iSeal –

Forschung für die Naturschutzpraxis

Schlussbericht (Teil I) - Kurzbericht

Zuwendungsempfänger	Senckenberg Gesellschaft für Naturforschung
Förderkennzeichen	03F0913F
Vorhaben	DAM Schutz und Nutzen- iSeal: Integrierte sozial-ökologische Netzwerkanalyse für die transdisziplinäre Entwicklung von Indikatoren zur Reduktion anthropogener Stressoren; Vorhaben: Erfassung und Einfluss gebietsfremder und invasiver Arten auf natürlichen und künstlichen Hartsubstraten
Laufzeit des Vorhabens:	01.12.2021 - 30.11.2024
Berichtszeitraum	01.12.2021 – 30.11.2024

Das diesem Bericht zugrundeliegende Vorhaben wurde mit Mitteln des Bundesministeriums für Bildung und Forschung unter dem Förderkennzeichen 03F0913F gefördert. Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt bei der Senckenberg Gesellschaft für Naturforschung.

Einleitung

Im Rahmen des iSeal-Projekts wurde bei Senckenberg am Meer (SaM) untersucht, wie sich gebietsfremde und invasive Arten auf natürliche Miesmuschelbänke und Austernriffe in der Deutschen Nordsee auswirken und welche Indikatoren sich für ihr Monitoring eignen. Ein Ausgangspunkt waren langjährige Daten des Landesbetrieb für Küstenschutz, Nationalpark und Meeresschutz Schleswig-Holstein (LKN-SH), mit denen die zeitliche Entwicklung gebietsfremder Arten wie der Pazifischen Auster (*Magallana gigas*) von 1999 bis 2022 analysiert wurde. Gleichzeitig wurden 2023 erstmals Hängekulturen („Smartfarms“) eines lokalen Muschelfischereibetriebes beprobt, um Kultursysteme mit natürlichen Beständen vergleichend zu betrachten. Ziel war es, auf dieser Datengrundlage robuste Monitoring-Instrumente zu entwickeln und diese in nationale (BLANO) sowie internationale (OSPAR, MSFD Descriptor D2) Strategien einzubringen.

Ablauf des Vorhabens

Von 2019 bis 2023 erfolgten regelmäßige Probenahmen an vier Standorten im Niedersächsischen Wattenmeer – Kaiserbalje, Dornumer Nacken, Nordland und Crildumersiel. An jedem Standort wurden die Habitate „Muschelbett“, „Bio-Deposit“ und angrenzendes Sandwatt mit Zylinderproben (ø 15 cm, Sedimenttiefe 10 cm) beprobt. Im Herbst 2023 wurden an Smartfarms vor Hooksiel die Netzkollektoren (25 × 25 cm) untersucht, deren Makrofauna bei Ernte nach sechs bzw. 18 Monaten gesamtheitlich erfasst wurde. Alle Proben wurden im Labor sortiert, morphologisch und, wo nötig, per DNA-Barcoding bestimmt. Die Biomasse – Trockengewicht und aschefreies Trockengewicht – wurde gewogen, auf Quadratmeter hochgerechnet und in Kohlenstoffflüsse umgerechnet.

Wesentliche Ergebnisse

Biodiversitätserfassung an biogenen Strukturen und Smartfarms

Die Biodiversitätsanalysen (Shannon-H, Simpson-D, Pielou-Evenness, Abb. 1) zeigten, dass die reine Miesmuschelbank Crildumersiel im Muschel-dominierten Habitat die höchste Artenvielfalt aufweist, und Unterschiede den untersuchten Austernriffen geringfügig signifikant waren während hochsignifikante Unterschiede insgesamt eher habitatabhängig waren. Der Vergleich mit Smartfarm-Daten ergab, dass Larvenkollektoren durchschnittlich mehr Arten und bis zu sechs gebietsfremde Arten beherbergten, wohingegen natürliche Bänke nur zwei bis vier gebietsfremde Arten aufwiesen. Amphipoden, die auf Smartfarms häufig vorkamen, konnten wahrscheinlich aufgrund der Probennahme-Methodik an den biogenen Strukturen kaum nachgewiesen werden.

Untersuchung von Langzeitreihe mit ENA

Die ökologische Netzwerkanalyse (ENA) mit dem R-Paket enaR lieferte erstmals quantitative Einblicke in trophische Interaktionen. Dort dominierte die heimische *Mytilus edulis* in zwei untersuchten Gebieten mit vollständiger Zeitreihe (1999–2022) den Mixed Trophic Impact (MTI), dicht gefolgt von der gebietsfremden *Magallana gigas*, während beide Arten gegenseitig negative Einflüsse zeigten. Mit zunehmender Biomasse gebietsfremder Arten verringerte sich das Detritivorie/Herbivorie-Verhältnis und der Finn Cycling Index (FCI), was auf eine verstärkte Herbivorie und ein reduziertes internes

Recycling hinweist. Gleichzeitig nahmen Relative Redundancy (RED/CAP), Relative Overhead (OH/CAP) und Flow Diversity zu, was auf mehr alternative trophische Pfade, höhere Pufferkapazität und insgesamt größere Netzwerkvielfalt hindeutet.

