



Informationen aus dem Maritimen Kompetenzzentrum für industriennahe Forschung in der Meerestechnik

Berichtsgegenstand: **Abschlussbericht zum Forschungsprojekt**

Forschungsprojekt: Technologieentwicklung zur Aufforstung von Seegraswiesen
mittels textilbasierter, kunststoff-freier Aufwuchsträger

Förderer: Stiftung Klima- und Umweltschutz MV

Projekt-Nr.: 21-109

Förderzeitraum 15. November 2021 bis 31. Oktober 2023

Berichter: Prof. Dr.-Ing. Mathias Paschen, GF und Projektleiter
M.Sc. Daniela Glück, bis zum 31.12.2022
Dipl.-Ing. Reinhard Helbig
Dipl.-Ing. Hans-Jürgen Kreft, seit dem 1.06.2023

Rostock, 19. Dezember 2023

Unser Credo

Mit unseren ingenieurwissenschaftlichen, meeresbiologischen und landschaftspflegerischen Kompetenzen entwickeln wir kosteneffiziente Lösungen zur Aufforstung von Seegraswiesen und leisten damit unseren Beitrag zur Förderung von Biodiversität und Ökosystemleistungen ausgewählter Ostsee-Küstenabschnitte.

Das Autorenteam

Zusammenfassung

Seegraswiesen säumen nahezu alle Küstenregionen der Ozeane und Randmeere. Sie kommen sowohl in marinen als auch in brackigen Gewässern vor; ihr Verbreitungsgebiet erstreckt sich von den Tropen bis hin zum Polarkreis, siehe *Reynolds* [15].

Seegräser wachsen auf Sandböden; sie kommen je nach Wasserqualität von der Wasseroberfläche bis zu einer Tiefe von 40 m vor. Seegraswiesen gehören zu den ozeanischen Lebensräumen mit der höchsten Primärproduktion. Ein signifikanter Teil der Biomasse wird im Meeresboden in den Rhizomen und Wurzeln der Seegräser produziert. Dadurch binden sie dauerhaft Kohlendioxid in Form von Kohlenhydraten. Darüber hinaus bieten sie zahlreichen Fischarten Laichplätze sowie Habitate zum Aufwachsen der Jungtiere. Großflächige Seegraswiesen dämpfen die kinetische Energie der bodennahen Meeresströmung und tragen so zur Verringerung von Bodenerosionen und zur Vermeidung von Kolkbildung an Küstenbauwerken bei.

Verschiedene Literaturquellen beziffern die weltweite Ausdehnung von Seegraswiesen mit etwa 600.000 km². Das entspricht etwa der Fläche der Republik Frankreich.

Beunruhigend ist der im 20. Jahrhundert beobachtete signifikante Rückgang von Seegraswiesen weltweit um ca. 1,5 %/a¹. Die Zahlen für die Nord- und Ostsee werden höher angesetzt, so dass die Helsinki-Kommission zum Schutz der Ostsee die Bestände in der Ostsee inzwischen als stark gefährdet einstuft.

Meereswissenschaftler sehen mögliche Ursachen in der vom Klimawandel induzierten Erwärmung der Meere, der dadurch steigenden Eutrophierung in einzelnen Lokationen sowie Krankheitserreger. Wissenschaftliche Studien belegen, dass sich die Wasserqualität an vielen Ostsee-Standorten in den letzten Jahren zwar deutlich verbesserte, eine Wiederansiedlung von Seegraswiesen auf natürlichem Wege, d.h. von alleine, jedoch bisher weitgehend ausblieb.

Das Bundesministerium für Bildung und Forschung unterstützt das von der Leibniz Universität Hannover koordinierte Forschungs- und Entwicklungsprojekt *SeaStore*, ein Pilotprojekt zur Unterstützung der Wiederansiedlung von Seegraswiesen an der deutschen Ostseeküste. Im Fokus stehen insbesondere Grundlagenstudien über die Ökosystemleistungen und den ökologischen Wert von Seegraswiesen.

Das Forschungs- und Entwicklungsvorhaben *Technologieentwicklung zur Aufforstung von Seegraswiesen mittels textilbasierter, Kunststoff-freier Aufwuchsträger* geht davon aus, dass Seegraswiesen einen Wert an sich haben, ohne ihn quantifizieren zu können.

Dieses Projekt ist in erster Linie ein technologieorientiertes Vorhaben, das im Wesentlichen auf Erkenntnisse der naturwissenschaftlichen Meereswissenschaften aufbaut. Projektziel ist es, einen validierten Demonstrator für ein marktreifes Konzept zur Aufforstung von Seegraswiesen mit Hilfe textilbasierter, Kunststoff-freier Aufwuchsträger zu entwickeln, der am Projektende noch genügend Potential zur weiteren Qualifizierung von Technik und Technologie besitzen wird.

Die projektbezogenen technologischen Aufgaben konzentrierten sich auf:

¹Es gibt Literaturquellen, die einen wesentlich höheren Prozentsatz angeben. Die Expertise der Autoren ist in diesem Falle nicht ausreichend, um das beurteilen zu können.

1. die Materialauswahl, Konstruktion, Fertigung und Erprobung des Aufwuchsträgers,
2. die Vorbehandlung, Einbringung und Keimung des Saatgutes unter noch zu schaffenden kontrollierten Bedingungen,
3. die Transportvorbereitung und -durchführung der sich im Aufwuchsträger entwickelten Seegraspflanzen,
4. die Ausbringung der Aufwuchsträger mit den Seegräsern sowie
5. das anschließende, in Abständen zu wiederholende Monitoring der mit Seegräsern ausgebrachten Aufwuchsträger.

Es war von Beginn des Projektes an klar, dass sowohl wissenschaftliches als auch technologisches Neuland beschritten wird.

Das Gesamtergebnis der zweijährigen Projektarbeit lässt sich wie folgt zusammenfassen:

1. Es wurde der Beweis erbracht, dass die Aufforstung von Seegraswiesen nach dem Rollrasenprinzip praktisch umsetzbar ist.
2. Sowohl die weitgehend auf experimentellem Weg ermittelten Forschungsergebnisse als auch das im Projektzeitraum gewonnene Erfahrungswissen stellen eine Erweiterung des bisherigen Stands wissenschaftlicher Erkenntnis und technologischer Praxis dar.
3. Die gewonnenen Ergebnisse wurden auf zwei internationalen wissenschaftlichen Veranstaltungen einem sachkundigen Auditorium vorgestellt und veröffentlicht.
4. Wie bei Forschungs- und Entwicklungsprojekten üblich, die weitgehend Neuland beschreiten, wurde das Projektteam wiederholt mit Herausforderungen konfrontiert, die zuvor nicht bzw. kaum vorhersehbar waren. Insofern sind noch einige Fragen auch am Projektende offen geblieben.

Zusammenfassend sind nachfolgende Vorteile der Rollrasentechnologie gegenüber marktüblicher Einzelpflanzung herauszustellen:

- Aufwuchsträger werden mit hoher Effizienz und Reproduzierbarkeit auf Textilmaschinen produziert,
- Vorkultur aus Samen möglich,
- Aufbau der Seegraswiesen entsprechend vorgegebenem Pflanzenraster und Kundenwunsch an Land realisierbar (Vorkultur),
- Wurzelwachstum und Wachstumsfortschritt der Pflanzen in Vorkulturbecken objektiv bewertbar,
- Hohe Flächenleistung unter Wasser durch Rollrasenprinzip mit Taucherunterstützung, Vernagelung und / oder Beschwerung möglich,
- Modularer Aufbau durch Geometrievielfalt und einfache Verbindungsmöglichkeiten der textilen Halbzeuge realisierbar,
- Befestigung der Matten durch Beschwerung und Vernagelung auch auf grobkörnigen Untergründen möglich und
- Entwicklung halbautomatischer, mechanisierter Installationstechnologien mit Unterwasserrobotik sollten zukünftig möglich sein.

Inhaltsverzeichnis

1	Motivation und Projektziel	8
2	Internationaler Stand wissenschaftlicher Erkenntnis und technologischer Entwicklung	9
2.1	Aspekte zur Bedeutung von Seegraswiesen	9
2.2	Bekannte Projekte zum Monitoring und zur Wiederansiedlung von Seegraswiesen - eine Auswahl	10
2.3	Zusammenfassung wesentlicher Erkenntnisse aus der Literatur	11
3	Methodischer Ansatz für das eigene Projekt, durchgeführte Arbeiten einschl. Tests	13
3.1	Methodischer Ansatz, detaillierte Zielsetzung	13
4	Im Projektzeitraum erreichte Ergebnisse	14
4.1	Ergebnisse bzgl. des Aufforstungsprinzips	14
4.2	Ergebnisse bzgl. der Aufwuchsträger, Details im Abschnitt 7	15
5	Ausblick, zukünftige Aufgaben	16
6	Danksagung	17
7	Anhang - Aufwuchsträger und deren Herstellung	20
7.1	Einführung	20
7.2	Details zum konstruktiven Aufbau der Aufwuchsträger	21
7.2.1	Aufbau strangartiger Strukturen	21
7.2.2	Aufbau gitterartiger Strukturen	21
7.2.3	Aufbau netzartiger Strukturen	22
7.2.4	Aufbau von Vliesstoffen	24
7.3	Detaillierte Angaben zu den im Projekt entwickelten und eingesetzten Aufwuchsträgern, konstruktiver Aufbau und eingesetzte Materialien	25
7.3.1	Strang- und Gitterherstellung aus Naturfaserkardenbändern	25
7.3.2	Strang- und Gitterherstellung aus Seegras	26
7.3.3	Strang- und Gitterherstellung aus Naturfaser- Vliesstoffstreifen	27
7.4	Maschinelle Ausrüstung zur Fertigung ausgewählter Aufwuchsträger	28
8	Anhang - Landseitige Vorbereitung der auszubringenden Aufwuchsträger	31
8.1	Bepflanzung der Aufwuchsträger	31
8.2	Seegrasaufwuchs auf den Aufwuchsträgern unter kontrollierten Bedingungen	32
8.2.1	Technische Voraussetzungen, Laborbedingungen	32
8.2.2	Mess- und Beobachtungsmethoden zum Pflanzenwachstum im Gewächshaus einschl. Ergebnisse	34
9	Anhang - Tests am offenen Gerinne im IGA-Park Rostock	38
10	Installation der Aufwuchsträger auf See und Monitoring	40
10.1	Ausgewählte Seegebiete für die Installation	40
10.2	Installation der Aufwuchsträger	42
10.3	Monitoring	43

11 Anhang - Nutzung von Saatgut	45
11.1 Zukünftige Forschungsvorhaben zur Behandlung des Saatgutes unter kontrollierten Bedingungen	45
11.1.1 Beschaffung von Seegrassamen im Sommer 2022 für Frühjahr 2023 .	45
11.1.2 Forschungsarbeiten zur Keimung von Seegras-Samen nach Behandlung mit Alginaten	46
11.1.3 Planung und Umsetzung einer <i>Zostera marina</i> Kultur an der Universität Rostock zur Samenproduktion	46
11.2 Erste Ideen zur Einbringung von Saatgut in die Aufwuchsträger	47
11.2.1 Herausforderungen im Umgang mit Seegras-Saatgut	47
11.2.2 Technologischer Ansatz für die Einarbeitung / Zuführung von Saatgut während der Herstellung der Aufwuchsträger	48
11.3 Konzeptioneller Ansatz zur Ausbringung der Aufwuchsträger ohne Tauchereinsatz	50

Abbildungsverzeichnis

1	Prinzipieller Aufbau der entwickelten strangartigen Strukturen	22
2	Aus Hanf gefertigter Strang. Der weitgehend parallele Verlauf der Hanffasern ist deutlich sichtbar. Ebenso sind ein Leitfaden links im Bild sowie der Maschenmantel zu erkennen.	23
3	Aus getrocknetem Seegras gefertigter Strang. Die Struktur von getrocknetem Seegras ist mit der von zerknittertem Lametta vergleichbar. Die Schenkellängen des Maschenmantels sind in Bezug auf den Strangdurchmesser kleiner.	23
4	Grundaufbau der im Projekt entwickelten gitterartigen textilen Strukturen. Die Hauptelemente sind die Kette bzw. der Maschenfaden, im Bild senkrecht angeordnet, sowie der aus dem Strang gebildete Schussfaden. . .	24
5	Vergleich zwischen zwei gitterartigen Strukturen, die zwar aus den gleichen Ausgangsmaterialien bestehen (Kette ist aus Viskose, Schussfaden ist aus Hanf hergestellt) aber unterschiedliche Abstände zwischen benachbarten Schussfäden aufweisen.	24
6	Fadenverlauf der einzelnen Fadensysteme bei netzartigen Konstruktionen auf der Wirkmaschine (links), 3D Darstellung der Netzkonstruktion	25
7	Strangherstellung aus Hanf Kardenbändern	26
8	RR- Wirk-Maschine <i>GWM 1200</i> —grob zur Herstellung der gitterartigen Seegrasstrukturen	27
9	links: Vliesstoffstreifen aus Hanf-Flachsgemisch, rechts: strangkörnige Kernmantelstruktur	27
10	Vliesstoffgitter aus Hanf-Flachs-Gemisch, links: bestehend aus Vliesstoffstreifen, rechts: bestehend aus strangförmiger Kernmantelstruktur, vergl. Abbildung 9	28
11	<i>KEMAFIL</i> -Maschine mit einem Kopfdurchmesser von 30 mm	29
12	RR-Kettenwirkmaschine <i>GWM 1200</i> zur Herstellung von gitter- und netzartigen Strukturen	29
13	Vliesstofflaboranlage bestehend aus Krempel und mechanischer Verfestigung in Form einer Dilo Nadelmaschine	30
14	Bepflanzter Strang ohne zusätzliche Garnbindung, hier: Aufwuchsträger aus Seegras	31
15	Fertigung der Becken aus Baumarkt-Halbzeugen	32
16	Herr David Riedinger vom Institut für Ostseeforschung Warnemünde versucht mit Wathose und Milchkanne bei winterlichen Temperaturen Ostseewasser am Strand von Warnemünde zu schöpfen	33
17	Blick in die angemietete Kalthalle mit Becken zur Vorkultur	34
18	Mit Pflanzen bestückte steppmattenartige Aufwuchsträger, hier Seegras als Grundmaterial	35
19	Überlebensrate der Pflanzen auf den Aufwuchsträgern	35
20	Blattlänge (in cm) und Blattzahl der Pflanzen auf den Aufwuchsträgern . .	36
21	Samenansätze einer Seegras-Pflanze	36
22	Begutachtung und Vermessung der Seegraspflanzen im Gewächshaus am 2. März 2022	37
23	Monitoring im Gewächshaus am 2. März 2022	37
24	Das offene Gerinne im IGA-Park Rostock-Schmarl vom Mai bis Oktober 2023	38

25	Daten der Laboruntersuchungen zum Wasserkörper im offenen Gerinne . .	39
26	Manuell eingesetzte (l.) und während des Herstellungsprozesses "eingewebte" Pflanzen (r.)	40
27	Position des künstlichen Riffs Rosenort	41
28	Mäanderförmige Anordnung der Aufwuchsträger in Bottichen für Trans- port und Installation	43
29	Fächerartige Anordnung der Aufwuchsträger	43
30	Erdnagel aus Bewehrungsstahl	44
31	Bei der Erstinstallation lagen die Aufwuchsträger auf dem Meeresboden . .	44
32	Links: Seegras-Halm mit noch unreifen Samen, Rechts: belüftetes Becken mit mehreren Seegras-Pflanzen mit Seegras-Samen (Fotos: D. Glück) . . .	45
33	Aufbau einer Kultivierungsanlage an der Universität Rostock. Diese besteht aus Glaskanälen mit einer Wassersäule von mindestens 20 cm Höhe und kann gekühlt werden. In diese Becken werden Treibsel-Pflanzen eingesetzt. (Foto: D. Glück)	46
34	Seegras-Pflanzen, die als Treibsel am Strand von Warnemünde (Rostock) gefunden wurden (Foto: D. Glück)	47
35	Einarbeitung einer Saatgutschnur in einen vorgefertigten Seegrastrang . . .	49
36	Konzept zur Einarbeitung von Saatgutschnüren	49
37	Konzeptioneller Ansatz für Verlegehilfe	50

1 Motivation und Projektziel

Es ist durch zahlreiche nationale und internationale wissenschaftliche Publikationen hinreichend bewiesen, dass ausgedehnte Seegraswiesen in Küstengebieten und Ästuarien positive wirtschaftliche einschl. sozioökonomische, ökologische sowie gesundheitsfördernde Auswirkungen haben.

Seegraswiesen der Art *Zostera marina* - sofern in ausreichender Dichte, örtlicher Ausdehnung und entsprechender Blattlänge vorhanden - dissipieren beispielsweise die kinetische Energie der bodennahen Meeresströmung mit dem Ergebnis, dass Kolkbildungen an Küstenschutzbauwerken, Seekabeltrassen, Pipelines, etc., Versandungen von Fahrrinnen oder Erosionen an Küstenabschnitten verhindert oder zumindest erfolgreich reduziert werden.

Die Sauerstoff-Kohlenstoff-Bilanz von Seegras ist um ein Vielfaches besser als die von Regenwäldern. Weil Seegräser neben anderen vegetationsreichen Ökosystemen im Gezeiten- und Flachwasserbereich den als CO_2 im Wasser gelösten Kohlenstoff dauerhaft speichern, stehen sie als marine Kohlenstoffspeicher auf dem Weg zur Dekarbonisierung unserer Umwelt im Fokus der naturwissenschaftlichen Meereswissenschaften.

