenkomplex reduziert, sodass die festgestellte Denitrifikation diesem Prozess entgegen gewirkt haben müsste. Ebenso zeigte sich, dass der pH-Wert beim vollen Betrieb des Pflanzenreaktors auf einem deutlich höheren Niveau verblieb, das Prozesswasser sehr gut gepuffert wurde. Das widerspricht eigentlich einer Rückhaltung von Kalziumkarbonat durch die Festlegung von Phosphaten im Sediment. Die erste Bilanzbildung kann also nur vorläufig sein und muss durch Messungen im zweiten Projektabschnitt genauer untersucht werden. Nur dann wird eine Stoffstromanalyse möglich, die die Grundlage für die Beurteilung des Verfahrens bilden muss.

Ausgehend von dem hier in ersten Versuchen für die Aster (*A. tripolium*) ermittelten flächenspezifischen Leistungen kann folgende Abschätzung erfolgen:

$$\text{Biomassezuwachs für Aster tripolium: } 6.2 \frac{\text{g FG}}{\text{Pflanze} \times \text{d}} \rightarrow 6.2 \times 0.099 = 0.61 \frac{\text{g TG}}{\text{Pflanze} \times \text{d}}$$

$$\text{Es ergibt sich folgende Flächenleistung: } 0.61 \frac{\text{g TG}}{\text{Pflanze} \times \text{d}} \times 31 \frac{\text{Pflanzen}}{\text{m}^2} = 18.9 \frac{\text{g TG}}{\text{m}^2 \times \text{d}}$$

$$\text{Stickstoffmenge im Biomassezuwachs: } 18.9 \frac{\text{g TG}}{\text{m}^2 \times \text{d}} * 33 \frac{\text{mg N}}{\text{g TG}} = 624 \frac{\text{mg N}}{\text{m}^2 \times \text{d}} = 0.62 \frac{\text{g N}}{\text{m}^2 \times \text{d}}$$

(TG: Trockengewicht, FG: Frischgewicht)

Klomjek und Mitarbeiter⁷ haben kamen in ihren Versuchen mit acht verschiedenen Pflanzenarten zu flächenspezifischen Aufnahmeraten, die annähernd um den Faktor 10 niedriger waren. Sie führten ihre Versuche in Thailand durch, sodass die Versuchsbedingungen vergleichbar zu der Sommersituation waren, unter der die Versuche in Völklingen durchgeführt wurden. Offensichtlich waren die verwendete Prozesstechnik und die Prozesskette sehr gut auf die effektive Nährstoffaufnahme abgestimmt. Diese hohe Stickstoffaufnahme ist am Standort Völklingen natürlich ganzjährig nicht zu erreichen. Trotzdem zeigen die Ergebnisse deutlich das verfügbare Potential auf. Insgesamt konnte mit den in der ersten Projektphase erzielten Ergebnissen die Machbarkeit des Konzeptes nachgewiesen werden. Halophyten-Reaktoren können die im Prozesswasser gelösten Nährstoffe aufnehmen und wachsen. Ausgehend von einem Fluid-Kreislauf für die Zucht von 100 t Fisch (Warmwasser) im Jahr kann man folgende Abschätzung vornehmen:

$$\text{Fischproduktion: } 100 \frac{\text{t}}{\text{a}} \rightarrow \text{Biomasse}_{\text{max}} \approx 50 \text{ t}$$

Mit einer Futterrate von 1% pro Tag (0.01), einem Proteinanteil von 50% (0.5) im Futter und einem mittleren Stickstoffanteil in Proteinen von 16% (0.16) ergibt sich bei maximaler Biomasse (50 t):

$$\text{Stickstoffmenge: } 50 \text{ t} \times 0.01 \times 0.5 \times 0.16 = 0.040 \frac{\text{t}}{\text{d}}$$

$$\text{Exkretion: } 40 \frac{\text{kg}}{\text{d}} \times 0.5 = 20 \frac{\text{kg}}{\text{d}} = 20 \times 10^6 \frac{\text{mg}}{\text{d}}$$

Mit einem Stickstoffanteil von 33 mg/g Trockengewicht (*A. tripolium*) ergibt sich die potentielle Pflanzenproduktion

$$\text{Pflanzenproduktion: } \frac{20 \times 10^6 \frac{\text{mg}}{\text{d}}}{33 \frac{\text{mg}}{\text{g}}} \approx 660 \frac{\text{kg TG}}{\text{d}} \approx 6122 \frac{\text{kg FG}}{\text{d}}$$

Das bedeutet, dass in einem kommerziellen Fluid-Kreislauf erhebliche Mengen von Stickstoffen im Prozesswasser verfügbar sind, die für die Produktion von rund 6 Tonnen Pflanzenbiomasse ausreichend wären. Neben der Biomasseproduktion sind ebenso Qualität und Inhaltsstoffe der pflanzlichen Produkte (z.B. hohe Gehalte an Antioxidantien, Stichwort Nutraceuticals) wichtig für die Nutzung als Nahrungsmittel, so dass in einer zweiten Antragsperiode in diesem Bereich Analysen vorgesehen sind. Gerade unter mildem Stress produzieren Pflanzen mehr und andere sekundäre Inhaltsstoffe als unter optimalen Wachstumsbedingungen. Es ist also sinnvoll, die Integration von Pflanzenreaktoren in Fluid-Kreisläufe für die Aquakultur zur Systemreife zu entwickeln. Die bislang erzielten Projektergebnisse zeigen deutlich einen potentiellen Kreislauf, der zukünftig verschiedene Lebensmittelproduktionen miteinander verknüpfen könnte. Das ist nicht nur ökologisch sinnvoll sondern bei den sich immer mehr verknappenden Nährstoffen für Düngemittel und steigenden Düngemittelpreisen auch ein zukunftsweisender wirtschaftlicher Aspekt. Durch die Förderung dieses Projektes konnte ein erfolgversprechender Weg beschritten werden, der in der zweiten Projektphase weiter verfolgt werden soll.

⁷ Pantip Klomjek, Suwanchai Nitisoravut 2005: Constructed treatment wetland: a study of eight plant species under saline conditions. Chemosphere 58:585-593