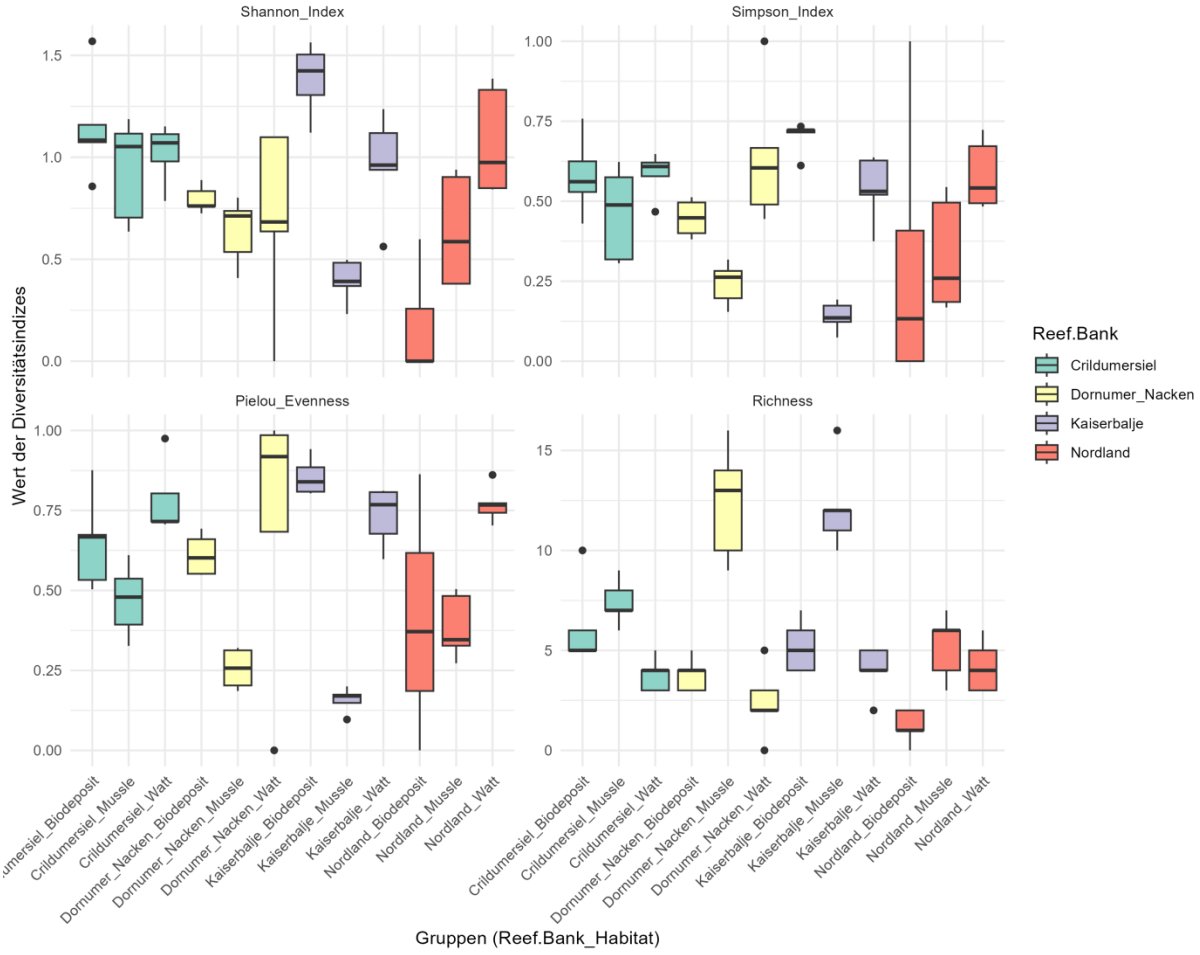

Abb. 1: Diversitätsindizes der untersuchten Stationen, unterteilt in die verschiedenen Habitate Muschelbank/-riff (Mussle), Biodeposit und Watt abseits der eigentlichen biogenen Struktur. Betrachtet man das Muschel-dominierte Habitat als Hauptbestandteil der biogenen Strukturen, so wurden die höchsten Diversitätswerte an der Station Crildumersiel nachgewiesen. Hierbei handelt es sich um die einzige biogene Struktur, die auch heute noch als Miesmuschelbank bezeichnet werden kann. Die Standorte Dornumer Nacken, Kaiserbalje und Nordland sind Austernriffe.

Zusammenarbeit und Ausblick

Ein zentraler Meilenstein war der im Februar 2024 von SaM ausgerichtete Workshop der neu gegründeten sustainMare-Working Group „Monitoring und Assessment“ mit über 30 projektinternen sowie projektexternen ExpertInnen. Dort wurden Indikator-Konzepte abgestimmt und Arbeitspakete definiert, die nun auf nationaler und internationaler Ebene in die MSFD-Umsetzung (z.B. Descriptor D2, Kriterien 2 & 3) einfließen. Als nächster Schritt ist die ENA-Auswertung der 2023/24-Proben geplant, sowie eine Analyse der Proben mit genetischen Methoden. Diese Ergebnisse schaffen eine solide Basis für ein evidenzbasiertes, praxisnahes Management gebietsfremder Arten in der Deutschen Nordsee.

iSeal –

Forschung für die Naturschutzpraxis

Schlussbericht (Teil II)

Zuwendungsempfänger	Senckenberg Gesellschaft für Naturforschung
Förderkennzeichen	03F0913F
Vorhaben	DAM Schutz und Nutzen- iSeal: Integrierte sozial-ökologische Netzwerkanalyse für die transdisziplinäre Entwicklung von Indikatoren zur Reduktion anthropogener Stressoren; Vorhaben: Erfassung und Einfluss gebietsfremder und invasiver Arten auf natürlichen und künstlichen Hartsubstraten
Laufzeit des Vorhabens:	01.12.2021 - 30.11.2024
Berichtszeitraum	01.12.2021 – 30.11.2024

Das diesem Bericht zugrundeliegende Vorhaben wurde mit Mitteln des Bundesministeriums für Bildung und Forschung unter dem Förderkennzeichen 03F0913F gefördert. Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt bei der Senckenberg Gesellschaft für Naturforschung.

Einleitung

Das Gesamtziel dieses Projektes ist es, die Auswirkungen multipler Stressoren auf Biodiversität, Funktionalität und auf das Nahrungsnetz in Küstenökosystemen zu untersuchen und diese in einem integrativen Ansatz anhand von Indikatoren und Schwellenwerten zu bewerten. Die Auswahl der Zielindikatoren und Bedarfe wurde in einem ersten Stakeholderdialog bestimmt. Das Projekt verfolgt einen ganzheitlichen Ökosystem-Ansatz, um die Struktur und Funktion von sozial-ökologischen Systemen entlang der deutschen Nordseeküste zu untersuchen. Auf Basis dieser wissenschaftlichen und anwendungsorientierten Grundlagen werden gemeinsam mit den beteiligten Stakeholdern Handlungsempfehlungen zur Reduzierung von Stressoren erarbeitet. Die gemeinsamen Ziele des Projektes sind:

1. ein Verständnis über den Einfluss multipler Stressoren (Klimawandel, Fischerei, invasive Arten) auf Biodiversität, Funktionalität und trophischen Interaktionen mit Hilfe eines Multi-Methoden Ansatzes (multivariate Statistik, Mesokosmos- Experimente, Ökologische Netzwerkanalyse (ENA) zu schaffen
2. mittels experimenteller Mesokosmen die Interaktionen von einzelnen und kumulativen Stressoren bei unterschiedlicher Intensität (Temperaturerwärmung, invasive Arten) auf benthische Nahrungsnetze zu quantifizieren
3. die Entwicklung von Schwellenwerten und die Bewertung des ökologischen Zustandes von Benthos, Fischen und Nahrungsnetzen mittels neuer und bereits etablierter Indikatoren im Kontext von MSRL und OSPAR
4. Entwicklung neuer Monitoringmethoden gebietsfremder Arten mittels genetischer Verfahren
5. die Grundlagen einer einheitlichen Umsetzung der ENA zur Bewertung von Nahrungsnetzen in der Naturschutzpraxis in den Nationalparks zu schaffen
6. die transdisziplinäre Entwicklung einer innovativen Kopplung sozialer und ökologischer Daten in einer integrierten Netzwerkanalyse (SENA) und Erarbeitung eines Ökosystemkonzeptes

Reallabore sind die Nationalparke im schleswig-holsteinischen und niedersächsischen Wattenmeer, zwei Schutzgebiete nach NATURA 2000 (sowohl Vogelschutz- als auch FFH-Gebiete) und zugehörig zum UNESCO Weltnaturerbe. Zur Erreichung der Forschungsziele sind die Arbeitsgebiete innerhalb der Reallabore ausgewählt in Anlehnung an (1) der Verfügbarkeit von Langzeit- und Monitoringdaten der Projektpartner und beteiligten Stakeholder, (2) dem Einfluss einzelner oder mehrerer Stressoren, (3) den Gradienten der Intensität der Stressoren, (4) den Bedarfen der Stakeholder und beteiligten Behörden im Zusammenhang mit Monitoring-, Bewertungs- und Naturschutzfragen und (5) einer zukünftigen dauerhaften gemeinsamen Kooperation („joint monitoring living lab approach“), insbesondere für Nahrungsnetzfragestellungen, in den Nationalparken. Das Projekt iSeal ist in fünf Arbeitspakete (WP1-5), einem Transferpaket (WP6) und einem Datenmanagementpaket (WP7) organisiert, die sich gegenseitig ergänzen und aufeinander aufbauen. Sowohl die Gesamtkoordination des Projektes, als auch die Koordination des Arbeitspaketes zu „Transfer und Handlungsempfehlungen“ erfolgt durch die NPV-SH, als ein Stakeholder (WP6). Die WPs 1-3 konzentrieren sich auf die Erfassung und die Bewertung von Auswirkungen von anthropogenen Stressoren auf Biodiversität, Funktionalität und ökologischem Zustand verschiedener charakteristischer Lebensgemeinschaften in den Nationalparken. Während WP1-2 dabei auf empirische Langzeitdaten fokussiert, untersucht WP3 die gegenwärtigen und zukünftigen Auswirkungen anthropogener Stressoren unter kontrollierten Bedingungen. Die WPs 1-3 liefern sowohl biologische Basisdaten, Validierungsergebnisse und relevante Daten zu anthropogenen Stressoren für die Parametrisierung der Nahrungsnetzmodellierung in WP4, sowie Metadaten an WP7. Die in WP4 zum Einsatz kommende Ökologische Netzwerkanalyse (ENA) definiert den Kern des iSeal Projektes, weil es nicht nur die Interaktionen der verschiedenen Ökosystemkomponenten und agierenden Stressoren integriert, sondern auch die Schnittstelle zwischen Naturwissenschaft und Sozialwissenschaft in WP5 darstellt. WP5 widmet sich der Umsetzung der ENA in der Naturschutzpraxis und koppelt soziale und ökologische Daten in einer integrierten sozialen Netzwerkanalyse (SENA). Auf Basis dieser wissenschaftlichen und anwendungsorientierten Grundlagen werden in WP6 gemeinsam mit den beteiligten Stakeholdern Handlungsempfehlungen erarbeitet und die gewonnenen Produkte nutzbar gemacht.

Die Aufgaben von Senckenberg liegen hierbei primär in WP2 „Erfassung und Einfluss gebietsfremder und invasiver Arten auf natürlichen und künstlichen Hartsubstraten“ sowie WP4 „Holistische Nahrungsnetzmodellierung mittels Ökologischer Netzwerkanalyse (ENA)“ mit den folgenden Aufgaben:

- Aufgabe 2.1 Zeitliche Analyse der Bioinvasion
- Aufgabe 2.2 Erfassung und Einfluss invasiver Arten auf Hängekulturen (Smartfarms)
- Aufgabe 2.3 Erfassung invasiver Arten auf mit munitions-belasteten Habitaten in CONMAR
- Aufgabe 2.4 Indikatorenentwicklung und genetisches Baseline-Monitoring als Frühwarnsystem
- Aufgabe 4.1: Konstruktion und Modellierung von Nahrungsnetzen aus Langzeitdaten mittels Ökologischer Netzwerkanalyse (ENA)

Ergebnisse

Gemeinschaften und gebietsfremde Arten natürlicher Miesmuschelbänke und Austernriffe des Nationalparks Niedersächsisches Wattenmeer

Im Laufe des Projektes wurden wiederholt vier Standorte im Nationalpark Niedersächsisches Wattenmeer beprobt: Kaiserbalje, Dornumer Nacken sowie Nordland und Crildumersiel. Letztere ist die einzige reine Miesmuschelbank (*Mytilus edulis*), während die anderen Standorte Austernriffe (*Magallana gigas*) repräsentieren. Der Standort Nordland wurde bereits 2005 beprobt und auf die Artenzusammensetzung untersucht (Markert et al. 2010). An allen Standorten wurden 15 Proben entnommen, unterteilt in 5 Proben aus der Riffzone, 5 Proben aus den muschelfreien Biodepositen und 5 Proben aus dem umgebenden Mischwatt. Zur Entnahme wurde ein Stechzylinder (Durchmesser: 15 cm) verwendet, und die obersten 10 cm des Sediments wurden mit einem Sieb (1 mm Maschenweite) auf Makrofauna und potentiell gebietsfremde Arten untersucht. Anschließend wurden alle sortiert und soweit möglich auf Artebene bestimmt. Bei Unsicherheiten wurden Tiere mittels DNA Barcoding bestimmt.