Jüngste Forschungsergebnisse lassen vermuten, dass Seegraswiesen auch die Ausbreitung von gesundheitsschädigenden Bakterien der Art *Vibrionidae* deutlich einschränken, was für Badende bei sommerlichen Temperaturen in der Ostsee zweifelsfrei vorteilhaft wäre.

Diese positiven Effekte werden durch den seit Jahrzehnten beobachteten deutlicher Rückgang der Seegraswiesen in der nördlichen Hemisphäre erheblich eingeschränkt. Die Ursachen hierfür sind vielschichtig - globale Erwärmung, lokale Eutrophierungen, Krankheiten. Wenngleich in manchen Meeresregionen eine Stagnation des Rückgangs zu beobachten ist, so schätzen Fachleute dennoch ein, dass eine natürliche Wiederansiedlung mehrere Jahrzehnte in Anspruch nehmen wird. Aus diesem Grunde wird die Entwicklung und Anwendung so genannter Wiederansiedlungshilfen in zahlreichen Ländern als notwendige Maßnahme propagiert.

Vor diesem Hintergrund entwickelten die Autoren eine ökologisch und betriebswirtschaftlich nachhaltige Technologie zur Wiederaufforstung von Seegraswiesen mittels textiler, Kunststoff-freier Aufwuchsträger. Grundlage des technologischen Ansatzes ist das bekannte Rollrasen-Prinzip. Jungpflanzen werden auf speziell entwickelten textilen, Kunststoff-freien Aufwuchsträgern in gärtnerischer Weise verpflanzt und unter kontrollierten Bedingungen - bisher an Land - vorkultiviert. Nach einer zeitlich befristeten Periode von wenigen Wochen werden die Aufwuchsträger mit den Pflanzen auf dem Meeresboden ausgebracht. Ziel ist es, dass die Pflanzen dann möglichst rasch in den Meeresboden hineinwachsen. Sobald die Pflanzen ausreichend im Sediment verwurzelt sind, haben die Aufwuchsträger ihre Aufgabe erfüllt und sollen dann biologisch rückstandslos abgebaut werden. Diese Prozesse zu beobachten ist Aufgabe regelmäßiger Monitorings.

Die Ergebnisse mehrerer Testserien bei der landseitigen Vorkultur sowie die Installation auf verschiedenen Lokationen der Ostsee belegen die Praktikabilität dieser Technologie. Allerdings muss auch eingeschätzt werden, dass eine großskalige Anwendung dieser Technologie im zurückliegenden Projektzeitraum nicht erreicht werden konnte. Während die Bereitstellung geeigneter Aufwuchsträger unproblematisch ist, gibt es bei der zeitlich angemessenen Verfügbarkeit nutzbarer Seegraspflanzen in ausreichender Anzahl sowie bei der erforderlichen Vorkultur noch quantitative Einschränkungen, die es in der Zukunft zu überwinden gilt.

2 Internationaler Stand wissenschaftlicher Erkenntnis und technologischer Entwicklung

2.1 Aspekte zur Bedeutung von Seegraswiesen

Seegraswiesen fördern Biodiversität und bieten wichtige Ökosystemleistungen wie Kohlenstoffbindung und Sedimentstabilisierung, die für den Klima- und Küstenschutz von großer Bedeutung sind. Im folgenden seien nur einige Details dazu ausgeführt.

Bei der Suche nach geeigneten Kohlenstoffspeichern zur Senkung des klimaschädlichen Kohlendioxids (CO_2) spielen die Ozeane und Randmeere eine entscheidende Rolle. In der von *Oschlies et al.* verfassten und von der Deutschen Allianz Meeresforschung (DAM) jüngst herausgegebenen Broschüre [10] "**Gezielte Kohlendioxid-Entnahme** - Welche Möglichkeiten meeresbasierte Verfahren bieten und wie diese erforscht werden" wurde die Bedeutung vegetationsreicher Küstenökosysteme als Kohlenstoffspeicher in beeindruckender Weise herausgearbeitet.

Wörtlich zu lesen ist dort u.a.: "*Bei der Suche nach Wegen, die Kohlendioxid-Aufnahme des Ozeans zu verstärken, fällt der Blick zunächst auf unsere Küstenlebensräume - wichtige Schlüsselakteure im Kohlenstoffkreislauf des Meeres. Hierzu gehören vor allem vegetationsreiche Ökosysteme im Gezeiten- und Flachwasserbereich (bis 40 Meter Wassertiefe) wie Salzmarschen, Seegraswiesen, Mangoven- und Tang- oder Kelpwälder. Ihre Verbreitungsgebiete machen zusammengenommen weniger als ein Prozent der weltweiten Meeresfläche aus, die Gezeitenzone mit eingeschlossen. Gemeinsam sind die Wiesen und Wälder des Meeres jedoch für einen signifikanten Teil des im Meeresboden eingelagerten Kohlenstoffs verantwortlich. Salzmarschen, Seegraswiesen, Mangroven- und Tangwälder gelten als hochproduktive Ökosysteme und Kohlenstoffsinken. Im Zuge ihrer Photosynthese nehmen sie Kohlendioxid aus der Atmosphäre und aus dem Meerwasser auf und binden den darin enthaltenen Kohlenstoff*"

Es ist wissenschaftlich erwiesen, dass Salzwiesen, Mangroven und Seegraswiesen große Mengen an Kohlenstoff anhäufen. In der Literatur wird darauf verwiesen, dass die Dicke derartiger Lagerstätten mitunter zehn und mehr Meter betragen kann. Solange die entsprechenden Ökosysteme gesund sind, bleiben diese Lagerstätten Jahrhunderte, mitunter sogar Jahrtausende erhalten, siehe *Meyer & Nehring* [8], *Oschlies et al.* [10] und *Reusch* [17].

Seegraswiesen sind nicht nur wegen ihrer Fähigkeit große Kohlenstoffmengen speichern zu können bedeutsam; sie verhindern zudem auch Kolkbildungen an Küstenbauwerken und Küstenschutzeinrichtungen, vermindern Erosionen am Meeresboden und an Strandaabschnitten mit den damit verbundenen Folgen. Ohne an dieser Stelle auf weitere technische Details einzugehen wird auf entsprechende wissenschaftliche Arbeiten verwiesen, siehe *Baden & Boström* [1], *Habrecht* [6], *Menzel & Paschen* [7] sowie *Paschen & Wranik* [11].

Seegraswiesen erbringen einer jüngst veröffentlichten Studie von Forschenden des Helmholtz-Zentrums für Ozeanforschung Kiel GEOMAR zufolge eine weitere Ökosystemleistung für uns Menschen. *Reusch et al.* [18] fanden heraus, dass heimische Seegraswiesen auch die Wasserqualität in Bezug auf potenziell gefährliche Bakterien verbessern können: Wasser

aus den dicht bewachsenen untermeerischen Flächen enthält weniger Vibrionen - natürlich vorkommende Bakterien, die in hohen Konzentrationen gesundheitsschädlich sein können.

2.2 Bekannte Projekte zum Monitoring und zur Wiederansiedlung von Seegraswiesen - eine Auswahl

Seegraswiesen sind seit wenigen Jahren ein beherrschendes Thema der Meereswissenschaften im In- und Ausland. In wissenschaftlichen Zeitschriften sowie im Internet sind zahlreiche Publikationen und wissenschaftliche Beiträge zum Thema Seegraswiesen zu finden. Diese reichen von der reinen Kartierung von Seegraswiesen-Vorkommen (z.B. *Schubert et al.* [19], [20] und *Strydom et al.* [21]) über Analysen zum Einfluss physikalischer und chemischer Parameter auf deren Entwicklung (z.B. *Baden und Boström* [1], *Bittick* [2] und *Reusch* [17]) bis hin zu Studien, die sich auf die Renaturierung von Seegrasfeldern fokussieren.

Auszugsweise sollen einige Arbeiten etwas näher betrachtet werden, da einzelne Ergebnisse für das eigene Projekt eine gewisse Relevanz besitzen:

Bittick [2] berichtet über ihre Untersuchungen in der *Boundary Bay*, der größten Seegraswiese in Kanadas Pazifikregion. Diese ist aufgrund ihrer Lage am *Pacific Flyway* international als wichtiges Mündungsgebiet für Zugvögel anerkannt. Schwerpunkt ihrer Untersuchungen ist zum einen der Gesundheitszustand der vorhandenen Seegrasfelder unter dem Einfluss landwirtschaftlicher Einleitungen und der Stoffwechselprodukte durch den Vogelzug. Zum anderen geht es ihr um eine ganzheitliche Analyse der Entwicklung / Reaktion des gesamten Ökosystems (einschließlich Mikrokosmos) bei gezielter Einbringung von definierten Nährstoffen quasi als Störgröße. Dazu werden kleine, aus alten Damenstrümpfen gefertigte Säckchen mit einer bestimmten Nährstoffart gefüllt und im Seegrasfeld positioniert. Diese Säckchen sorgen für eine nur langsame und regional beschränkte Ausbreitung. Die Reaktionen des gesamten Mikrokosmos wurden über einen längeren Zeitraum aufgezeichnet und anschließend bewertet.

In dem gemeinsamen Projekt **SeaStore** des Ludwig-Franzius-Instituts und des Instituts für Kunststoff- und Kreislaufttechnik der Leibniz Universität Hannover sowie des Helmholtz-Zentrums für Ozeanforschung Kiel GEOMAR untersuchen die beteiligten Partner verschiedenartige Möglichkeiten zur Wiederansiedlung von Seegraswiesen. Dazu führen sie Experimente sowohl auf Restaurationsversuchsflächen an der Ostseeküste Schleswig-Holsteins als auch im Wellenbecken sowie in einem Strömungskanal der Leibniz Universität durch. Ein Schwerpunkt widmet sich der Klärung geeigneter Wiederansiedlungsmethoden. Auf der Homepage zu diesem Projekt² heißt es wörtlich: "Dabei geht es beispielsweise um die Fragen, wie dicht Seegras-Sprösslinge gepflanzt werden müssen, um den gewünschten Sedimentationseffekt herbeizuführen und welche Rolle die neu entwickelte SeaStore-Anwuchshilfe hierbei spielen könnte. Diese soll, wie ihr Name schon sagt, neu gepflanzten Gräsern helfen, der Kraft von Strömungen und Wellenschlag zu trotzen, sodass aus wenigen Sprösslingen alsbald große, gesunde Seegraswiesen entstehen können".

Leider werden die oben erwähnten "Anwuchshilfen" nicht weiter beschrieben. Die Darstellungen sind jedoch so zu interpretieren, dass die einzelnen Pflanzen per Hand durch Taucher in das Sediment eingesetzt werden, wie Fernsehberichte über Aktivitäten des

²<https://www.seegraswiesen.de/de/forschungsprojekt/forschungsfragen/>

GEOMAR dokumentieren. Anschließend wird eine Anwuchshilfe zum Schutz der Pflanzen vor Strömung und Seegang angebracht.

Das in Wales und Schottland beheimatete *PROJECT SEAGRASS* existiert bereits seit zehn Jahren. Ziel dieses Projekts ist es, "einen gesellschaftlichen Wandel herbeizuführen, um die Anerkennung, Wiederherstellung und Widerstandsfähigkeit von Seegrasökosystemen weltweit zu ermöglichen und durch biologische Vielfalt für gerechte und nachhaltige Lebensgrundlagen zu sorgen"³. Im Rahmen dieses Projektes werden u.a. Seegraspflanzen auch aus Saatgut in großen Teichen herangezogen, wie man sie typischerweise aus der Karpfenzucht her kennt⁴.

An der *Universität Groningen*, Niederlande, laufen u.a. Forschungsarbeiten zur Wiederherstellung von subtidalem Seegras im niederländischen Wattenmeer. Dazu werden Seegraspflanzen genutzt, die zuvor in dänischen Gewässern geerntet wurden. Die Pflanzen werden für Experimente in Klimakammern und Gewächshäusern der Universität verwendet. Danach werden sie im niederländischen Teil des Wattenmeeres ausgepflanzt. Die Anpflanzung erfolgt auch hier manuell.

Die Firma *Salix (Sales and Croxton Nursery)* aus Thetford im britischen Norfolk, hat sich auf Produkte zur Flussrenaturierung, zum Erosionsschutz und zur Verbesserung von Lebensräumen spezialisiert. Unter anderem bietet sie auch aus Kokosfasern hergestellte schwere großmaschige Netze an. Diese werden über zuvor per Hand in den Meeresboden eingepflanzte Seegräser und andere Wasserpflanzen gelegt, um insbesondere Erosionen am Meeresboden zu unterbinden. Die Firma wirbt damit, dass es sich hierbei um einen langlebigen Erosionsschutz handelt⁵. Auch hierbei müssen die Seegräser und andere Pflanzen zuvor manuell in den Meeresboden gepflanzt werden. Kokosfasern sind nach allgemeiner Auffassung ökologisch unbedenklich; sie sind jedoch langlebig und verbleiben demzufolge über einen langen Zeitraum als vollständige Netzstruktur im Meer.

2.3 Zusammenfassung wesentlicher Erkenntnisse aus der Literatur

- Es konnten bisher keine Publikationen oder sonstigen Hinweise gefunden werden, die die Anwendung von Aufwuchsträgern zur Aufforstung von Seegraswiesen zum Gegenstand haben. Alle bisher bekannten Verfahren basieren auf einer manuellen Bepflanzung durch Taucher.
- Die relative Häufigkeit von Seegraswiesen liegt in der westlichen Ostsee zwischen einem und vier Metern Wassertiefe. Danach ist ein erheblicher Rückgang erkennbar, siehe *Schubert et al.* [19]
- Licht ist eines der wichtigsten Umweltfaktoren für das Wachstum und das Überleben von Seegras und daher eine wesentliche Messgröße bei der Auswahl geeigneter Standorte für die Ansiedlung, siehe *Eriander* [4]
- Die Studie [4] zeigt, dass die Verwendung von Sprossen erfolgreich zur Wiederherstellung von Seegras in schwedischen Breitengraden eingesetzt werden können. Das Überleben und das Wachstum von unverankerten Einzelsprossen, die ohne Sediment in flache Lebensräume (1,0 m bis 1,5 m) verpflanzt wurden, waren sehr hoch (> 500

³<https://www.projectseagrass.org/> Übersetzung aus dem Englischen durch die Autoren

⁴Die Leiterin der *Seagrass Nursery*, Emily Yates, hatte sich bereit erklärt (E-Mail vom 15.07.2023) dem Projekt für Laborversuche 1.000 Seegrassamen zur Verfügung zu stellen. Jedoch scheiterte das Vorhaben offensichtlich an geltenden Ausführungsbestimmungen des britischen Zollrechts.

⁵Aus Kokosfasern gefertigte Netze werden - auch anderenorts - nicht nur im Wasserbau sondern auch im terrestrischen Bereich u.a. zur Stabilisierung von Böschungen erfolgreich eingesetzt.

% Zunahme der Sprossdichte nach 14 Monaten). Diese Wiederherstellungsmethode zeigte eine 2 bis 3,5-mal höhere Wachstumsrate und war 2 bis 2,5-mal schneller als im Sediment verankerte Triebe bzw. in Sedimentkerne verpflanzte Triebe und wird für flache Lebensräume in Schweden empfohlen.

In tieferen Lebensräumen (3,0 m bis 4,5 m) war das Wachstum aufgrund von Lichtmangel und hoher Wintersterblichkeit deutlich geringer (40 % Rückgang bis 50 % Zunahme).

Bei der Wiederansiedlung mit Hilfe von Samen, die in Netzsäcken ausgebracht wurden, waren die Etablierungsraten der Sämlinge sehr niedrig (etwa 1 %), so dass diese Methode weniger kosteneffizient ist als die Verpflanzung einzelner Pflanzen.

- Muscheln fördern das Wachstum von Seegras, siehe *Reusch et al.* [16]
- Ein Pflanzabstand von 20 cm bis 25 cm hat einen positiven Einfluss auf die Ausbreitungsgeschwindigkeit und hält die anfängliche Mortalitätsrate gering.
Die Verwendung von Saatgut auf der Lokation wird immer wieder als wenig erfolgreich beschrieben, siehe *Meyer et al.* [8].

3 Methodischer Ansatz für das eigene Projekt, durchgeführte Arbeiten einschl. Tests

3.1 Methodischer Ansatz, detaillierte Zielsetzung

Das Entwicklungsvorhaben hat zum Ziel, ein validiertes technologisches Konzept zur Aufforstung von Seegraswiesen in der Ostsee zu erarbeiten, das sowohl aus ökologischen als auch aus betriebswirtschaftlichen Gesichtspunkten geeignet und akzeptabel ist.

Die bisherige Aufforstungspraxis beruht im Wesentlichen auf einem manuellen Einsetzen einzelner adulter Pflanzen in den Meeresboden durch Taucher. Diese Vorgehensweise ist mit dem manuellen Reisanbau in den Staaten Südostasiens vergleichbar. Sie ist mit einem hohen manuellen und zeitlichen Aufwand verbunden. Insofern sind zur Bepflanzung größerer Flächen andere Konzepte von Vorteil.

Hier setzt das Projekt an. Es orientiert sich an dem Rollrasenprinzip. Dieses sieht vor, dass das Seegras unter weitgehend kontrollierten Bedingungen auf textilen, Kunststoff-freien Aufwuchsträgern aufwächst. Die Pflanzen werden, sofern sie dann robust genug sind, gemeinsam mit dem Aufwuchsträger aufgerollt, im aufgerollten Zustand zum zuvor bestimmten Seegebiet transportiert und dort innerhalb kurzer Zeit unter Wasser ausgebracht. Die mit den Seegraspflanzen bewachsenen Aufwuchsträger werden mit Erdnägeln am Meeresboden fixiert. Zur Überwachung des Wachstumsfortschritts ist ein regelmäßiges Monitoring erforderlich.