Bei der Probennahme an der Station Nordland im September **2022** zeigte sich, dass die vormals als „Mytilus-Patch“ klassifizierten Bereiche (Markert et al. 2010) inzwischen vollständig von *Magallana gigas* dominiert werden und dementsprechend eher einem „Crassostrea-Patch“ entsprechen. Die relativen Anteile von *M. edulis* und *M. gigas* lagen 2022 bei etwa 55% bzw.45% (Abb. 1A), vergleichbar mit den Markert-Daten von 2010 für das *M. gigas*-Patch (47% vs 53%). Nur Crildumersiel verbleibt als eine echte *M. edulis*-Bank mit über 90 % Anteilen an Miesmuscheln. Im Bezug auf die Biomasse dominiert *M. gigas* aber in der Regel deutlich die biogenen Strukturen (Abb. 1B).

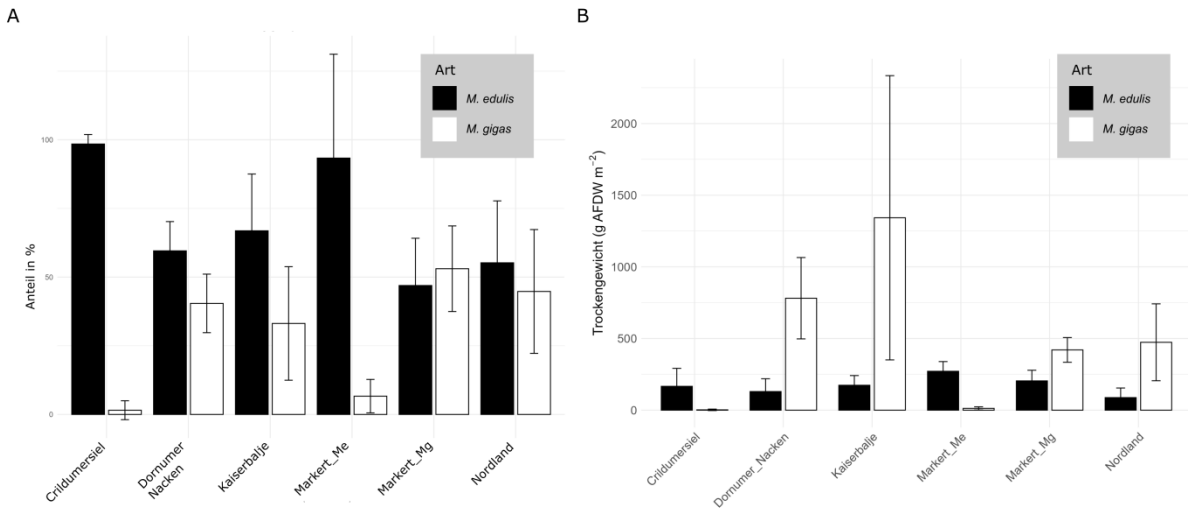

Abb. 1: **A** Relative Abundanz von *M. edulis* und *M. gigas* an den untersuchten Standorten inklusive Markert et al. 2010. Markert_Me entspricht dem „*Mytlius edulis* patch“ während Markert_Mg einen „*Magallana gigas*“ patch repräsentiert. **B** Biomasse von *M. edulis* und *M. gigas* an den untersuchten Standorten

Vergleicht man die Diversität (Shannon-H, Simpson-D, Pielou’s Evenness) für das Muschelbett („Mussle“), so ergab sich an Crildumersiel der höchste Wert (Shannon-H = 1,19, Simpson-D = 0,62, Evenness = 0,61, Abb. 2). Auf Ebene ganzer

Habitate konnten mit einer permutierenden ANOVA (PERMANOVA, *adonis2* in vegan, R 4.2.1) jedoch nur teilweise signifikante Unterschiede ($p < 0,05$) festgestellt werden, etwa zwischen den Muschel-dominierten Habitaten von Dornumer Nacken und Kaiserbalje; zwischen Nordland und Crildumersiel fiel die Differenz nicht signifikant aus, obwohl Letztere die einzige reine Miesmuschelbank darstellt. Ein NMDS-Plot (Bray–Curtis-Dissimilarität, 2 Dimensionen, Stress = **0.13**, Abb. 3) zeigt, dass sich Habitate (*Mussle*, *Bio-Deposit*, *Watt*) innerhalb desselben Standorts stärker unterscheiden als identische Habitate zwischen verschiedenen Standorten.

Auch die Verteilung gebietsfremder Arten ist über alle Stationen vergleichbar: *Austrominius modestus* und *Tharyx killariensis* wurden an allen vier Standorten gefunden, wobei *A. modestus* bereits 2005 an Nordland nachgewiesen wurde. *Brachynotus sexdentatus* war nur an Crildumersiel und Nordland präsent und *Hemigrapsus takanoi* an den Stationen Dornumer Nacken und Kaiserbalje. Insgesamt traten pro Station zwei bis drei gebietsfremde Arten auf (Tab. 1). Außer *A. modestus* wurde aber für Nordland durch Markert et al. (2010) keine weitere gebietsfremde Art nachgewiesen.

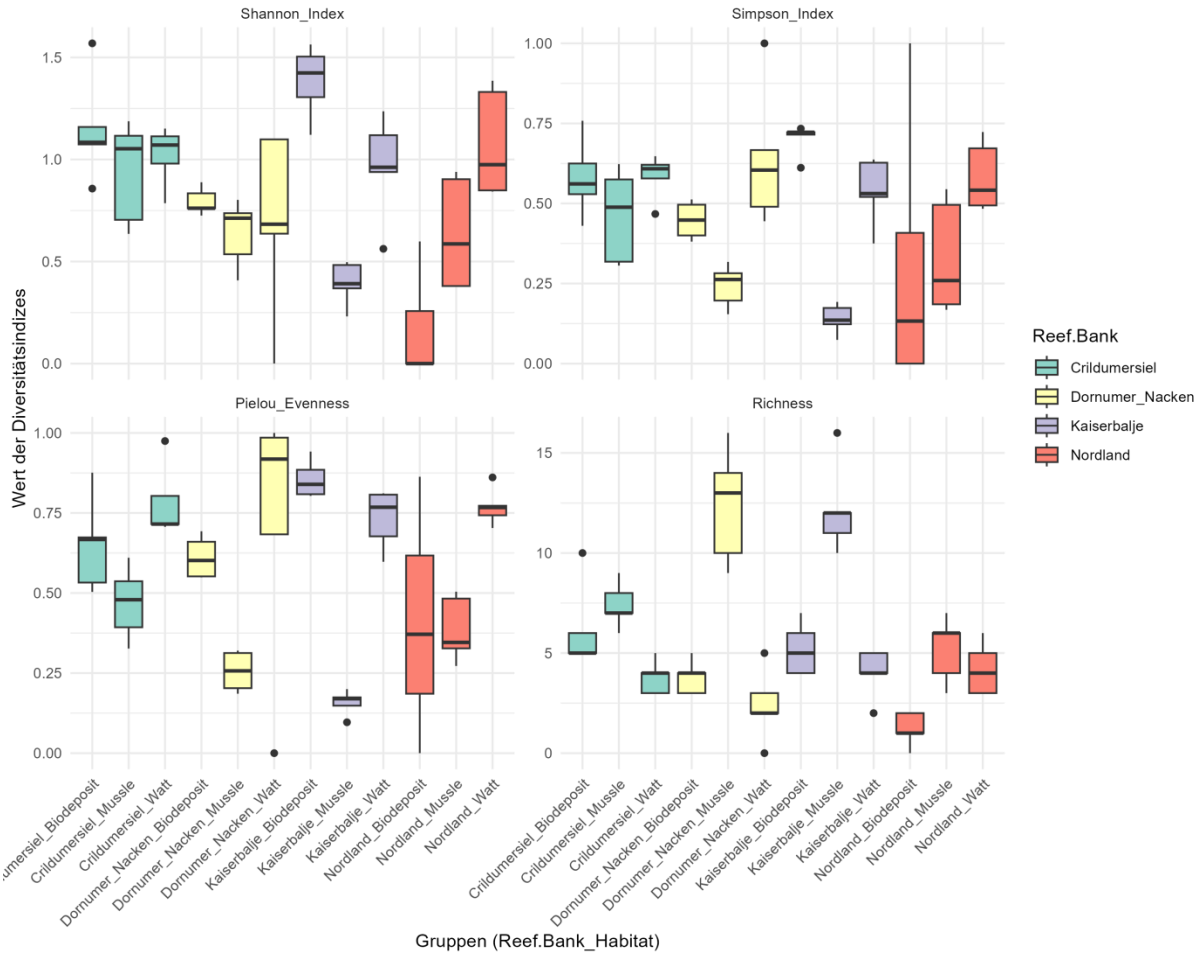

Abb. 2: Diversitätsindizes der untersuchten Stationen unterteilt in die verschiedenen Habitate Muschelbank/-rifft (Mussle), Biodeposit und Watt abseits der biogenen Strukturen. Betrachtet man das Muschel-dominierte Habitat als Hauptbestandteil der biogenen Strukturen, so wurden die höchsten Diversitätswerte an der Station Crildumersiel nachgewieen. Hierbei handelt es sich um die einzige biogene Struktur, die auch heute noch als Miesmuschelbank bezeichnet werden kann. Die Standorte Dornumer Nacken, Kaiserbalje und Nordland sind Austernriffe.