Der technologische Ablauf des gesamten Prozesses lässt sich wie folgt grob in der nachfolgenden Struktur darstellen:

1. Entwurf und Herstellung geeigneter textilbasierter, Kunststoff-freier Aufwuchsträger, Details dazu im Anhang, Abschnitt 7,
2. Bepflanzung der Aufwuchsträger mit Seegraspflanzen bzw. Einbringen von Saatgut in die Aufwuchsträger, Details dazu im Anhang, Abschnitt 8.1,
3. Seegrasaufwuchs auf den Aufwuchsträgern unter kontrollierten Bedingungen, Details dazu im Anhang, Abschnitt 8.2,
4. Vorbereitung der bepflanzten Aufwuchsträger für den Transport,
5. Festlegung der zu bepflanzenden Flächen, hier speziell Lokationen in der Ostsee,
6. Ausbringung der bepflanzten Aufwuchsträger und deren Fixierung auf dem Meeresboden, Details dazu im Anhang, Abschnitt 10.2,
7. wiederholtes Monitoring durch Forschungstaucher oder mittels ferngesteuerter Unterwasserapparate (ROV's), Details dazu im Anhang, Abschnitt. 10.3

Es liegt auf der Hand, dass jeder dieser Schritte zwangsläufig mit vielschichtigen Aufgaben verbunden ist. Sie umfassen biologische, ingenieurwissenschaftliche, ökologische, ggf. auch rechtliche Fragestellungen.

4 Im Projektzeitraum erreichte Ergebnisse

4.1 Ergebnisse bzgl. des Aufforstungsprinzips

1. Es konnte im Rahmen von Labor- und Feldexperimenten in der südlichen Ostsee der Beweis erbracht werden, dass die Aufforstung von Seegraswiesen nach dem Rollrasenprinzip mit Hilfe textiler, Kunststoff-freier Aufwuchsträger praktisch umsetzbar, d.h. erfolgversprechend ist.
2. Es konnte der Beweis erbracht werden, dass lebende robuste Seegraspflanzen, die aus Treibsel gewonnen werden, für die Aufforstung noch geeignet sind.
3. Eine ca. vierwöchige Vorkultur der Pflanzen unter kontrollierten Bedingungen ist eine notwendige Voraussetzung, damit diese Wurzel in den jeweiligen Aufwuchsträger treiben können. Letztes ist entscheidend für eine erfolgreiche Aufforstung. Ansonsten besteht die Gefahr, dass die Pflanzen im Meer durch Strömung oder Seegang rasch aus dem Aufwuchsträger herausgerissen werden.
4. Das Ausbringen und Fixieren der vorkultivierten Aufwuchsträger auf dem Meeresboden durch Forschungs- oder Berufstaucher ist unproblematisch.
5. Die in Feldversuchen bei Wassertiefen von ca. sieben Metern erreichten Ergebnisse machten deutlich, dass die hier anzutreffende Lichtintensität dauerhaft für eine gesunde Entwicklung von neu angelegten Seegraswiesen unzureichend ist. Zukünftig sind Wassertiefen im Bereich von 1 m bis 3 m zu bevorzugen⁶.
6. Eine Überwachung des Wachstums einzelner Pflanzen im Meer durch kamerabestückte ROV's (Remotely operated vehicles) gestaltet sich gegenwärtig noch schwierig⁷, weshalb derartige Monitoringaufgaben mittelfristig noch durch fachlich einschlägig qualifizierte Taucher erfolgen sollte.
7. Insgesamt darf konstatiert werden, dass sowohl die weitgehend auf experimentellem Weg ermittelten Forschungsergebnisse als auch das im Projektzeitraum gewonnene Erfahrungswissen eine Erweiterung des bisherigen Stands wissenschaftlicher Erkenntnis und technologischer Praxis darstellen.

⁶*Zostera marina* kommt gemäß der Studie von Schubert, Steinhardt, Schanz [19] in Wassertiefen von < 1m bis 16,6m vor. Aus der zitierten Arbeit geht hervor, dass ca. 17 Prozent aller *Zostera marina* Vorkommen in Wassertiefen zwischen 5m und 8m entdeckt wurden. Im Rahmen der Projektes konzentrierten sich die Arbeiten auf Wassertiefen um zumeist 7m. Das führte auf Grund der vorliegenden statistischen Datenlage a priori nicht zu einem sachlichen Widerspruch. Dennoch muss beachtet werden, dass neben der zweifelsfrei notwendigen Lichtdichte / Lichtintensität und dem Lichtspektrum auch andere Einflussgrößen "passen müssen", wie beispielsweise hydrologische (Strömung und Seegang) und andere physikalische Parameter (z.B. Temperatur, gelöster Sauerstoff, Salinität) wie auch chemische (z.B. pH-Wert). Aus der Botanik ist bekannt, dass Pflanzen durchaus mit "Stress" im Sinne von Abweichung vom Optimum umgehen können, wenn insbesondere die Anzahl der Stressfaktoren gering gehalten werden kann. Das heißt für die zukünftige Arbeit: Wenngleich die Richtigkeit des technologischen Konzepts durch das Projekt nachweisen werden konnte, heißt das nicht zwangsläufig, dass das Seegras unter allen Umständen anwachsen muss. So wurde im August 2022 die sich gut entwickelnde Wiese am Riff Nienhagen beispielsweise ein Opfer eines ungünstigen Sturmereignisses. Für kommenden Perioden empfehlen die Autoren deshalb, für die Aufforstung von Seegraswiesen sich auf solche Lokationen zu fokussieren, die offensichtlich optimale bzw. bessere Bedingungen liefern. Das sind insbesondere solche Lokationen, die als Seegrasgebiet bekannt sind. Inwiefern derartige Lokationen auch von zuständigen Ämtern als Ansiedlungsfelder tatsächlich freigegeben werden, muss im Einzelnen noch geklärt werden.

⁷Die ROV's können aus Sicherheitsgründen mit ihren Kameras nicht nahe genug an das einzelne Blatt heranfahren. Wassereintrübungen insbesondere in den Sommermonaten machen den Einsatz von Teleobjektiven nahezu unmöglich.

4.2 Ergebnisse bzgl. der Aufwuchsträger, Details im Abschnitt 7

Nachdem Glück [5] unter Laborbedingungen den grundsätzlichen Beweis dafür erbrachte, dass Seegrassaatgut auf Aufwuchsträgern, die aus monofilen Polyamid-basierten Fasern bestehen, ebenso gut keimt wie auf sandigem Meeresboden, wurden aus dieser Erkenntnis weitergehende Untersuchungen mit folgenden Ergebnissen durchgeführt:

1. Eine Substitution des bisherigen, aus Polyamiden gefertigten Trägermaterials durch einheimische, für den Entwicklungsprozess von Seegraspflanzen geeignete Naturstoffe ist möglich und sinnvoll,
2. Das im Rahmen von Labor- und Feldexperimenten gewonnene Erfahrungswissen ermöglicht bereits heute zielführende Entscheidungen über den optimalen Aufbau von Aufwuchsträgern unter dem Aspekt Funktionalität, Verfügbarkeit und Anwendbarkeit zu treffen.
3. Es liegen Erfahrungen vor bzgl. einer kostengünstigen Fertigung und Bereitstellung textiler Kunststoff-freier Aufwuchsträger vor.

Punkt 1 wurde neben der notwendigen Verträglichkeit insbesondere unter dem Aspekt kurzer Beschaffungswege und regelmäßiger Verfügbarkeit betrachtet und analysiert. Aus derzeitiger Sicht kommen deshalb insbesondere nachwachsende Rohstoffe aus der regionalen Landwirtschaft oder Seegrass in Form von Treibsel in Betracht.

Im Fokus des Punktes 2 standen insbesondere solche Fragestellungen, die sich mit der technologischen Eignung der unter Punkt 1 identifizierten Naturstoffe als materielle Basis der Aufwuchsträger befassten. So war u.a. zu klären, ob die jeweilig untersuchten Aufwuchsträger-Konstruktionen für eine maschinenunterstützte oder eher eine manuelle Bepflanzung bzw. Einsaat geeignet sind. Ebenso war beispielsweise zu klären, ob einzelne Konstruktionen überhaupt die erforderlichen mechanische Eigenschaften insbesondere unter Feldbedingungen über einen definierten Zeitraum aufbringen. Gleichzeitig konnte festgestellt werden, dass die Geometrie der Aufwuchsträger einen Wasser- und somit auch einen Gasaustausch zwischen Sediment und Wasserkörper zulassen muss, um die Bildung toxischer Schwefel-Wasserstoff-Verbindungen zwischen Sediment und Aufwuchsträger zu verhindern.

Die Marktreife einer neuen Technologie definiert sich insbesondere auch über die Kosten und die Verfügbarkeit der ihr zugrundeliegenden Materialien (Punkt 3). In diesem Kontext wurden die in der Textilindustrie einschlägig bekannten Herstellungsverfahren auf deren Verwendbarkeit hinsichtlich der Herstellung verschiedener Aufwuchsträger-Konstruktionen analysiert und im Rahmen von unterschiedlichen Testproduktionen geprüft.

Für die Aufforstung sind 20 vorkultivierte Pflanzen je Quadratmeter Aufwuchsträger als kalkulatorische Größe anzusetzen. Gegenwärtig werden diese noch manuell aus Treibsel nach Starkwindereignissen vom Strand gewonnen. D.h., es besteht zudem noch eine erhebliche jahreszeitliche Abhängigkeit in der Bereitstellung geeigneter Pflanzen.

Zur Beurteilung des zu erwartenden betriebswirtschaftlichen Ergebnis gehören insbesondere auch die Berücksichtigung der Kosten für Schiffs- und Tauchereinsätze. Auch hier liegen inzwischen entsprechende Erfahrungen vor.

Fazit:

Es ist gelungen, aus verschiedenen Ausgangsmaterialien unterschiedliche Aufwuchsträger-Konstruktionen herzustellen und diese mit manuell eingesetzten Seegraspflanzen zu bestücken. Die manuelle Bestückung erfolgte im Rahmen des Projekts weitgehend durch

Mitarbeiterinnen und Mitarbeiter einer geschützten Werkstatt in Rostock. Bisherige Ergebnisse aus Felduntersuchungen zeigen erwartungsgemäß, dass unterschiedliche Materialien durchaus zu unterschiedlichen Ergebnissen beispielsweise bzgl. der Aufrechterhaltung einer notwendigen Festigkeit führen können.

Eine maschinenunterstützte oder auch automatisierte Saatguteinbringung während der Herstellung des Aufwuchsträgers oder nach dessen Fertigung ist von Interesse. Es liegen erste Ideen zur Umsetzung bereits vor. Jedoch ist die automatisierte Saatguteinbringung nicht Gegenstand des Projekts und würde den zeitlichen und finanziellen Projektrahmen sprengen.

Für die Beurteilung der betriebswirtschaftlichen Kalkulation wurde ein firmeneigener Algorithmus auf Excel-Basis entwickelt. Er ermöglicht die Identifikation kostenintensiver Positionen im gesamten Aufforstungsvorhaben. Diese sind auch die Basis für zukünftige Entwicklungsarbeiten.

5 Ausblick, zukünftige Aufgaben

Mittelfristiges Ziel ist es, mit dieser Technologie einen solchen technologischen Stand zu erreichen, damit sie auch als Ausgleichsmaßnahme für meerestechnische Baumaßnahmen, wie z.B. Installation von Offshore-Windparks, Kabeltrassen, Pipelines, etc. Anwendung finden kann. Das setzt u.a. voraus, dass

1. ausreichend große Meeresareale im Flachwasserbereich für Aufforstungszwecke durch zuständige Behörden freigegeben werden und
2. vorkultivierte Aufwuchsträger rechtzeitig und in ausreichender Menge verfügbar sind.

Punkt 1 setzt eine in Zukunft intensivere Zusammenarbeit mit der Landespolitik und zuständigen Behörden und Ämter voraus.

Um die im Rahmen des Projekts erfolgreich validierte Methode zur Aufforstung von Seegraswiesen nach dem Rollrasenprinzip mittels textiler Kunststoff-freier Aufwuchsträger erfolgreich und zuverlässig am Markt etablieren zu können, ist die Vorkultur als technologisches "Nadelöhr" konzeptionell zu verändern. Das bezieht sich sowohl auf die zeitliche Verfügbarkeit als auf den derzeitigen manuellen Herstellungsaufwand von Vorkulturen.

Als eine dringende, zeitlich rasch zu lösende Aufgabe sehen die Autoren deshalb den Aufbau und den Betrieb einer Aquakultur zur Zucht von Seegraspflanzen und -saatgut an, um zukünftig stets ausreichend Pflanzen und möglichst auch Saatgut verfügbar zu haben und unabhängig von Wetterereignissen zu sein. Hierbei ist auch die Aufgabe zu lösen, die Vorkultur als Teilprozess in die Aquakultur zu integrieren.

6 Danksagung

Die Autoren danken der Stiftung Klima und Umwelt Mecklenburg-Vorpommern für die großzügige Förderung dieses Forschungs- und Entwicklungsprojekts.

Frau Christin Klinger und Herrn Dr. Sebastian Kalden von der Stiftung sind wir für die stets vertrauensvolle Zusammenarbeit zu besonderem Dank verpflichtet.

Gleichermaßen danken wir den Mitgliedern des Projektbeirats Frau Dr. Heike Illing-Günther (STFI), Frau Petra Mahnke (GMT) und Herrn Prof. Dr. Hendrik Schubert (Universität Rostock) für ihre fruchtbare Unterstützung.

Frau Dipl.-Ing. Andrea Schmidt vom Staatlichen Amt für Landwirtschaft und Umwelt Mittleres Mecklenburg danken wir für zahlreiche sachdienliche Hinweise während der Projektphase.

Der Geschäftsführung des Museumsparks Rostock GmbH danken wir für die freundliche Unterstützung bei der zeitweiligen Aufstellung einer Versuchsanlage im IGA-Park Rostock-Schmarl. Namentlich erwähnen möchten wir Herrn Geschäftsführer Oliver Fudickar und Frau Heike Merten, Leiterin des Bereiches Umweltbildung.

In unseren Dank schließen wir all unsere hier nicht namentlich genannten Geschäftspartner mit ein, die am Gelingen des Projekts ihren wertvollen Anteil leisteten.

Literatur

- [1] Baden, S.P.; Boström, C. (2001): The Leaf Canopy of Seagrass Beds: Faunal Community Structure and Function in a Salinity Gradient Along the Swedish Coast. In: Ecological comparison of sedimentary shores (pp.213-236) Edition: 151, Chapter: Ecological studies, Publisher: Springer Verlag, DOI:10.1007/978-3-642-56557-1-11
- [2] Bittick, S. (2019): Protecting Canada's hidden "meadows of the sea". In: Canadian Geographic, <https://canadiangeographic.ca/articles/protecting-canadas-hidden-meadows-of-the-sea/>
- [3] Duarte, C.M. (1991): Seagrass depth limits. In: Aquatic Botany, Vol. 40, 1991, pp. 363-377
- [4] Eriander, L. (2016): Restoration and management of eelgrass (*Zostera marina*) on the west coast of Sweden. Dissertation, University of Gothenburg, Department of Marine Sciences, Faculty of Science
- [5] Glück, D. (2020): Germination behavior of seagrass on artificial substrates. M.Sc.-Abschlussarbeit am Institut für Biowissenschaften der Universität Rostock.
- [6] Harbrecht, G. (2017): Untersuchungen zur Kolkbildung an Monopiles und zur Migration von Objekten am Meeresboden. B.Sc.-Thesis, Universität Rostock, Fakultät für Maschinenbau und Schiffstechnik, Lehrstuhl Meerestechnik
- [7] Menzel, P.; Paschen, M. (2017): Kolkbildung und Kolkschutz an Monopile-Fundamenten. Lecture at the 112th Annual General Meeting der Schiffbautechnischen Gesellschaft in Potsdam in November 2017, publiziert in: Jahrbuch der Schiffbautechnischen Gesellschaft, Vol. 111, Seiten 208 - 213
- [8] Meyer, T.; Nehring, S. (2006): Anpflanzung von Seegraswiesen (*Zostera marina* L.) als interne Maßnahme zur Restaurierung der Ostsee. Rostocker Meeresbiologische Beiträge, Heft 15, Seiten 105 bis 119
- [9] Moksnes, P.O.; Gipperth, L.; Eriander, L.; Laas, K.; Cole, S.; Infantes, E. (2016): Handbook for restoration of eelgrass in Sweden - National guideline. Swedish Agency for Marine and Water Management, Report number 2021:5
- [10] Oshlies, A.; Rehder, G.; Kopf, A.; Wallmann, U.; Zimmer, M. (2023): Gezielte Kohlendioxid-Entnahme - Welche Möglichkeiten meeresbasierte Verfahren bieten und wie diese erforscht werden. CDRmare Research Mission, DOI 10.3289/CDRmare.27
- [11] Paschen, M.; Wranik, H.: Beurteilung der Wirksamkeit technischer Maßnahmen zur Verhinderung von Kolkbildung an zylindrischen Gründungsstrukturen von Offshore-Bauwerken auf Grundlage numerischer und experimenteller Analysen. MariKom GmbH, Bericht zum F&E-Projekt "Scour protection"
- [12] Paschen, M.; Glück, D.; Helbig, R. (2023): A new technological approach for eel-grass reforestation based on textile plastic-free growing media. 16th International Black Sea Conference on marine Sciences and Technologies, October 2022, Varna, Bulgaria
- [13] Paschen, M. (2022): Studie zur Strömungsbelastung der Aufwuchsträger. Zwischenbericht zum Forschungsvorhaben vom 1. Juni 2022