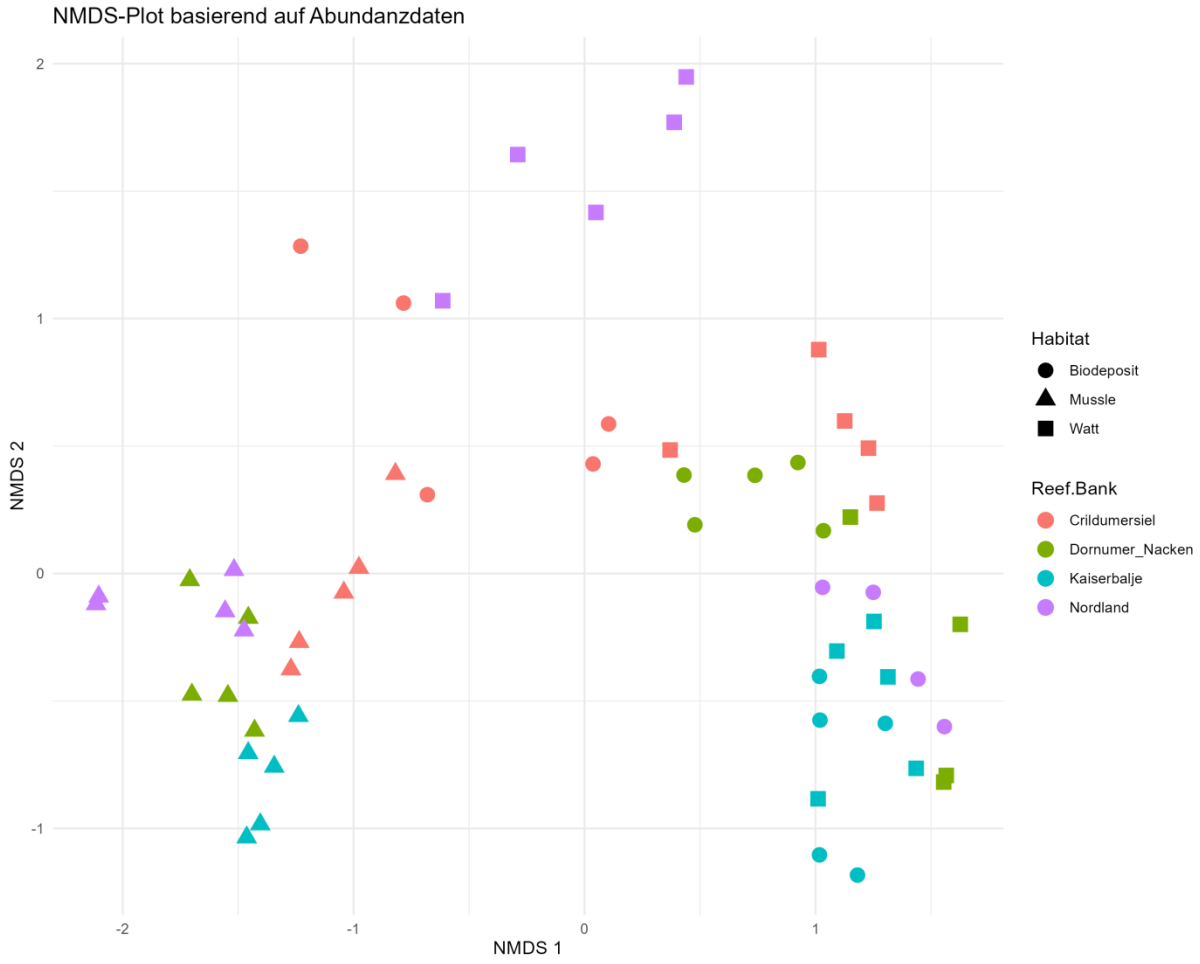

Abb. 3: NMDS Plot der Gemeinschaften der verschiedenen untersuchten Standorte. Symbole stellen die Habitate dar, während die Standorte durch die Farben repräsentiert sind.

Tabelle. 1: Präsenz (1) und Absenz (1) von gebietsfremden Arten (außer *M. gigas*) in den untersuchten Muschelbänken (Crildumersiel) und Austernriffen (Dornumer Nacken, Kaiserbalje, Nordland), sowie den Ergebnissen der Studie von Markert et al. 2010, die ebenfalls an dem Standort Nordland durchgeführt wurde.

	A. modestus	*H. takanoi*	*T. killariensis*	*B. sexdentatus*
Crildumersiel	1	0	1	1
Dornumer Nacken	1	1	1	0
Kaiserbalje	1	1	1	0
Nordland	1	0	1	1
Markert et al 2010 *M. edulis* patch	1	0	0	0
Markert et al 2010 *M. gigas* patch	1	0	0	0

Vergleich natürlicher Miesmuschelbänke mit der Diversität an einer Smartfarm

Im weiteren Projektverlauf wurde untersucht, wie Miesmuschelhängekulturen (“Smartfarms”) im Vergleich zu natürlichen Miesmuschelbänken in ihrer Artenzusammensetzung und ihrer Vulnerabilität gegenüber gebietsfremden Arten abschneiden. Smartfarms dienen dazu, den Druck auf natürliche Bestände zu reduzieren und gleichzeitig den Bedarf an Saatmuscheln zu sichern, indem im Frühjahr Netz- oder Larvenkollektoren in der Wassersäule verankert werden. Über etwa sechs Monate wachsen die daran haftenden Larven heran, bevor die Kollektoren zur Ernte aus dem Wasser gehoben werden. Da die Smartfarms permanent unter Wasser liegen, erfolgt die Probennahme ausschließlich zum Erntezeitpunkt. Im September 2023 wurden von mehreren Kollektoren in der Außenjade Proben genommen (total n = 10) und alle Organismen innerhalb eines 25 × 25 cm-Areals abgesammelt; die Proben stammten aus unterschiedlichen Wassertiefen (35 bis 160 cm) und Verweildauern (6 vs. 18 Monate). Anschließend wurden alle Individuen gezählt und, sofern möglich, auf Artebene bestimmt (Tabelle 2).

Tabelle. 2: Vergleich von Begleitfauna an einer Smartfarm (Kollektor 1 bis 4) mit *Mytilus edulis* Miesmuschelbank (Me_SK, hellgrau) sowie dem untersuchten Miesmuschel-Patch von Markert et al. 2010 (dunkelgrau). Orange gefärbte Zeilen geben die Abundanz von Arten wieder, die als gebietsfremd für diesen Teil der Nordsee gelten.

		Kollek-tor 1	Kollek-tor 1	Kollek-tor 2	Kollek-tor 2	Kollek-tor 3	Kollek-tor 3	Kollek-tor 4	Kollek-tor 4	Kollek-tor 4	Kollek-tor 4	Me SK	Me SK	Me SK	Me SK	Me SK	Markert 2010
	Probennummer	1	6	2	7	3	8	4	9	5	10	1	2	3	4	5	Mytilus patch
Amphipoda	Amphipoda sp.	4061	2233	4513	2429	766	740	113	245	465	693						
Amphipoda	*Jassa marmorata*	777	177	653	67	29	3	29	15	82	110						
Amphipoda	*Stenothoe monoculuides*	6	6	3	15	139	53	30	29	32	36						
Cirripedia	*Balanus crenatus*	7			44	165	143	138	85	71	58						57
Cirripedia	*Austrominius modestus*					3	96	4		5		248	74	670	391	906	63247
Cirripedia	*Semibalanus balanoides*					47	38	2									641
Collembola	*Anurida maritimia*																75
Caprellidae	*Caprella linearis*							1	1		1						
Caprellidae	*Caprella mutica*								1		2						
Caprellidae	*Caprella acanthifera*			1													
Decapoda	*Cancer pagurus*	2	6	3	3												
Decapoda	*Carcinus maenas*						6	6	3	1	1						113
Decapoda	*Hemigrapsus sp.*	8	8	5	7	15	3			2							
Decapoda	*Pisidia longicornis*							3	3								
Decapoda	*Brachynotus sexdentatus*											1		1	1		
Isopoda	*Jaera albifrons*																472
Gastropoda	*Crepidula fornicata*					2	1	1	1								
Gastropoda	*Littorina littorea*																604
Gastropoda	Gastropoda sp.				1	1		6	5	1	1						
Nemertea	*Lineus ruber*																264
Nemertea	*Malacobdella* sp.																1056
Nemertea	*Tetrastemma* sp.																19
Nemertea	*Emplectonema gracile*						8	19	3	1							
Oligochaeta	Oligochaeta sp.																245
Oligochaeta	Oligochaeta spp.																736
Oligochaeta	*Tubificoides benedii*											129	88	108	82	112	1867
Polychaeta	*Aphelochaeta marioni*																1226