- [14] Paschen, M.; Glück, D.; Helbig, R. (2023): A new technological approach for sustainable seagrass reforestation using textile plastic-free growing media. In: S. Kosleck & K. Breddermann: Contributions on the Theory of Fishing Gears and Related Marine Systems, Vol. 12., Menzel-Verlag, ISBN978-3-946694-06-9, Seiten 51 - 60
- [15] Reynolds, P.L. (2018): Seagrass and seagrass beds. <https://ocean.si.edu/ocean-life/plants-algae/seagrass-and-seagrass-beds>
- [16] Reusch, T.B.H.; Chapman, A.R.O.; Gröger, J.P. (1994): Blue mussels *Mytilus edulis* do not interfere with eelgrass *Zostera marina* but fertilize shoot growth through biodeposition. In: MARINE ECOLOGY PROGRESS SERIES, Vol. 108: S. 265-282
- [17] Reusch, T.: Unterwasserwiesen im Klima-Labor speichern 30 Mal mehr CO₂ als die Tropen (Underwater meadows in the climate lab store 30 times more CO₂ than the tropics). Interview vom 7. Oktober 2021, abgedruckt in ntv
- [18] Reusch, T.B.H., Schubert, P.R., Marten, S.M. Gill, D., Karez, R., Busch, K., Hentschel, U. (2021): Lower *Vibrio* spp. abundances in *Zostera marina* leaf canopies suggest a novel ecosystem function for temperate seagrass beds. Marine Biology, doi: <https://doi.org/10.1007/s00227-021-03963-3>
- [19] Schubert, H.; Steinhardt, T.; Schanz, A. (2014): Monitoring Makrophytobenthos - Dokumentation von historischen und rezenten Seegrasvorkommen für die Bewertung nach WRRL und MSRL entlang der Ostseeküste Mecklenburg-Vorpommerns. Forschungsabschlussbericht im Auftrag des Landesamtes für Umwelt, Naturschutz und Geologie Mecklenburg- Vorpommern, Postfach 1338, 18263 Güstrow
- [20] Schubert, H.; Schygulla, C. (2016): Die Erfassung rezenter *Zostera*-Bestände und weiterer Makrophyten in den Küstengewässern MV (ZOSINF). Forschungsabschlussbericht, (LUNG 100G-30.15/16)
- [21] Strydom, S.; McCallum, R.; Lafratta, A.; Webster, C.L.; O'Dea, C.M.; Said, N.E.; Dunham, N.; Inostroza, K.; Salinas, C.; Billingham, S.; Phelps, C.M.; Campbell, C.; Gorham, C.; Bernasconi, R.; Frouws, A.M.; Werner, A.; Vitelli, F.; Puigcorb , V.; D'Cruz, A.; McMahon, K.M.; Robinson, J.; Huggett, M.J.; McNamara, S.; Hyndes, G.A. & Serrano, O. (2023): Global dataset on seagrass meadow structure, biomass and production. In: Earth System Science Data, 15, 511-519, 2023, <https://doi.org/10.5194/essd-15-511-2023>

7 Anhang - Aufwuchsträger und deren Herstellung

7.1 Einführung

Während in Voruntersuchungen zum Projekt noch Aufwuchsträger getestet wurden, die aus synthetischen Polymeren bestanden (*Glück* [5]), so wird im Rahmen des Projektes ausschließlich mit textilbasierten Kunststoff-freien Aufwuchsträgern experimentiert.

Mit dem Einsatz Kunststoff-freier textiler Materialien wird nicht nur der Eintrag potentieller Mikroplaste in die marine Umwelt verhindert, die chemisch unbehandelten Naturstoffe gewährleisten auch einen umweltneutralen und rückstandslosen Abbau der Aufwuchsträger in überschaubar kurzen Zeiträumen. Experimentiert wurde bisher mit solchen Naturstoffen, die in der Region anzutreffen sind. Dazu gehören insbesondere

- als Treibsel (Strandgut) angespültes und getrocknetes Seegras,
- Hanffasern, die nach der Ernte im regionalen Hanfanbau anfallen und aufgrund ihrer Eigenschaften für eine Weiterverarbeitung in der Textilindustrie wenig nachgefragt sind,
- Flachsfasern sowie
- aus heimischen Hölzern hergestellte Viskosefasern⁸.

Auf die Anwendung weiterer Fasern aus hiesiger Produktion, wie beispielsweise Schafwolle, Stroh und Heu, wurde bisher verzichtet. Gleiches gilt für Baumwolle, Kokosfasern, Sisal und andere Fasern, die in dieser Region nicht heimisch sind. In Zusammenarbeit mit Kooperationspartnern wurden aus den oben genannten Ausgangsstoffen Aufwuchsträger mit konstruktiv unterschiedlichem Aufbau entwickelt, hergestellt und im Labor sowie im Feldversuch getestet. Die entwickelten Aufwuchsträger lassen sich hinsichtlich seines konstruktiven Aufbaus in folgende Strukturen unterteilen:

- strangartige,
- gitterartige,
- netzartige sowie
- vliesartige.

Während die gitter- und netzartigen Strukturen auf strangartige Konstruktionen zurückzuführen sind, ist die Herstellung von Vliesen andersartig. Das schließt jedoch nicht aus, dass aus Vlies hergestellte Elemente in gitter- und netzartige Strukturen integriert werden können.

⁸Der regionale Bezug bei der Auswahl der Ausgangsmaterialien ist für das Projekt bedeutsam. Ein regionaler Verbund ermöglicht nicht nur kurze Transportwege zwischen Zulieferern und Verarbeitern; er gewährleistet auch ein höheres Maß an Versorgungssicherheit für die Verarbeiter. Gleichzeitig entsteht für beide Seiten in der Region eine WIN-WIN-Situation.

7.2 Details zum konstruktiven Aufbau der Aufwuchsträger

7.2.1 Aufbau strangartiger Strukturen

Der prinzipielle Aufbau der entwickelten strangartigen Strukturen ist der Abbildung 1 zu entnehmen. Die einzelnen Stränge bestehen aus dem Maschenmantel, dem Kernmaterial sowie den integrierten Leitfäden.

Die Fasern, die das Kernmaterial bilden, werden zusammen mit 2-4 Leitfäden zu einem Strang gebündelt und anschließend mit einem weiteren Faden umstrickt, so dass dieser den zuvor gebildeten Strang (Kernmaterial) umschließt. Die Leitfäden sind sowohl für den Herstellungsprozess als auch als Zugentlastungselemente des Strangs im späteren Einsatz relevant.

Die das Kernmaterial bildenden Fasern werden zuvor möglichst parallel zueinander ausgerichtet, um die Zugfestigkeit⁹ der so gebildeten Struktur zu erhöhen und deren Dehnbarkeit zu verringern.

Die durchgeführten Versuche machten allerdings sichtbar, dass sich die verschiedenen Fasermaterialien unterschiedlich gut zueinander parallel ausrichten lassen. Während Hanf und Flachs sich diesbezüglich recht gut ausrichten lassen (siehe Abbildung 2), kann man das bei getrocknetem Seegras nicht feststellen.

Die Blätter von lebendem Seegras weisen noch einen glatten Faserverlauf auf. Die Struktur von getrocknetem Seegras ist mit der von zerknittertem Lametta vergleichbar. Das hat zur Folge, dass aus trockenem Seegras gefertigte Stränge eine geringere Packungsdichte aufweisen und demzufolge lockere Strukturen bilden. Letztes kann dazu führen, dass die so gefertigten Stränge deutlich größere Durchmesser bei engeren Maschen des Mantels aufweisen im Vergleich zu Hanf- oder Flachsfasern, siehe Abbildung 3. Inwieweit sich dieser Umstand förderlich oder weniger positiv auf den praktischen Gebrauch des jeweiligen Aufwuchsträgermaterials auswirkt, ist zum jetzigen Zeitpunkt noch nicht geklärt.

7.2.2 Aufbau gitterartiger Strukturen

Gitterstrukturen dienen der effizienten Verlegung großer Flächen auf dem Gewässerboden nach dem Rollrasenprinzip. Der prinzipielle Aufbau der im Rahmen des Projekts entwickelten textilen gitterartigen Strukturen ist der Abbildung 4 erkennbar. Er besteht im Wesentlichen aus der Kette bzw. dem Maschenfaden und dem Schussfaden. Als Schussfäden dienen die im vorangegangenen Abschnitt erläuterten strangartigen Strukturen.

Die Anzahl der aus gehäkelten, quasi unendlich langen Einzelfäden hergestellten Ketten, das Fertigungsverfahren ist als *Rascheltechnik* bekannt, sowie der Abstand der beiden äußeren Ketten zueinander sind ausschlaggebend für die (innere) Festigkeit und die (geometrische) Breite des herzustellenden Aufwuchsträgers. Da die Kette nahezu beliebig lang sein kann, ist eine Fertigung der Aufwuchsträger mit quasi beliebiger Länge möglich. Die Kette besteht im Vergleich zum Schussfaden aus wesentlich weniger Material und besitzt demzufolge auch eine entsprechend geringere Masse.

Als Schussfaden dienen die strangartigen Strukturen, die oben beschrieben wurden. Diese

⁹Eine höhere Zugfestigkeit ist sowohl bei der Ausbringung und der Befestigung der Aufwuchsträger auf dem Gewässerboden von Vorteil als auch in der Phase des Wurzelwachstums der jungen Seegraspflanzen in das Sediment.

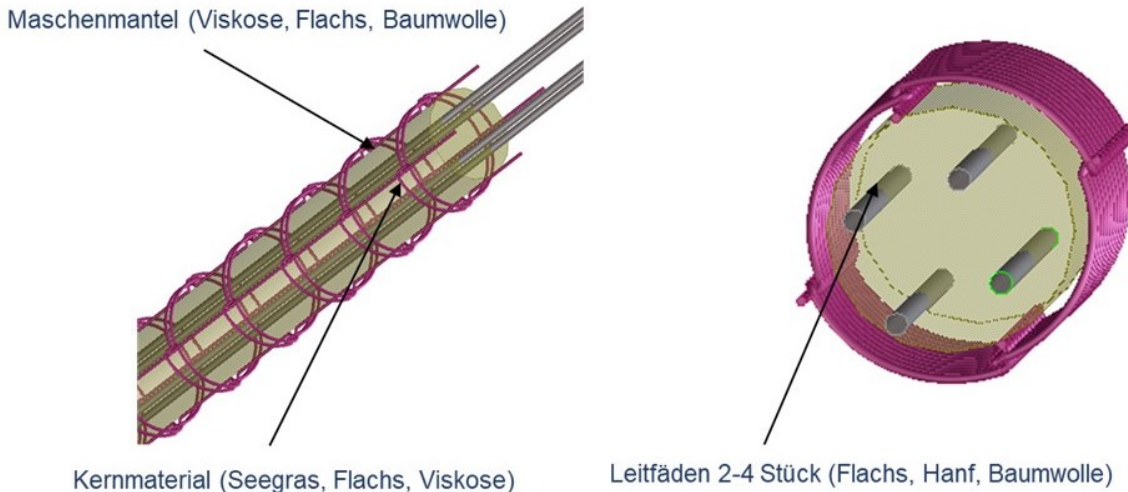


Abb. 1: Prinzipieller Aufbau der entwickelten strangartigen Strukturen

strangartigen Strukturen können bereits vor ihrer Weiterverarbeitung zu Gitterstrukturen mit Saatgut beimpft (siehe Abschnitt 11.1.2) oder nach der Gitterherstellung beimpft bzw. mit jungem Seegras bepflanzt werden.

Bei diesem Konstruktionskonzept kann der lineare Abstand zwischen zwei benachbarten, parallel verlaufenden Schussfäden beliebig variiert werden. D.h., der Abstand zwischen zwei benachbarten Schussfäden kann zwischen Null bis beliebig viele Strangdurchmesser betragen, siehe Abbildung x5.

Da eine einzelne Seegraspflanze unter optimalen Bedingungen bereits in kurzer Zeit Rhizome bildet und sich dementsprechend rasch ausbreiten kann, ist es zweckmäßig, diesen Aspekt bereits bei der Bepflanzung des Aufwuchsträgers zu berücksichtigen und entsprechende Pflanzabstände vorzusehen. Im Interesse eines sparsamen Materialverbrauchs heißt das, dass man die Abstände zwischen benachbarten Schussfäden zweckmäßigerweise nach sinnvollen Pflanzabständen bei der Aufforstung von Seegras wählen sollte.

Wird Material mit deutlich engeren Abständen zwischen benachbarten Schussfäden als für Aufforstungszwecke erforderlich gewählt, so führt das auch zu einem anfänglich höheren Eintrag von organischen Stoffen, die zwar umweltgerecht aber dennoch abgebaut werden müssen.

7.2.3 Aufbau netzartiger Strukturen

Diese textile Konstruktion basiert auf dem Kettenwirkprinzip, bekannt zur Herstellung knotenloser Netzstrukturen. Dabei können RL- oder RR Kettenwirkmaschinen zum Einsatz kommen. Anwendung finden derartige Strukturen im Bereich Sportnetze, Ladungssicherungsnetze, Fischereinetze, Geotextilien, textile Zäune usw.. Abbildung 6 zeigt ausgewählte Prinzipien netzartiger textilen Konstruktionen.

Die einzelnen farbig dargestellten *Fäden* zeigen den Fadenverlauf und die Maschenbildung auf der Wirkmaschine bei der Netzherstellung. Nach diesem Verfahren können Netzschenkellänge und Netzknotenlänge in bestimmten Grenzen variiert werden (elektronische Mustereinrichtung der Wirkmaschine), wodurch z.B. rhombische oder hexagonale Netzgeometrien entstehen. Der Ausstellwinkel der Netzstrukturen (breit ziehen der Netzschenkel z.B. 90°)) entscheidet später über die Geometrie und Größe der Aufwuch-



Abb. 2: Aus Hanf gefertigter Strang. Der weitgehend parallele Verlauf der Hanffasern ist deutlich sichtbar. Ebenso sind ein Leitfaden links im Bild sowie der Maschenmantel zu erkennen.



Abb. 3: Aus getrocknetem Seegras gefertigter Strang. Die Struktur von getrocknetem Seegras ist mit der von zerknittertem Lametta vergleichbar. Die Schenkellängen des Maschenmantels sind in Bezug auf den Strangdurchmesser kleiner.

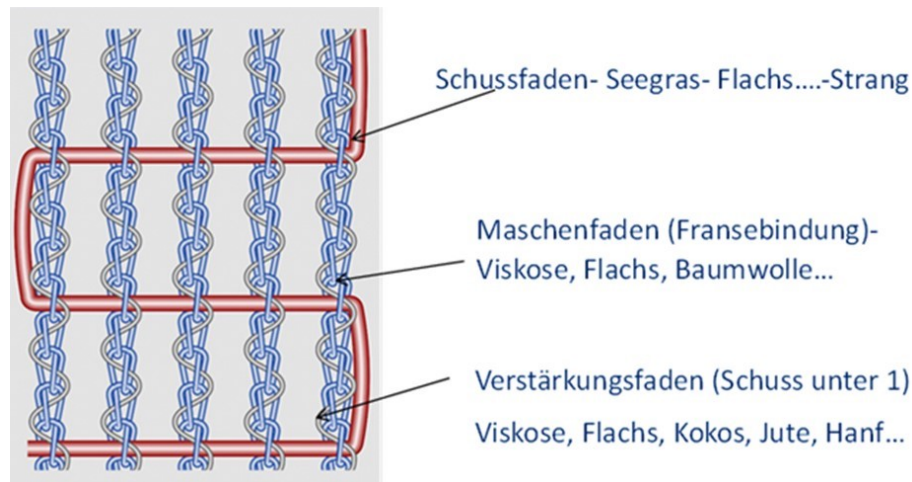


Abb. 4: Grundaufbau der im Projekt entwickelten gitterartigen textilen Strukturen. Die Hauptelemente sind die Kette bzw. der Maschenfaden, im Bild senkrecht angeordnet, sowie der aus dem Strang gebildete Schussfaden.



Abb. 5: Vergleich zwischen zwei gitterartigen Strukturen, die zwar aus den gleichen Ausgangsmaterialien bestehen (Kette ist aus Viskose, Schussfaden ist aus Hanf hergestellt) aber unterschiedliche Abstände zwischen benachbarten Schussfäden aufweisen.

sträger-Netzkonstruktion. Netzstrukturen passen sich sehr gut an den Untergrund an und sind gut drapierbar.

7.2.4 Aufbau von Vliesstoffen

Vliesstoffe aus synthetischen Materialien oder Naturfasern finden in der Landwirtschaft, im Geotextilbereich, im Wasserbau, als Hygieneartikel usw. seit vielen Jahren Anwendung. Die Anlagen sind sehr leistungsfähig, sodass Faser- oder Spinnvliesstoffe effizient und kosten-günstig in großen Breiten und Längen hergestellt werden können. Im Rahmen des Projektes stehen mechanisch verfestigte Naturfaservliesstoffe aber auch thermisch verfestigte Kombinationen aus Naturfasern und Biopolymeren im Focus. Beide sind zu 100 Prozent biologisch abbaubar. Im Rahmen der Versuchsmusterherstellung wurden die Vliesstoffbahnen zunächst in Längsstreifen geschnitten (erfolgt direkt am Warenabzug der Maschine), welche in nachfolgenden Arbeitsschritten mit oben benannten Technologien zu strangartigen (*KEMAFIL*-Technologie) oder in einem zweiten Arbeitsschritt weiter zu

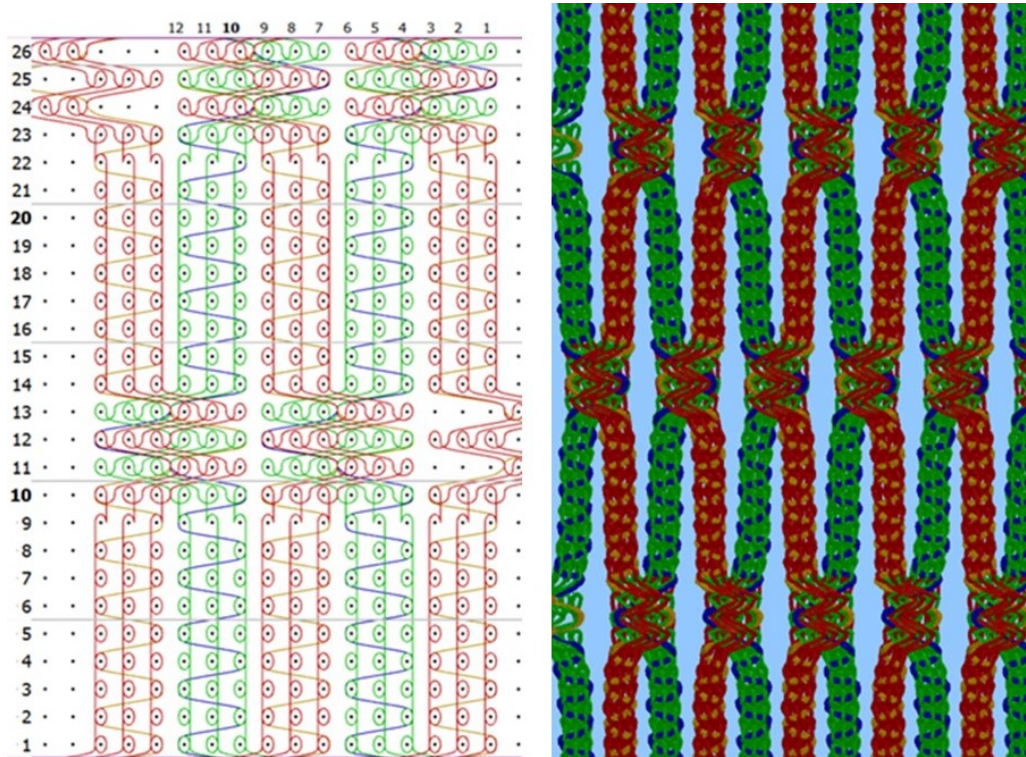


Abb. 6: Fadenverlauf der einzelnen Fadensysteme bei netzartigen Konstruktionen auf der Wirkmaschine (links), 3D Darstellung der Netzkonstruktion

gitter- oder netzartigen Strukturen (Wirkmaschine) verarbeitet werden. Abbildung X16 zeigt eine Laboranlage zur Herstellung von mechanisch verfestigten Nadelvliesstoffen.

7.3 Detaillierte Angaben zu den im Projekt entwickelten und eingesetzten Aufwuchsträgern, konstruktiver Aufbau und eingesetzte Materialien

7.3.1 Strang- und Gitterherstellung aus Naturfaserkardenbändern

Kardenbänder sind eine Vorstufe der Garnherstellung z.B. aus Naturfasern wie Baumwolle, Flachs, Hanf, Viskose usw. Auf Grund ihrer unzureichenden Zugfestigkeit werden diese zunächst durch einen äußeren Maschenmantel und innenliegende Kern- oder Leitfäden verstärkt. Die bauchige, voluminöse Struktur bietet Saatgut und Pflanzenwurzeln ideale Keim und Wachstumsbedingungen.

In der Abbildung 7 ist der Herstellungsprozess nach dem Kern- Mantelverfahren auf einer *KEMAFIL*-Maschine dargestellt.

Ausgewählte textiltechnologische Daten und Materialanteile der Versuchsmuster sind nachfolgend aufgelistet:

Material:	80% Flachsfaser, 20% Viskose
Maschenfaden:	Viskosegarn: 300 <i>tex</i>
Leitfaden:	Flachsgarn: 1100 <i>tex</i>
Längenbezogene Masse:	ca. 50 ... 60 <i>g/m</i>
Durchmesser:	ca. 20 ... 25 <i>mm</i>

In einem nachfolgenden Arbeitsschritt erfolgte die Gitterherstellung auf einer RR-Wirkmaschine



Abb. 7: Strangherstellung aus Hanf Kardenbändern

vom Typ *GWM 1200*. Es wurden Strukturen mit variabler Gittergröße und variablem Strangdurchmesser (Schussfaden) hergestellt, siehe Abbildung 5.

Beispielhaft sind die textiltechnologischen Daten und Materialanteile der in der Abbildung 5, rechtes Foto, dargestellten Variante beschrieben.

Material:	Hanf-Kardenband
Maschenfaden:	Viskosegarn: 300 <i>tex</i>
Schussfadenabstand:	80 <i>mm</i>
Flächenmasse:	150 <i>g/m²</i>
Schussfadendurchmesser:	20 ... 25 <i>mm</i>

7.3.2 Strang- und Gitterherstellung aus Seegras

Nach dem gleichen zweistufigen Verfahren wurden erste Versuche zur Verarbeitung von Seegras durchgeführt.

Im ersten Arbeitsschritt zur Strangherstellung kam eine *KEMAFIL*-Maschine Baugröße 2 (Durchlass 60 *mm*) zum Einsatz. Die Materialzuführung erfolgte manuell über eine Schwerkraftrinne.

Dimensionen und Struktur sind in der Abbildung 3 erkennbar. Die wesentlichen textiltechnologischen und Materialdaten sind in diesem Falle:

Material:	Seegras
Maschenfaden:	Viskosegarn: 300 <i>tex</i>
Leitfaden:	Flachsgarn: 1100 <i>tex</i>
Längenbezogene Masse:	110 <i>g/m</i>
Durchmesser:	40 ...45 <i>mm</i>

Zur Weiterverarbeitung der Stränge zu Gitterstrukturen kam eine RR-Kettenwirkmaschine vom Typ *GWM 1200* zum Einsatz, siehe Abbildung 8. Hierbei wurden Muster in einer Warenbreite von 300 ... 600 mm unter Variation der Gittergröße hergestellt.

Die wesentlichen textiltechnologischen und Materialdaten der in der Abbildung 8 darge-



Abb. 8: RR- Wirk-Maschine *GWM 1200*—grob zur Herstellung der gitterartigen Seegrasstrukturen

stellten Gitterstrukturen lauten wie folgt:

Material:	Seegras
Gitterbreite:	600 mm
Gitterabstand:	80 ... 100 mm
Schussfaden:	Seegrasstrang, Durchmesser ≈ 45 mm
Maschenfaden:	Viskose: 300 tex bzw. Hanfgarn: 0,8 Nm

7.3.3 Strang- und Gitterherstellung aus Naturfaser- Vliesstoffstreifen

Die für das Projekt entwickelten Vliesstoffstreifen aus Naturfasern wurden ebenfalls nach der im Abschnitt 7.3.2 beschriebenen Technologie zu gitterartigen Aufwuchsträgern verarbeitet. Im ersten Arbeitsschritt zur Strangherstellung kam eine *KEMAFIL*-Maschine der Baugröße 2 (Durchlasshöhe 60 mm) zum Einsatz. Die Materialzuführung erfolgte manuell.

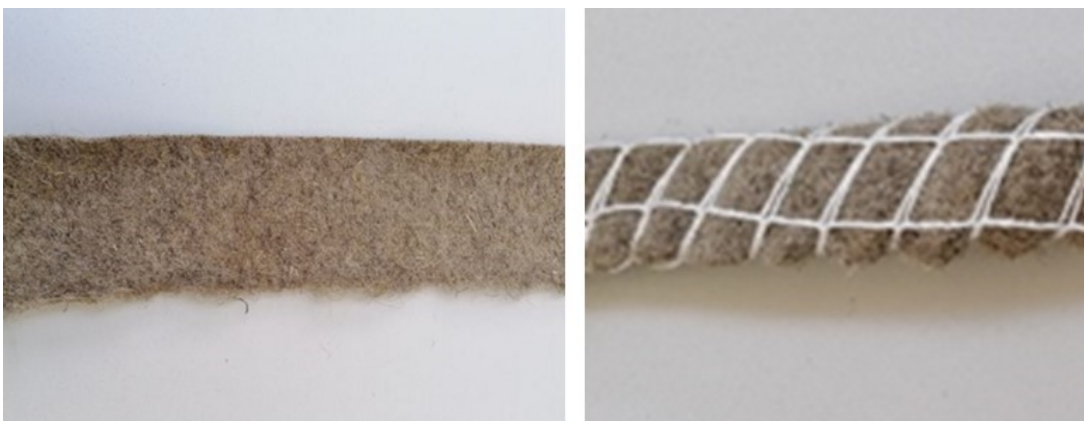


Abb. 9: links: Vliesstoffstreifen aus Hanf-Flachsgemisch, rechts: strankförmige Kernmantelstruktur

Material:	Hanf-Flachs-Vliesstoff
Materialanteile:	je 50 %
Maschenfaden:	Viskose: 300 <i>tex</i>
Längenbezogene Masse:	60 <i>g/m</i>
Durchmesser:	25 ... 30 <i>mm</i>

Zur Weiterverarbeitung der Halbzeuge zu Gitter- oder Netzstrukturen kam eine RR-Kettenwirkmaschine vom Typ *GWM 1200* zum Einsatz. Hierbei wurden Muster in einer Warenbreite von 300 ... 500 *mm* unter Variation der Gittergröße und der Netzmaschen-schenkellänge hergestellt.

Versuche zur direkten Einarbeitung der Vliesstoffstreifen ohne vorherige Ummantelung verliefen ebenfalls positiv, sodass zukünftig ein Arbeitsschritt entfallen kann. Hierzu sind allerdings konstruktive Anpassungen der Materialzuführung an der Wirkmaschine erforderlich.



Abb. 10: Vliesstoffgitter aus Hanf-Flachs-Gemisch, links: bestehend aus Vliesstoffstreifen, rechts: bestehend aus strangförmiger Kernmantelstruktur, vergl. Abbildung 9

Gitteraufbau:

Gitterkonstruktion:	Vliesstoffstreifen
Material:	Hanf-Flachsfasern, Hanf-PLA-Fasern
Gitterbreite:	500 <i>mm</i>
Gitterabstand:	150 ... 300 <i>mm</i>
Schussfaden:	Vliesstoff 80 <i>mm</i> breit, geknautscht
Maschenfaden:	Hanfgarn 0,8 <i>Nm</i>

7.4 Maschinelle Ausrüstung zur Fertigung ausgewählter Aufwuchsträger

Die maschinelle Fertigung der Aufwuchsträger erfolgte in zwei bzw. drei Verfahrensschritten. Zur Erläuterung der einzelnen Arbeitsschritte ist die dazu erforderliche maschinentechnische Ausrüstung bildlich dargestellt.

Die Herstellung der Kardenbänder erfolgte in einer Vorstufe mit der maschinentechnischen Ausrüstung, wie sie in der Textilindustrie zur Garnproduktion üblich ist. Für deren Weiterverarbeitung zum seil- oder strangartigen Halbzeug wurde eine Kern-Manteltechnologie bevorzugt, siehe Abschnitt 7.2.1. Dazu kam eine *KEMAFIL*-Maschine zum Einsatz, dargestellt in der Abbildung 11.

Die Weiterverarbeitung der Seile oder Stränge erfolgte nach der Kettenwirktechnologie.

Aufgrund der extrem groben *Fäden* der strangartigen Halbzeuge kam eine konstruktiv angepasste RR- Kettenwirkmaschine vom Typ *GWM 1200* zum Einsatz. Mit dieser Maschine können sowohl biaxiale Gitterkonstruktionen als auch knotenlose rhombische oder hexagonale Netze hergestellt werden. Beide geometrischen Formen wurden für die Anwendung als Aufwuchsträger untersucht und im Unterauftrag im *Sächsischen Textilforschungsinstitut e.V. (STFI e.V.)* hergestellt. Abbildung 12 zeigt eine konstruktive Ausführung dieses Maschinentyps.

Zur Herstellung von Naturfaservliesstoffen kommen in der Textilindustrie Maschinensysteme wie Krempel oder Karden zur Faseraufbereitung mit nachfolgender mechanischer Verfestigung mittels Nadelmaschinen zum Einsatz. Eine Laboranlage im *STFI e.V.* stellte die ersten Muster für Aufwuchsträger aus einem Flachs-Hanf-Fasergemisch zur Weiterverarbeitung zu gitter- oder netzartigen Halbzeugen her. Die Anlagentechnik in einer Arbeitsbreite von 800 mm ist in Abbildung dargestellt.



Abb. 11: KEMAFIL-Maschine mit einem Kopfdurchmesser von 30 mm



1. fertiggestellter gitterartiger Aufwuchsträger, links unten im Bild und oben vergrößert
2. strangartiges Halbzeug, links im Bild

Abb. 12: RR-Kettenwirkmaschine *GWM 1200* zur Herstellung von gitter- und netzartigen Strukturen



Abb. 13: Vliesstofflaboranlage bestehend aus Krempel und mechanischer Verfestigung in Form einer Dilo Nadelmaschine

8 Anhang - Landseitige Vorbereitung der auszubringenden Aufwuchsträger

8.1 Bepflanzung der Aufwuchsträger

Die Bepflanzung der Aufwuchsträger mit Treibsel erfolgte grundsätzlich in Handarbeit. Diese Tätigkeit wurde nahezu ausschließlich von Beschäftigten einer geschützten Werkstatt des Michaelwerks in Rostock ausgeführt. Ziel war es, die Wurzeln der Seegraspflanzen schonend in die Aufwuchsträger einzuführen.

Bei den strangartigen Strukturen gemäß Abbildungen 2 und 3 wurde bisher auf eine Sicherung etwa durch zusätzliche Garnumwicklung (Garnbindung) verzichtet, siehe Abbildung 14, was sich bei der Verwendung von getrocknetem Seegras als weniger günstig herausstellte. Bei der Anwendung von Vliesstoffstreifen gemäß Abbildung 9 wurden die einzelnen Pflanzen zusätzlich durch Garnbindungen gesichert.



Abb. 14: Bepflanzter Strang ohne zusätzliche Garnbindung, hier: Aufwuchsträger aus Seegras

8.2 Seegrasaufwuchs auf den Aufwuchsträgern unter kontrollierten Bedingungen

8.2.1 Technische Voraussetzungen, Laborbedingungen

Eine der wesentlichen Projektaufgaben bestand darin, die Entwicklung der Seegraspflanzen auf den vorbereiteten Aufwuchsträgern über einen längeren Zeitraum zu beobachten und dabei zweckdienliche Messungen anzustellen. Details dazu werden im Abschnitt 8.2.2 ausgeführt.

In Anbetracht der jahreszeitlichen Bedingungen wurden zur Durchführung dieser Arbeiten Gewächshauskapazitäten bei dem in Rostock angesiedelten *Blumenfachgeschäft und Gärtnerei Block e.Kfm.*¹⁰ für den Zeitraum vom 24. Januar 2022 bis zum 13. April 2022 gemietet.

Für die Durchführung der Arbeiten sind mit Meerwasser betriebene Becken bzw. Gerinne erforderlich. Die Beschaffungskosten für so genannte Langstrombecken, die für diese Untersuchungen besonders geeignet wären, liegen bei 6.000 Euro¹¹ zuzüglich Transportkosten.

Auf Grund der absehbaren kurzen Gebrauchsdauer entschieden sich die Projektbearbeiter für eine bedeutend kostengünstigere Variante. Sie stellten die erforderlichen Becken selbst her. Aus preiswerten Baumarkt-Halbzeugen, wie USB-Platten, Dachlatten und Teichfolie, fertigten sie insgesamt drei Becken, siehe Abbildung 15. Jedes dieser Becken hatte eine Länge von 4 m und eine Breite von 1,25 m. Diese Becken wurden bis zu einer Höhe von ca. 35 cm mit Wasser aus der Ostsee gefüllt. Damit stand eine Beckenfläche von 15 m² und ein Wasservolumen von 5,25 m³ zur Verfügung.

Jedes der Becken wurde mit Hilfe einer Aquariumpumpe ganztägig belüftet. Die Pumpen waren jedoch nicht so leistungsfähig, um eine signifikante Strömung in den Becken zu erzeugen, was sich im Nachhinein als Mangel erwies. Das selbständige Schöpfen und der Transport der erforderlichen Seewassermenge mit eigenen Mitteln war nicht möglich. Daher wurde die Firma *Baltic Taucherei- und Bergungsbetrieb GmbH* in Rostock beauftragt, Ostseewasser zu schöpfen und anschließend die Testbecken damit zu füllen.

¹⁰Wir danken dem Inhaber, Herrn Olaf Block, für die freundliche Unterstützung und für das Interesse, das er dem Projekt entgegenbrachte.

¹¹Ein Anbieter aus der Region ist *SBS Bootsbau & Fischereitechnik GmbH* in Plau.



Abb. 15: Fertigung der Becken aus Baumarkt-Halbzeugen

Die Verwendung von künstlich hergestelltem Meerwasser auf Basis von deionisiertem Wasser war für die Versuche unnötig, da die verwendeten Seegraspflanzen bereits als Treibsel mit Zoo- und Phytoplankton sowie mit weiteren organischen und anorganischen Stoffen *kontaminiert* waren. Hinzu kamen die bekannten hohen Herstellungskosten für die erforderliche Menge Meerwasser.