Polychaeta	*Capitella capitata*																585
Polychaeta	Polychaeta sp.																38
Polychaeta	*Polydora ciliata*																189
Polychaeta	*Pygospio elegans*																38
Polychaeta	*Phyllodoce mucosa*																19
Polychaeta	*Nereis pelagica*	16	32	31	37	28	80	15	10	4							
Polychaeta	*Neoamphitrite figulus*		1	2													
Polychaeta	*Tharyx killariensis*											4	2	7	45	18	
Polychaeta	*Capitella capitata*											16	6	9	8	34	
Polychaeta	*Heteromastus filiformis*											13	3	9	18	12	
Polyplacophora	*Lepidochinota cinereus*																207
Anthozoa	*Cylista elegans*	1	1		4	2	5	9	6	2	4						
Arachnida	*Oedothorax apicatus*	1															
Bivalvia	*Mytilus edulis*	433	492	662	614	771	783	237	143	217	157	19	14	11	12	25	1318
Bivalvia	*Abra nitida*											1					
Bivalvia	*Cerastoderma edule*																19
Bivalvia	*Macoma balthica*																19
Bivalvia	*Scrobicularia plana*																19
Bivalvia	*Venerupis senegalensis*																19
Bivalvia	*Scrobicularia plana*												2		5		
Bivalvia	*Magallana gigas*														1		94
Plathelminthes	Plathelminthes sp.	4	21	16	21	4	6	10	3	3							
Hydrozoa	*Ectopleura larynx*					50	142	530	264	222	200						
Hydrozoa	*Laomedea flexuosa*																present
Hydrozoa	Tubularia sp.																present
Hydrozoa	*Obelia cf. dichotoma*																present
Hydrozoa	*Obelia longissima*								18								
Bryozoa	*Conopeum reticulum*																present
Bryozoa	*Electra pilosa*				1	14	24		1								
Rhodophyta	*Gracilaria vermiculophylla*						1										
Rhodophyta	Rhodoceae sp.	1					6	2									
Chlorophyta	Chlorophylaceae sp.																
	Richness	12	10	10	12	17	18	17	18	14	11	8	7	7	9	6	30

Die Artengemeinschaft auf den Smartfarms wies eine deutlich andere Artenzusammensetzung auf als die natürlichen Miesmuschelbänke. Während *Austrominius modestus* in den Miesmuschelbankproben die häufigste gebietsfremde Art darstellte, tauchte sie in nur vier von zehn Kollektorproben auf. Im Gegensatz dazu fanden sich auf den Kollektoren drei Amphipoden-Arten, die in den Proben der natürlichen Banken vollständig fehlten. Vor Ort waren Amphipoden jedoch klar sichtbar, was nahelegt, dass die gewählte Beprobungstechnik sie nicht ausreichend erfasst. Durchschnittlich beherbergten die Smartfarms eine höhere Artenzahl als die Miesmuschelbank Crildumersiel (Tab. 2), was sich auch in der Zahl der gebietsfremden Arten widerspiegelt: An den natürlichen Standorten wurden nur zwei bis drei gebietsfremde Taxa nachgewiesen, auf den Smartfarms hingegen sechs (*Jassa marmorata*, *Austrominius modestus*, *Caprella mutica*, *Hemigrapsus* sp., *Crepidula fornicata*, *Gracilaria vermiculophylla*). Die Pazifische Auster (*Magallana gigas*) fehlte auf den Kollektoren vollständig, was vermutlich darauf zurückzuführen ist, dass ihre Larvenansiedlung in den Spätsommer fällt und somit regelmäßig erst nach dem Erntezeitpunkt stattfindet.

Es bleibt zu klären, ob die in unseren Proben detektierten gebietsfremden Arten tatsächlich das Zusammenspiel auf den Miesmuschelkulturen beeinflussen. So weisen die heimischen Amphipoden im Mittel zwar höhere Abundanzen auf als *Jassa marmorata*, doch durch die größere Einzeltier-Biomasse dieser gebietsfremden Art könnte dennoch eine starke ökologische Wirkung bestehen. Um diese Interaktionen quantitativ zu erfassen, ist eine Ecological Network Analysis (ENA) nötig. Besonders aussagekräftig sind dabei Zeitreihen—sie ermöglichen, Veränderungen im Netzwerk, etwa infolge steigender Biomasse gebietsfremder Arten, zeitlich nachzuvollziehen. Deshalb wurden in 2023 und 2024 zusätzliche Probenahmen durchgeführt, deren Auswertung per ENA in einem Folgeschritt geplant ist.

Potenzieller Einfluss von gebietsfremden Arten auf ENA Indizes

Im Rahmen von WP 2 (Aufgabe 2.1) sowie WP4 (Aufgabe 4.1) wurden 2405 Langzeitproben (1999–2022) der Makrofauna von 14 eulitoralen Muschelbänken im Nationalpark Schleswig-Holsteinisches Wattenmeer (Lister Tief, Norderhever, Meldorfer Bucht, Norderaue; Abb. 4) einer ökologischen Netzwerkanalyse (ENA) unterzogen. Ziel war es, den Einfluss gebietsfremder Arten – exemplarisch dargestellt an der Pazifischen Auster (*M. gigas*) – auf eine Auswahl von ENA-Indizes zu quantifizieren.

Für die ENA wurden drei Datentabellen vorbereitet:

1. Eine **Biomasse-Tabelle** mit Monitoringdaten und Biomasse in Kohlenstoff.
2. Eine **Diet-Matrix**, in der für jede Art aus Literaturquellen die Futterbeziehungen (Wer frisst wen in welchem Anteil) dokumentiert sind.
3. Eine **Attribut-Tabelle** mit energetischen Parametern wie Assimilations- und Produktionsraten je Art.

Mithilfe dieser Input-Daten wurde die ENA mit dem R-Paket enaR durchgeführt. ENA erlaubt es, mittels Input-Output-Analyse die Struktur, Funktion und Entwicklungsdynamik eines Ökosystems zu bewerten (Baird & Schückel 2024).