Abb. 16: Herr David Riedinger vom Institut für Ostseeforschung Warnemünde versucht mit Wathose und Milchkanne bei winterlichen Temperaturen Ostseewasser am Strand von Warnemünde zu schöpfen

Für die Wintersaison 2022 / 2023 konnte beim *Rostocker Fracht- und Fischereihafen* eine kleine Kalthalle angemietet werden, um die notwendigen Arbeiten zur Vorkultur für das Frühjahr 2023 durchführen zu können, siehe Abbildung 17. Die Vorteile dieses Standortes gegenüber der Lage des im Jahr zuvor genutzten Gewächshauses lag

- im unmittelbaren Zugang zum Wasser,
- in der Nähe des Liegeplatzes des Forschungskutters der Firma FIUM GmbH & Co. KG sowie
- in der Abgeschlossenheit der Räumlichkeit, so dass diese auch zeitweilig zur Unterbringung des gesamten Materials genutzt werden konnte.

Der zweifelsfreie Nachteil dieser Immobilie bestand darin, dass die für die Vorkultur notwendige (natürliche) Helligkeit fehlte. Diese musste deshalb durch entsprechende künstliche Beleuchtung ausgeglichen werden. Hierzu wurden aus Projektmitteln erforderliche Lampen und Strahler beschafft.

Für die Vorkultur wurden die gleichen, durch das Projektteam hergestellten Becken genutzt, die auch im Gewächshaus erfolgreich eingesetzt wurden. Auf Grund des verfügbaren Platzes wurde zusätzlich ein offenes Gerinne installiert. Dieses wurde anschließend für

spezielle Untersuchungen werbewirksam im IGA-Park Rostock-Schmarl aufgestellt, siehe Abschnitt 9. Hier wurden erstmalig die mit einem Hersteller von Geo-Textilien entwickelten Aufwuchsträger in Form von Steppmatten eingesetzt, siehe Abbildung 18. Biologische Untersuchungen wurde in der Kalthalle nicht durchgeführt.



Abb. 17: Blick in die angemietete Kalthalle mit Becken zur Vorkultur

8.2.2 Mess- und Beobachtungsmethoden zum Pflanzenwachstum im Gewächshaus einschl. Ergebnisse

Zu Beginn des Experimentes wurden ca. 2000 Pflanzen in unterschiedliche Aufwuchsträger eingebracht. Diese wurden in insgesamt drei Becken in einem Gewächshaus bei 3 - 8 °C kultiviert bei Habitatswasser (aus der Ostsee vor Rostock) und einer Wassertiefe von 30 cm.

Von den Pflanzen wurden ca. 5 % markiert und mit individuellen Kennzeichnungen versehen. Diese 5 % dienten der Untersuchungen von Blattwachstum und Überlebensrate unter den jeweiligen Bedingungen.

In allen Becken wurden hanfbasierte Aufwuchsträger eingebracht, daher gibt es drei Replikate von jeweils 23 Pflanzen. Das Seegrasssubstrat war nur ausreichend für ein Replikat. Die Überlebensrate der Pflanzen war unterschiedlich, je nach Becken und Substrat. Die höchste Rate hatte ein Becken mit Hanfsubstrat. Eine ähnlich hohe Rate hatte das Seegrass-Substrat (Abbildung 19).

Mehr als 70 % der Pflanzen überlebten die 7 Wochen Kultivierung. Bei den anderen Becken waren die Verluste höher, generell gab es aber eine annähernd lineare Abnahme der überlebenden Pflanzen.

Die Gründe für die Verluste sind offensichtlich vielfältig. Besonderen Einfluss werden sicherlich der Stress, den die Pflanzen als Treibgut erfahren mussten sowie die mangelnde Wasserbewegung in den Becken sein, siehe auch Abschnitt 8.2.1. Zukünftig muss bei der als notwendig erachteten Kultivierung ein höherer technischer Aufwand betrieben werden.



Abb. 18: Mit Pflanzen bestückte steppmattenartige Aufwuchsträger, hier Seegras als Grundmaterial

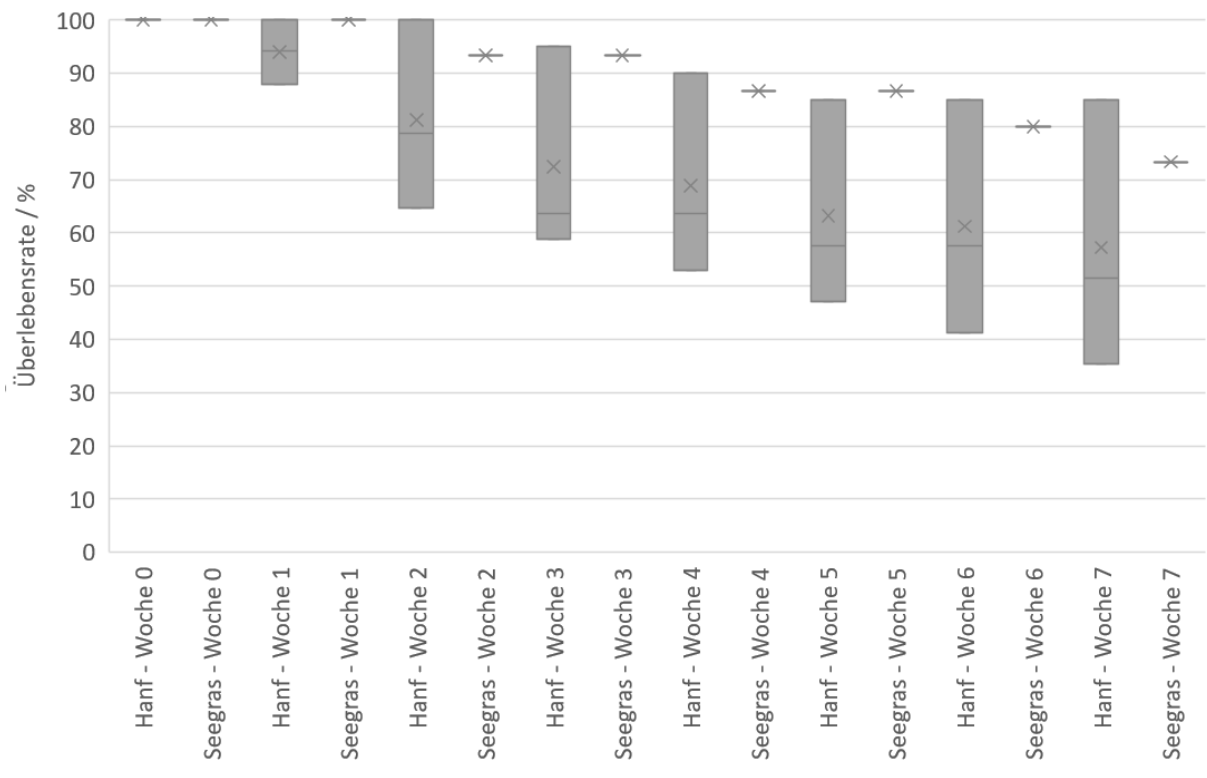


Abb. 19: Überlebensrate der Pflanzen auf den Aufwuchsträgern

Neben der Überlebensrate wurden Blattlänge und Blattzahl der markierten Pflanzen jede Woche überprüft (Abbildung 20). Beide Parameter nahmen im Laufe des Experimentes zu.

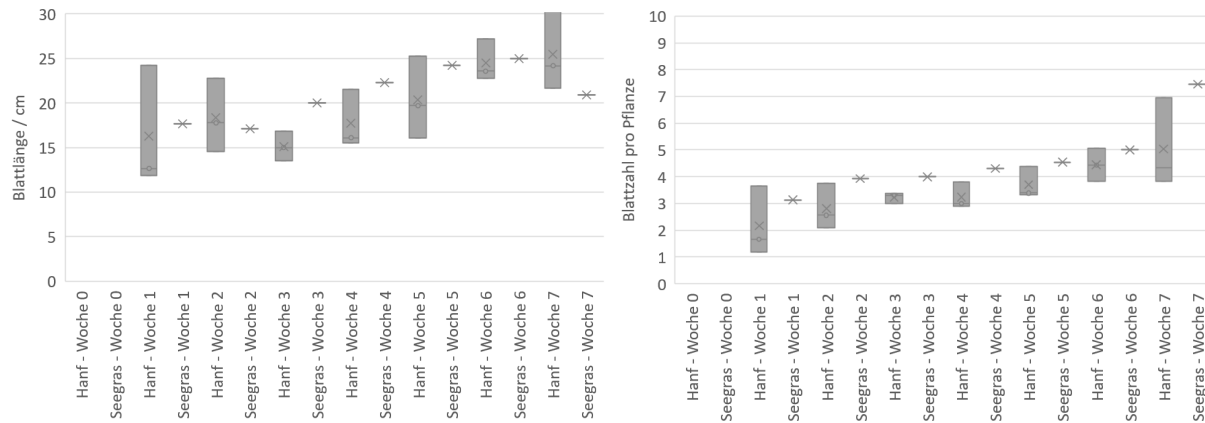


Abb. 20: Blattlänge (in cm) und Blattzahl der Pflanzen auf den Aufwuchsträgern

Die Blattlänge der regelmäßig überprüften Seegras-Pflanzen nahm im Laufe des Experimentes um ca. 10 cm zu. Diese Zunahme ist ein positives Zeichen und deutet darauf hin, dass die Pflanzen unter den Bedingungen im Gewächshaus wachsen können. Das stagnierende Wachstum von Woche 0 bis Woche 3 deutet auf eine Eingewöhnungszeit hin.

Auch die Blattzahl pro Pflanze stieg im Laufe des Experimentes. In einigen Fällen gab es eine Verdopplung der Blattzahl. Ein weiteres Indiz für die erfolgreiche Kultivierung von Seegras unter kontrollierten Bedingungen im Gewächshaus waren die Ausbildung von Blüten und Samenansätzen der Pflanzen. Diese konnten in allen Becken beobachtet werden (Abbildung 21).



Abb. 21: Samenansätze einer Seegras-Pflanze

Generell lassen sich folgende Ergebnisse aus den Gewächshausversuchen festzustellen:

- Die Pflanzen haben den Aufwuchs-Prozess gut überstanden. Ein Großteil der Pflanzen überlebte und konnte in den Becken anwachsen.
- Die Bepflanzung der entwickelten Aufwuchsträger mit Seegras ist möglich.
- Über die optimale Dauer der Kultivierung in den Becken herrscht noch Unklarheit. Sofern der technische Aufwand gering gehalten wird und die Umgebungsbedingungen von noch ausreichender Qualität sind, sollte die Zeit der Hälterung kürzer als bisher

sein.

Sofern die Umgebungsbedingungen infolge vermehrter Wasserbewegung und noch intensiverer Beleuchtung verbessert werden¹², erscheint eine längere Dauer der Kultivierung möglich und im Sinne der Anwendung des Rollrasenprinzips auch sinnvoll.



Abb. 22: Begutachtung und Vermessung der Seegraspflanzen im Gewächshaus am 2. März 2022



Abb. 23: Monitoring im Gewächshaus am 2. März 2022

¹²Diese beiden Parameter konnten nicht gemessen werden und erfordern daher eine kritischere Kontrolle.

9 Anhang - Tests am offenen Gerinne im IGA-Park Rostock

Zur Klärung spezieller Fragestellungen, die bei den Untersuchungen an den beiden Riffen, siehe hierzu Abschnitt 10, weniger gut geeignet waren, wurde das Angebot der Geschäftsführung der Museumspark Rostock GmbH genutzt, im Zeitraum Mai bis Oktober 2023 ein offenes Gerinne im Niederländischen Pavillon des IGA-Parks aufzustellen, siehe Abbildung 24.

Mit diesem Experiment konnten folgende Ziele erreicht werden:

- Durchführung spezieller Beobachtungen zum Wachstumsverhalten der Pflanzen auf verschiedenen Aufwuchsträgern und bei unterschiedlicher Art und Weise der Bepflanzung in zeitnahen Abständen;
- Nutzung der unmittelbaren Nähe zur Warnow, wodurch der regelmäßige Austausch von Wasser im Becken weniger Aufwand erforderte;
- Gewinnung eines in der Region ansässigen Labors für die Durchführung von kostengünstigen Wassertests;
- Werbung für das Projekt - auch durch Anbringung einer entsprechenden Werbetafel.



Abb. 24: Das offene Gerinne im IGA-Park Rostock-Schmarl vom Mai bis Oktober 2023

Die Feldversuche machten ein zum Teil differenziertes Pflanzenwachstum auf verschiedenartigen Aufwuchsträgern erkennbar. Deshalb war es zweckmäßig, das ohnehin vorhandene Gerinne für weitergehende Experimente zu nutzen.

Dazu wurden in Geometrie und Material verschiedene Aufwuchsträger mit noch robusten, aus Treibsel gewonnenen Seegraspflanzen manuell bepflanzt. Im Detail kamen gitter-, matten- und vliesartige Aufwuchsträger zur Anwendung. Die beiden erstgenannten waren aus Seegras und Hanf gefertigt. Der Vliesstoff bestand aus einem Hanf-Flachs-Gemisch. Die Maschenfäden bestanden zumeist aus Hanfgarn und einem Garn aus Holz-Viskose. Anfänglich wurde zudem gewaschener Putzkies (Baumarktprodukt) mit einer Korngröße bis zu 2 mm als Sediment verwendet. Der Kies diente dem Zweck, das Einwachsen der Pflanzenwurzeln in das Sediment zu beobachten.

Im Ergebnis dieser Beobachtungen konnte festgestellt werden, dass dichte, flächendeckende Aufwuchsträger, hier insbesondere Vliese, für zukünftige Anwendungen nicht infrage

kommen. Sie behindern offensichtlich einen Wasser- und somit auch Gasaustausch zwischen Sediment und Wasserkörper. In der Folge kam es zwischen einzelnen Aufwuchsträgern und dem Sediment zur Bildung toxischer Schwefel-Wasserstoff-Verbindungen. Da das Wasser über den gesamten Versuchszeitraum hinweg durch zwei kleine Strömungsgeneratoren (ummantelte Propeller), wie sie in großen Meeresaquarien eingesetzt werden, bewegt wurde, konnten diese Gase aus dem darüber liegenden Wasserkörper entweichen und konnten somit nicht gemessen werden, wie aus den Daten der Abbildung 25 hervorgeht.

Ebenso interessant war die Beobachtung, dass die zur Herstellung der Aufwuchsträger erforderlichen Maschenfäden am Ende der Untersuchungen im Oktober 2023, d.h., nach ca. fünf Monaten weitgehend biologisch abgebaut waren. Das heißt natürlich auch, dass die Pflanzen zu diesem Zeitpunkt schon fest im Meeresboden verankert sein müssen.

Parameter	Tag der Messung		
	5.07.2023	17.07.2023	30.08.2023
Wassertemperatur [°C]	16,7	18,9	16,0
Sauerstoffkonzentration [mg l ⁻¹]	9,36	6,72	6,76
Sauerstoffsättigung [%]	99,9	78,3	74,4
Elektrische Leitfähigkeit [mS cm ⁻¹]	14,000	22,432	19,993
pH [-]	8,28	7,61	7,51
Redoxpotential	141,4	171,6	140,9
Ammonium [mg l ⁻¹]	0,160	0,180	0,100
Salinität [PSU]	7,86	12,84	11,26

Hinweis: Die elektrische Leitfähigkeit von Meerwasser beträgt 56 mS cm⁻¹

Abb. 25: Daten der Laboruntersuchungen zum Wasserkörper im offenen Gerinne

In einer zweiten Versuchsreihe wurden vergleichende Analysen zum Pflanzenwachstum bei gleichartigen Aufwuchsträgern aber unterschiedlicher Weise der Bepflanzung angestellt. Hier wurden zum einen Pflanzen wie bisher manuell eingepflanzt und zum anderen bereits während des Herstellungsprozesses des Aufwuchsträgers mit eingewebt, siehe Abbildung 26. Ziel dieser Untersuchungen war es zu testen, ob der erhebliche Aufwand für eine manuelle Bepflanzung der Aufwuchsträger vermieden und bereits in den vorgelagerten Fertigungsprozess der Aufwuchsträger verlagert werden kann. Dieses Konzept ist bisher leider noch nicht aufgegangen. Die Pflanzen haben sich nicht in der gewünschten Weise entwickelt.

An diesem Konzept muss, so es keine weiteren technologischen Alternativen gibt, in der Zukunft noch gearbeitet werden.



Abb. 26: Manuell eingesetzte (l.) und während des Herstellungsprozesses "eingewebte" Pflanzen (r.)

10 Installation der Aufwuchsträger auf See und Monitoring

10.1 Ausgewählte Seegebiete für die Installation

Die Landesforschungsanstalt für Landwirtschaft und Fischerei Mecklenburg-Vorpommern stellte mit Schreiben vom 7. Dezember 2020 eine Testfläche zum Ausbringen von be-pflanzten Aufwuchsträgern im Bereich des künstlichen Riffs "Rosenort" unentgeltlich zur Verfügung. Das Staatliche Amt für Landwirtschaft und Umwelt Mecklenburg-Vorpommern entsprach mit dem Schreiben vom 8. April 2022 dem Antrag auf Genehmigung eines Feld-versuchs am künstlichen Riff Rosenort.

Die Lage des Riffs geht aus der Abbildung 27 hervor. Es liegt etwa nordöstlich vom Seekanal Warnemünde. Für die Wahl dieses Standortes waren folgende Kriterien entscheidend:

- Das künstliche Riff Rosenort ist Teil eines Fischereischutzgebietes. Es finden hier keine fischereilichen Aktivitäten statt, die etwa Einfluss nehmen könnten auf das Versuchsergebnis (z.B. Schleppnetzfisherei).
- Die durchschnittliche Wassertiefe liegt zwischen 5 und 7,5 Metern. Damit ist eine für die Versuche ausreichende Lichtmenge am Meeresboden zu erwarten.
- Am Standort Rostock gibt es mindestens drei Einrichtungen bzw. Firmen, die sowohl über entsprechende Schiffskapazitäten verfügen als auch Berufs- bzw. sachkundige Forschungstaucher beschäftigen und somit in der Lage sind, alle anstehenden Arbeiten auszuführen.
- Die geographische Nähe des Riffs zum Standort Rostock ermöglicht es, sowohl die Installationen als auch die erforderlichen Monitorings ressourcenschonend bzgl. Arbeitszeit und Aufwand für den jeweiligen Schiffstransfer durchführen zu können.

Neben dem Riff *Rosenort* wurde zeitweilig auch die Möglichkeit genutzt, einen zweiten Standort für die Installation der Seegras-Wiesen zu nutzen. Es handelte sich hierbei um den *Wiecker Bodden*.

In Kooperation mit der Universität Rostock (Mathematisch-Naturwissenschaftliche Fakultät, Institut für Biowissenschaften, Abteilung Aquatische Ökologie) wurde eine bereits

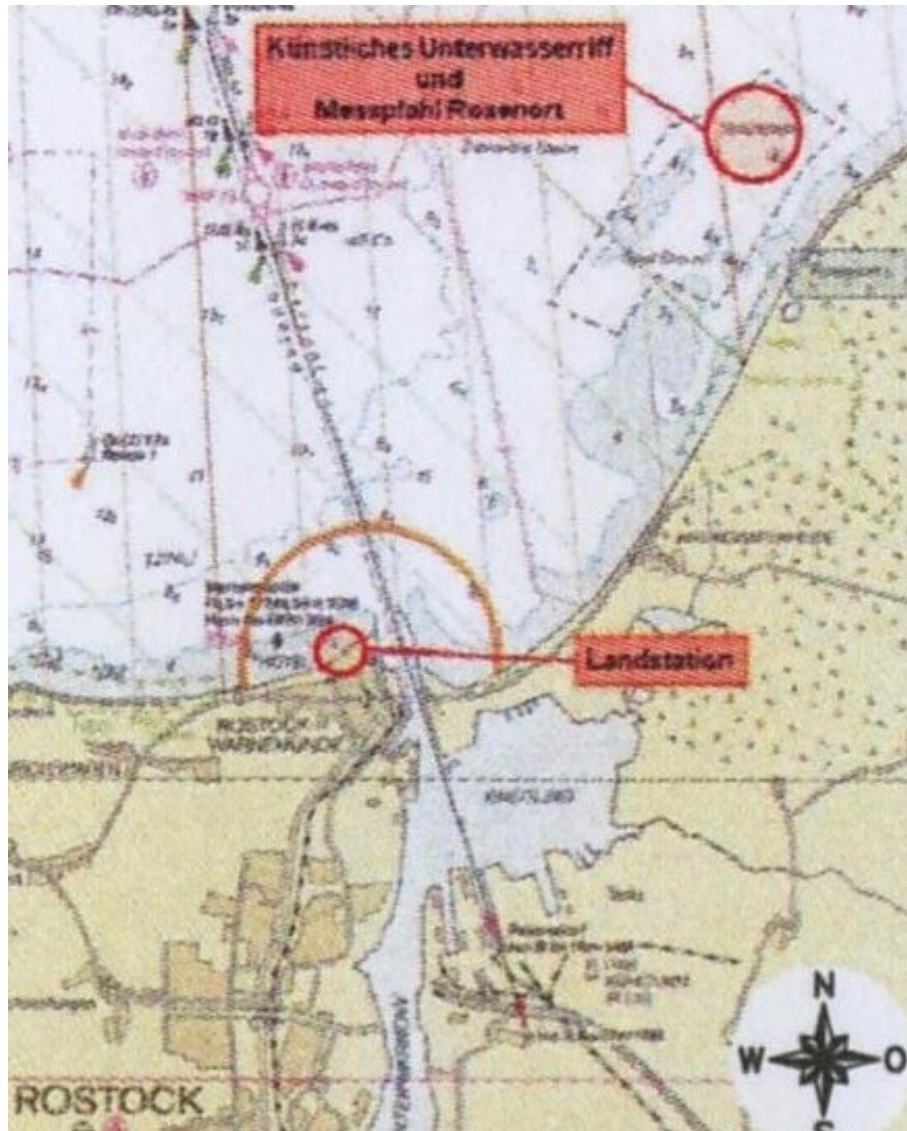


Abb. 27: Position des künstlichen Riffs Rosenort

erteilte strom- und schiffahrtspolizeiliche Genehmigung für die *Errichtung einer Kultivierungsanlage für Makroalgen und Seegras in der Bundeswasserstraße Rügensche Bodden / Wieker Bodden südlich von Dranske* genutzt. Der *Wieker Bodden* erschien aufgrund seiner geringen Wasserstandsschwankungen und -strömungen gut geeignet, um unterschiedliche Materialien und Konstruktionsweisen von Aufwuchsträgern samt Seegras zu testen.

Die Salinität im Bodden ist vergleichbar mit der der Ostsee (ca. 10 PSU). Gleiches gilt für die Sedimentverhältnisse. Allerdings erwies sich die infolge erhöhter Trübung und Nährstoffbelastung resultierende geringere Lichtmenge als extrem hinderlich auf die Seegrasentwicklung aus, so dass erste Versuche im Frühjahr 2023 bereits vorzeitig abgebrochen werden mussten.

Das künstliche Riff vor *Nienhagen* schied wegen der dort anzutreffenden Wassertiefe von mehr als 10 Meter ursprünglich als Standort aus. In Absprache mit der FIUM GmbH & Co. KG wurden dann doch einige bepflanzte Aufwuchsträger in Strandnähe bei ca. 7 Meter Wassertiefe ausgelegt.

10.2 Installation der Aufwuchsträger

Installationen wurden im Frühjahr und Sommer 2022 sowie im Frühjahr und Sommer 2023 vorgenommen. Die Arbeiten wurden jeweilig von der Firma FIUM GmbH & Co. KG ausgeführt.

Die exakte Position der installierten Aufwuchsträger am Riff Rosenort war N 54°14.651', E 012°09.014'. Am Riff Nienhagen war die Position N 54° 10,184' und E 11° 56,895'.

Die unter kontrollierten Bedingungen vorkultivierten Aufwuchsträger wurden für den Transport und die nachfolgende Installation mäanderförmig in Bottichen mit kubischer Form verpackt und mit Seewasser feucht gehalten, siehe Abbildung 28. Die Verlegung der Aufwuchsträger erfolgte jeweilig durch Forschungstaucher projektgemäß nach dem Rollrasenprinzip. Die Fixierung der Aufwuchsträger am Meeresboden erfolgte mit Hilfe von Bodennägeln - eine Technologie, die sich im Bereich des Erosionsschutzes als die beste erwies.

Der zu wählende Abstand der Bodennägel zueinander wurde auf Grundlage vorausgegangener Windkanaluntersuchungen abgeschätzt, siehe *Paschen* [13].

Da die bodennahe Strömungsrichtung je nach Wetterlage stark variieren kann und einschlägige Erfahrungen zur Hydrologie am Riff weiter nicht vorlagen, entschieden sich die Projektbearbeiter bei der ersten Installation für eine fächerartige Anordnung der Aufwuchsträger, siehe Abbildung 29. Durch diese Anordnung wurden insgesamt 24 m² Seeboden mit Aufwuchsträgern auf ca. 6 m Wassertiefe von Forschungstauchern ausgebracht. Anschließend wurden Wasserproben für das Institut für Ostseeforschung Warnemünde genommen, um die hier vorhandene Vibrionen-Konzentration zu bestimmen. Gleichzeitig wurden Sedimentproben mittels Stechrohr entnommen, um bei späteren Vergleichen die Einwirkung der Seegraswurzeln auf den Meeresboden quantifizieren zu können.

Die zweite Installation war weniger umfangreich. Sie wurde erforderlich, um die bei einem Starkwindereignis Anfang August 2022 verloren gegangenen Aufwuchsträger samt Pflanzen zu ersetzen. Dieses Mal wurden die bekannten Aufwuchsträger aus Zeitmangel¹³ nur einen Tag vor der Installation mit Seegraspflanzen bestückt.

Auf Grund der inzwischen gewonnenen Erfahrungen bzgl. der vorherrschenden Hauptströmungen am Riff wurden die Aufwuchsträger bei den nachfolgenden Installationen in Ost-West-Richtung ausgelegt. Das entspricht in etwa der Orientierung der Matten links oben in der Abbildung 29.

Ebenso gab es Veränderungen bzgl. der Installation der Aufwuchsträger selbst. Bei der Erstinstallation legten die Forschungstaucher projektgemäß die bepflanzten Matten auf den Meeresboden und fixierten diese mit Erdnägeln, siehe Abbildungen 31 und 30.

Bei den nachfolgenden Installationen schufen die Taucher zuvor eine wenige Zentimeter tiefe Grube, in die sie die Aufwuchsträger hineinlegten und die Matten wiederum mit Erdnägeln fixierten. Abschließend wurden die Aufwuchsträger mit einer dünnen Sedimentschicht zugeschüttet. Durch diese Maßnahme versprechen sich die Projektbearbeiter einen besseren Schutz gegenüber der Meeresströmung.

¹³Wegen der fortgeschrittenen Jahreszeit mussten die Pflanzen so rasch wie möglich ersetzt werden.



Abb. 28: Mäanderförmige Anordnung der Aufwuchsträger in Bottichen für Transport und Installation

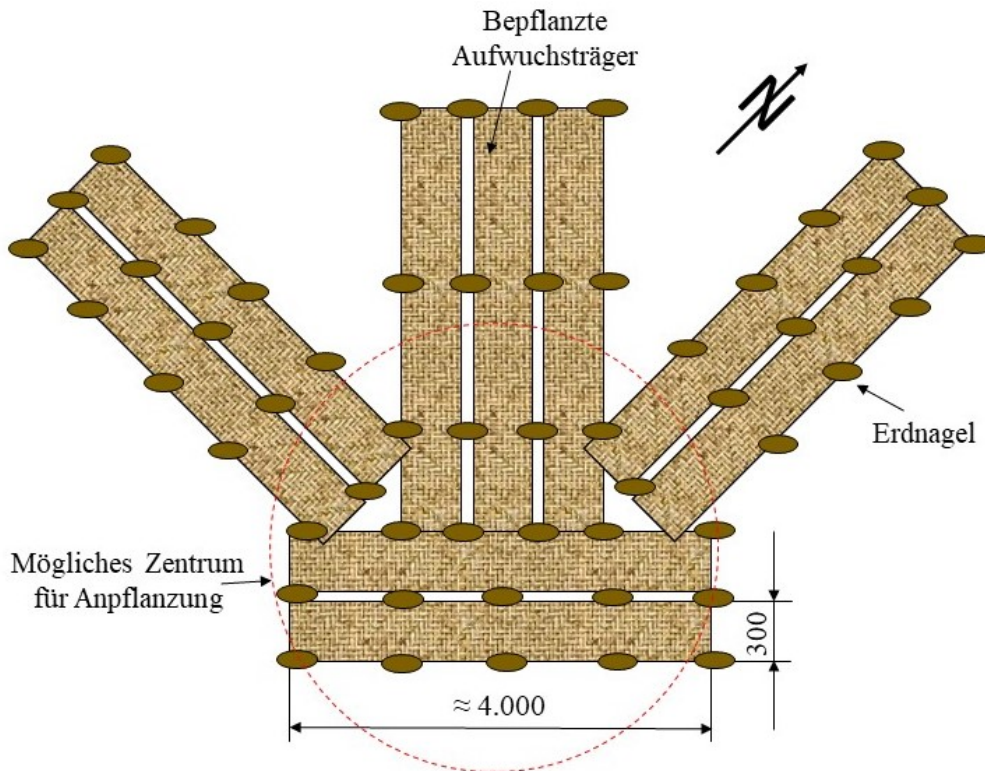


Abb. 29: Fächerartige Anordnung der Aufwuchsträger

10.3 Monitoring

Um den Erfolg der Methode und den Zustand der Pflanzen zu dokumentieren, wurden in regelmäßigen Abständen Kontroll-Ausfahrten zu der neu angelegten Seegraswiese durchgeführt. Diese umfassten eine visuelle Kontrolle der Pflanzen (Anzahl und Zustand der Blätter und Wurzeln) und der Aufwuchsträger. Des Weiteren wurden auch Lichtmessungen am Standort durchgeführt und Sediment- und Wasserproben genommen um die Tauglichkeit des Ökosystems für die Experimente zu bestimmen. Sämtliche Arbeiten wurden von Forschungstauchern durchgeführt.

Die Lichtmessungen ergaben eine durchschnittliche Lichtmenge von ca. $20 \mu\text{mol}/\text{m}^2\text{s}$. Diese liegt über der Mindestmenge an Licht, die Seegras für das Wachstum benötigt [3]. Die Sedimentanalyse ergab eine durchschnittliche Korngröße von $0,27 \text{ mm} \pm 0,03 \text{ mm}$ mit einem Sortierungsgrad von $0,44 \pm 0,24$. Der Sand ist damit ein gut sortierter Mittelsand und geeignet für die Ansiedlung von Seegras.

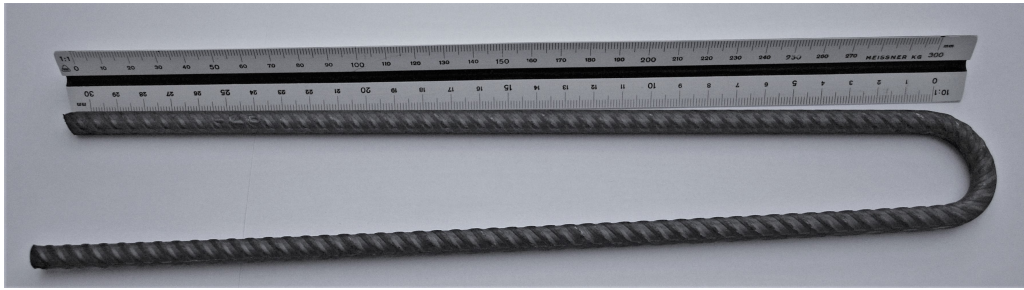


Abb. 30: Erdnagel aus Bewehrungsstahl



Abb. 31: Bei der Erstinstallation lagen die Aufwuchsträger auf dem Meeresboden

Bereits nach dem ersten Monitoring-Termin war absehbar, dass Algenwachstum das größte Problem für die erfolgreiche Ansiedlung von Seegras sein könnte. An manchen Stellen war die Algendichte so hoch, dass diese die Seegräser bereits bedeckten. Ein solcher Algenaufwuchs stellt eine Bedrohung für die Seegräser dar, da unter diesen Umständen nicht genug Licht zu den Pflanzen gelangen kann.

Eine mögliche Erklärung für den starken Bewuchs ist unter ökologischen Gesichtspunkten ist, dass die Aufwuchsträger ein Hartsubstrat darstellen, die in einem Ökosystem welches von Weichsubstraten (Sand etc.) dominiert wird, eine der wenigen Anheftungsmöglichkeiten für Algen darstellen. Das Hartsubstrat wird daher innerhalb weniger Wochen vollständig besiedelt. Vor allem das Wachstum von fädigen Grünalgen ist dabei zu benennen, da diese unter den Lichtbedingungen vor Ort besonders profitieren. Eine Möglichkeit, dieses Algenwachstum in Zukunft zu vermeiden oder zumindest zu verringern, ist das manuelle Einsanden der Aufwuchsträger. Nach einem Bedecken des Hartsubstrates mit Sand, ist eine Anheftung der Algen nicht mehr möglich.

Der Zustand der Pflanzen kann nach den Monitoring-Ausfahrten als gut beschrieben werden. Nach mehreren Sturmereignissen, bei denen leider ein Teil der Pflanzen inklusive Aufwuchsträger verloren gingen, ist auch nach 6 Monaten noch Seegras am Standort verblieben. Dieses ist fest verwurzelt im Sediment und Substrat und bildet neue Blätter. Es sind noch keine lateralen Rhizome für eine vegetative Fortpflanzung zu erkennen, es ist allerdings davon auszugehen, dass diese bereits unterirdisch vorhanden sind.

11 Anhang - Nutzung von Saatgut

11.1 Zukünftige Forschungsvorhaben zur Behandlung des Saatgutes unter kontrollierten Bedingungen

11.1.1 Beschaffung von Seegrassamen im Sommer 2022 für Frühjahr 2023

Da sich die Beschaffung von *Zostera marina* Samen erst während der Projektbearbeitung als schwierig herausstellte, wurden im Sommer 2022 möglichst viele Möglichkeiten gesucht, um an Seegras-Samen zu gelangen. Dies umfassten eigene Sammlungen von Treibsel-Pflanzen am Strand, aber auch die Kontaktaufnahme mit weiteren Instituten, die an der Ostseeküste Feldarbeiten durchführen und damit auch dort Treibselpflanzen auffinden können.

Im Juni 2022 konnten so mehrere dutzend Samen tragende Pflanzen gesammelt werden, siehe Abbildung 32. Diese werden nun belüftet in einem Kühlraum der Universität Rostock gelagert bis sie die Samenreife erreichen. Dies ist im Frühjahr 2023 zu erwarten.

Nach gegenwärtigem Stand eigener Erfahrungen wird die Sammlung und zielgerichtete Behandlung von Seegras-Samen auch in den nächsten Jahren notwendiger Bestandteil zukünftiger Arbeiten sein müssen.



Abb. 32: Links: Seegras-Halm mit noch unreifen Samen, Rechts: belüftetes Becken mit mehreren Seegras-Pflanzen mit Seegras-Samen (Fotos: D. Glück)

11.1.2 Forschungsarbeiten zur Keimung von Seegras-Samen nach Behandlung mit Alginaten

Die MariKom GmbH verfügt weder über die sächlichen noch die personellen Ressourcen, um umfassende biologische Grundlagenuntersuchungen allein kompetent zu planen und erfolgreich durchzuführen zu können. Das Institut für Biowissenschaften der Universität Rostock ist in diesem Kontext ein erfahrener und ein fachlich exzellent ausgewiesener Kooperationspartner.

Vor allem Experimente zur Keimung der Seegras-Samen sind zwingend notwendig, um eine hohe Erfolgswahrscheinlichkeit der Keimung der Samen im Aufwuchsträger zu erreichen.

Im Verlauf des Projektes ist das Entwicklungsteam zu der Überzeugung gelangt, dass die Einbringung des Saatgutes in den Aufwuchsträger bereits während dessen Herstellungsprozesses erfolgen sollte. Eine wesentliche Herausforderung hierbei ist die Behandlung der Samen während dieses Prozesses. Dabei muss das Saatgut unbedingt vor dem Austrocknen geschützt werden. Aus heutiger Perspektive erscheint eine Ummantlung mit einer Alginat-Schicht eine mögliche und erfolgversprechende Methode zu sein.

11.1.3 Planung und Umsetzung einer *Zostera marina* Kultur an der Universität Rostock zur Samenproduktion

Neben den bereits formulierten und beschriebenen Arbeiten wird an einer Seegras-Kultur an der Universität Rostock gearbeitet. Diese besteht aus mehreren kanalförmigen Becken mit einer Wassersäule von mindestens 20 cm Höhe, siehe Abbildung 33. Diese werden mit Ostseewasser versorgt. Die Wassertemperatur wird konstant auf 15 °C gehalten.

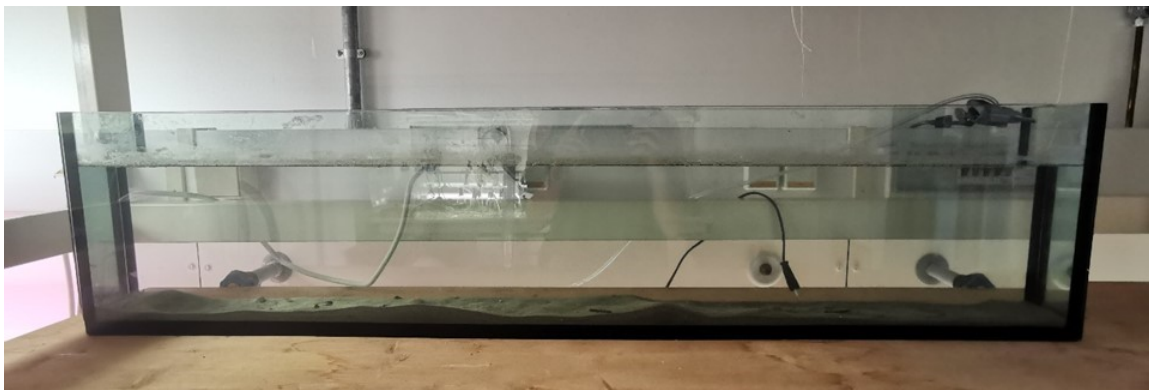


Abb. 33: Aufbau einer Kultivierungsanlage an der Universität Rostock. Diese besteht aus Glaskanälen mit einer Wassersäule von mindestens 20 cm Höhe und kann gekühlt werden. In diese Becken werden Treibsel-Pflanzen eingesetzt. (Foto: D. Glück)

Die Pflanzen in den Becken sind Treibsel-Pflanzen, die am Strand von Warnemünde gesammelt wurden. Abbildung 34 gibt einen Eindruck von der Beschaffenheit der verwendeten Treibsel-Pflanzen.

Die Kultur soll eine Versorgung mit Seegras-Samen für weitere Keimungsversuche ermöglichen sowie weitergehende wissenschaftliche Analysen an Seegras-Pflanzen im Rahmen des Projektes ermöglichen.



Abb. 34: Seegras-Pflanzen, die als Treibsel am Strand von Warnemünde (Rostock) gefunden wurden (Foto: D. Glück)

11.2 Erste Ideen zur Einbringung von Saatgut in die Aufwuchsträger

11.2.1 Herausforderungen im Umgang mit Seegras-Saatgut

Der Begriff Seegras umfasst eine ökologische Gruppe höherer Pflanzen, die in den Flachwasserzonen der Küstenbereichen der Ozeane heimisch sind. Zu den Seegräsern gehören Arten der Familien *Zosteraceae*, *Posidoniaceae*, *Cymodoceaceae* und *Hydrocharitaceae*. Die Pflanzen dieser Familien ähneln sich hinsichtlich mehrerer morphologischer und physiologischer Charakteristika.

Für das Saatgut ist eine dieser Gemeinsamkeiten eine Abwesenheit der Austrocknungstoleranz - die Samen dürfen nicht austrocknen, um ihre Keimungsfähigkeit zu erhalten. Ansonsten können sich die morphologischen Charakteristika der Seegräser-Samen innerhalb der Gruppen stark unterscheiden.

Die in der Ostsee heimische Art *Zostera marina* blüht zwischen Mai und Juli und bildet währenddessen und in den folgenden Wochen die Samen aus. Diese sind während ihrer Entwicklung in den reproduktiven Sprossen der Pflanze bereits deutlich zu erkennen. Die Seegras-Pflanze bildet ca. 3 mm x 1 mm x 1 mm längliche Samen, die im Verlauf ihrer Entwicklung von einer weißlich-grünen Färbung zu einer schwarz-braunen Färbung wechseln. Erst die dunklen Samen gelten als reif und können keimen.

Im Meer fallen die Samen im reifen Zustand aus ihrer Samenhülle und werden von der

Strömung in der Umgebung verteilt. Sedimentierender Sand bedeckt anschließend die Samen.

Die Samenreife und damit auch Keimungsfähigkeit erreichen die Samen erst im folgenden Frühjahr. Ein Auskeimen der Samen kann in der Ostsee ab März beobachtet werden.

Die Keimungsfähigkeit von Seegras-Samen ist nicht vom Umgebungslicht abhängig sondern von der Salinität und der Mächtigkeit des darüber liegenden Sediments.

Niedrige Salinitäten erhöhen die Keimungsrate. Eine hohe Sedimenttiefe, was dem Verschütten der Samen unter Sand gleichkommt, verhindert zwar nicht das erfolgreiche Auskeimen, wohl aber die Photosynthese der Pflanzen, die für die erfolgreiche Ansiedlung der Keimlinge nötig ist. Die Grenze hierfür liegt bei ca. 2 cm bis 4 cm.

Für den Umgang mit Seegras-Saatgut erfordert dies dementsprechend folgendes:

1. Seegras-Samen dürfen nicht austrocknen. Ob dies auch bedeutet, dass sie auch durchgängig von Wasser bedeckt sein müssen, ist bisher nicht klar.
Falls eine ständige Wasserbedeckung nicht erforderlich ist, wäre eine Ummantelung der Samen eine Möglichkeit, diese kurzzeitig außerhalb des Wassers zu verwenden. Für eine Ummantelung kämen Magnesium- und Calcium-Alginate in Frage. Diese können eine geleeartige Schutzschicht um den Samen darstellen, die diesen vor Austrocknung schützt.
2. Die Seegras-Samen können ähnlich wie bei der Einsaat z.B. von Getreide in ein Substrat (Aufwuchsträger) eingebracht werden; sie müssen nicht auf einer Oberfläche liegen, da die Keimfähigkeit wie bereits oben erläutert nicht vom Licht abhängig ist. Dieses Substrat kann mehrere Zentimeter dick sein. Der Seegras-Keimling sollte allerdings in der Lage sein, innerhalb der 2 cm - 4 cm die Oberfläche des Substrates zu erreichen.
3. Um eine hohe Keimungsrate der Samen zu erreichen, kann diese mit einem Niedrig-Salinität-Puls (0 ... 3 PSU) von 24 Stunden angeregt werden. Für einen längeren Zeitraum sollte allerdings die durchschnittliche Ostsee-Salinität (in deutschen Gewässern liegt diese zwischen 8 PSU und 14 PSU) nicht unterschritten werden, da dies die Entwicklung der Seegras-Pflanze hemmen kann.
4. Da die Samen erst in der folgenden Vegetationsperiode ihre Keimungsfähigkeit erhalten, ist die Nutzung von gesammelten Saatgut auch zeitlich eingeschränkt. Die Samen können gekühlt über die Wintermonate gelagert werden und ab Januar/Februar ist unter Laborbedingungen ein Auskeimen möglich. Die dauerhafte Lagerung von Saatgut ist nicht empfehlenswert, aber trotzdem möglich. Auch mehrjährige Samen können noch keimen, allerdings liegt die Keimungsrate deutlich niedriger.

11.2.2 Technologischer Ansatz für die Einarbeitung / Zuführung von Saatgut während der Herstellung der Aufwuchsträger

Zur Integration von Saatgut in verschiedene Aufwuchsträgervarianten wurden im Rahmen der Projektarbeiten erste Untersuchungen mit Saatgutschnüren / Saatgutbändern durchgeführt. Die Einarbeitung in die textilen Halbzeuge erfolgte nach dem Kern-Mantelverfahren auf einer KEMAFIL-Maschine. Die Saatbänder / -schnüre wurden dabei als unvermaschte Kernfäden zugeführt. Abbildung 35 zeigt die Einarbeitung einer Saatgutschnur in einen vorgefertigten Strang aus Seegras. In die Saatgutschnur wurde zur besseren Kenntlichkeit ein roter Markerfaden integriert. Die Herstellung der Saatgutschnüre kann auf einer

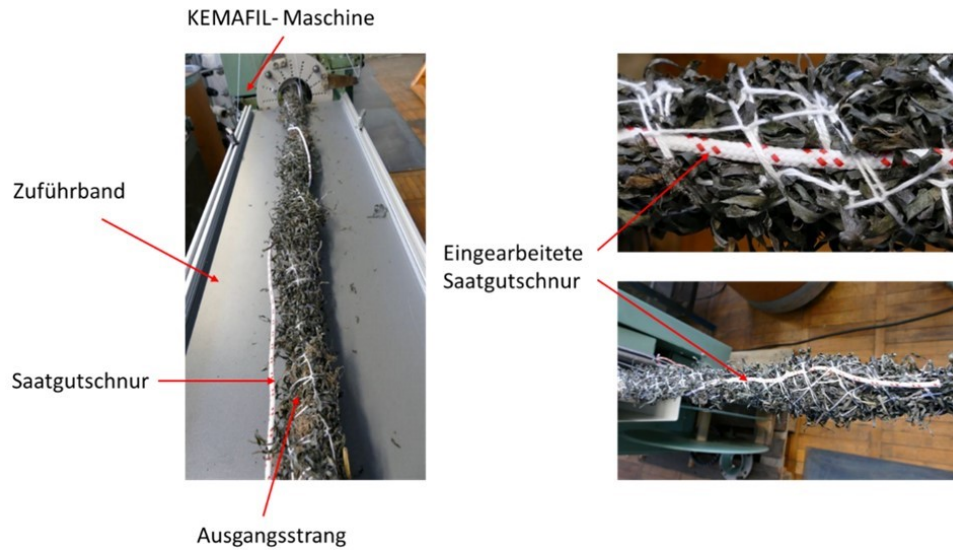


Abb. 35: Einarbeitung einer Saatgutschnur in einen vorgefertigten Seegrastrang

Rundwirk- oder KEMAFIL- Maschine erfolgen. Dabei werden die Samen während der Schnurproduktion unter Beachtung der im Abschnitt 11.2.1 definierten Randbedingungen aus einem Vorratsspeicher vereinzelt und in den Zylinder der Verarbeitungsmaschine gelegt.

Zukünftig ist vorgesehen, die Saatgutträger in den ersten Fertigungsschritt, die Strangherstellung, einzuarbeiten.

In der Abbildung 36 ist die Zuführung und Einarbeitung eines Saatgutbandes in einen vorgefertigten Seegrasstrang dargestellt. Eine weitere Möglichkeit ist die Zuführung von

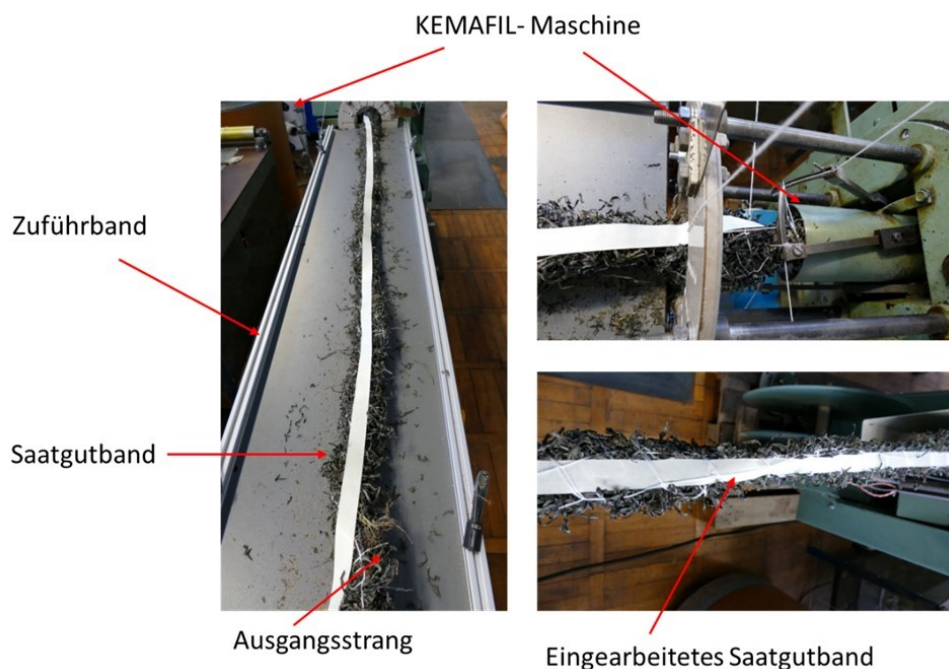


Abb. 36: Konzept zur Einarbeitung von Saatgutschnüren

Saatgut mit Hilfe einer *Pick- and Place-* oder *Streueinrichtung* während der Strangher-

stellung. Diese Variante ist als Arbeitspaket im Rahmen weiterer Forschungsaufgaben vorgesehen.

Unabhängig von der zukünftig favorisierten Technologie besteht die Herausforderung in der Behandlung des Saatgutes während der gesamten Prozesskette, da das Seegras-Saatgut niemals austrocknen darf, siehe Abschnitt 11.2.1.

Ziel ist es zunächst strangartige Strukturen herzustellen, um einen einstufigen Prozess zu realisieren. Die ersten Funktionsmuster werden gegenwärtig zur Bewertung der Keimfähigkeit in Laboraquarien der Universität Rostock untersucht.

11.3 Konzeptioneller Ansatz zur Ausbringung der Aufwuchsträger ohne Tauchereinsatz

Die Konzeptentwicklung ist in zwei Arbeitsschritten geplant. Im 1. Schritt wird eine mechanisierte Lösung angestrebt, die den manuellen Aufwand für die Taucher und damit insbesondere die erforderlichen Tauchzeiten reduziert.

Mit Hilfe eines noch zu entwickelnden Unterwasserpfluges wird zunächst eine muldenartige Vertiefung im Sediment erzeugt. Hierin wird der gitter- oder strangartige vorkultivierte Aufwuchsträger ausgerollt. Der kernlose, rollrasenartige Wickel ist an der Vorrichtung montiert und wird passiv ausgerollt, nachdem das erste Ende des Aufwuchsträgers mit Erdnägeln im Sediment fixiert wurde.

In der Abbildung 37 ist ein erstes Konzept dargestellt.

Die translatorische Vorwärtsbewegung erfolgt z.B. über eine Seilverbindung zu einem Schlauchboot. Erste Verlegeversuche sind im Dezember 2022 geplant.

Später ist eine halbautomatische, robotergestützte Verlegetechnologie auf dem Gewässergrund ein wichtiger Baustein zur erfolgreichen Vermarktung der Forschungsergebnisse, da nur unter dieser Voraussetzung ein energie- und kosteneffizientes Gesamtkonzept erstellt werden kann.

Es ist geplant mit Hilfe eines, in einem Folgeprojekt zu entwickelnden Unterwasserroboters, die Strukturen zu verlegen, zu vernageln und lokal mit Sediment zu bedecken.

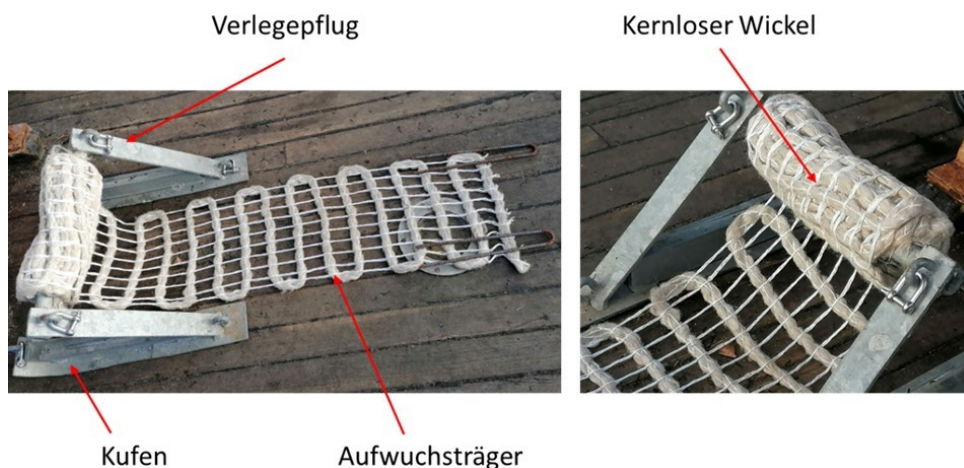


Abb. 37: Konzeptioneller Ansatz für Verlegehilfe