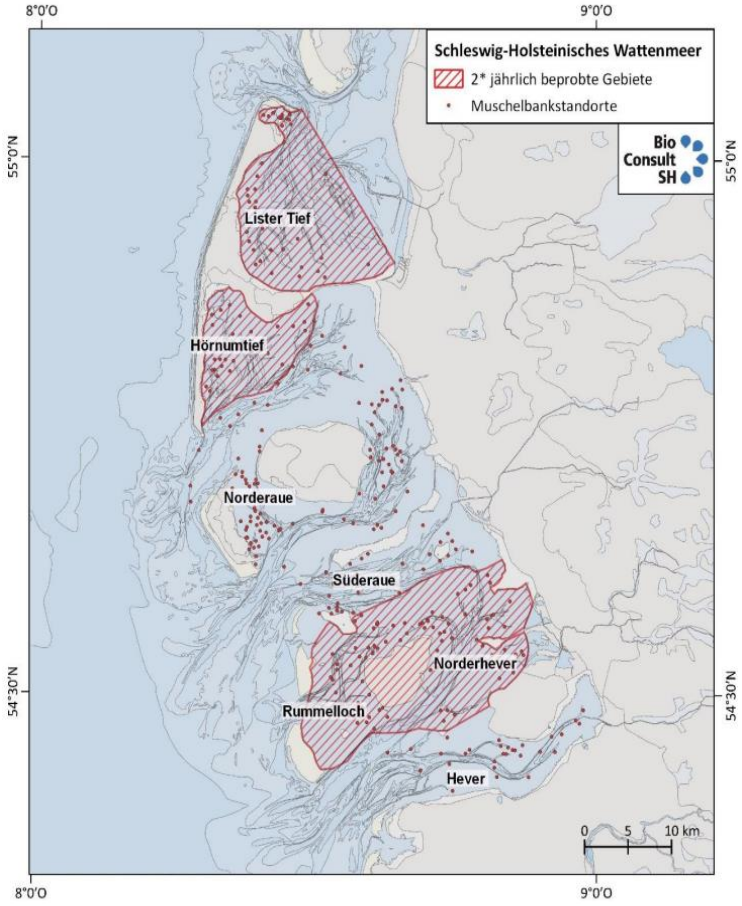

Abb. 4: Karte der Standorte der Muschelbänke aus dem Miesmuschelmonitoring im Schleswig-Holsteinischen Wattenmeer (ohne Dithmarscher Wattenmeer, nicht alle werden hier untersucht, aus Groß et al. 2023).

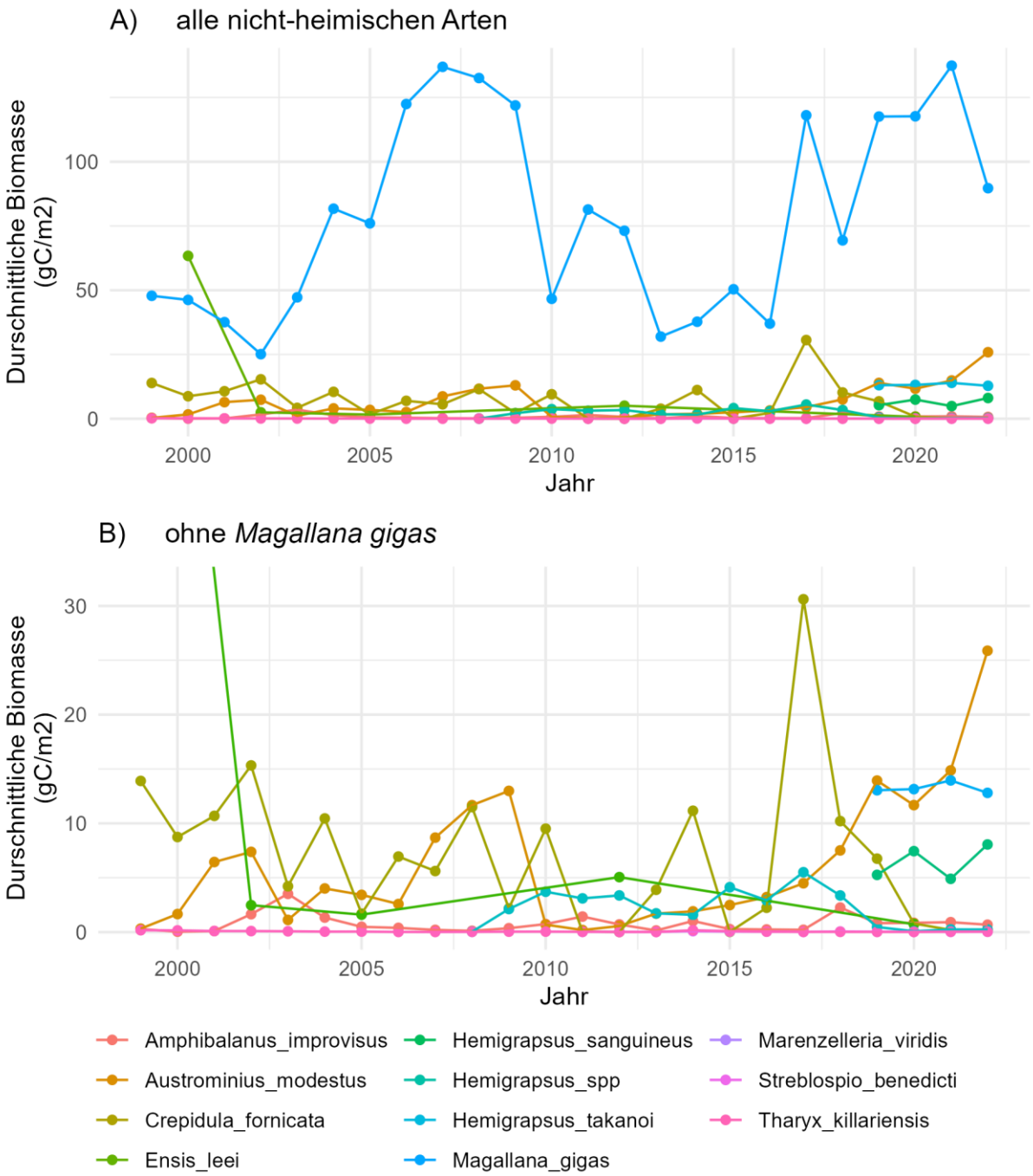

Abb. 5: Zeitlicher Verlauf der durchschnittlichen Biomassen der gebietsfremden Arten von 1999 – 2022 (gesamter Datensatz). A) Alle gebietsfremden Arten. *Magallana gigas* hat die höchste Biomasse. B) Zur besseren Sichtbarkeit der anderen Arten wurde *M. gigas* entfernt.

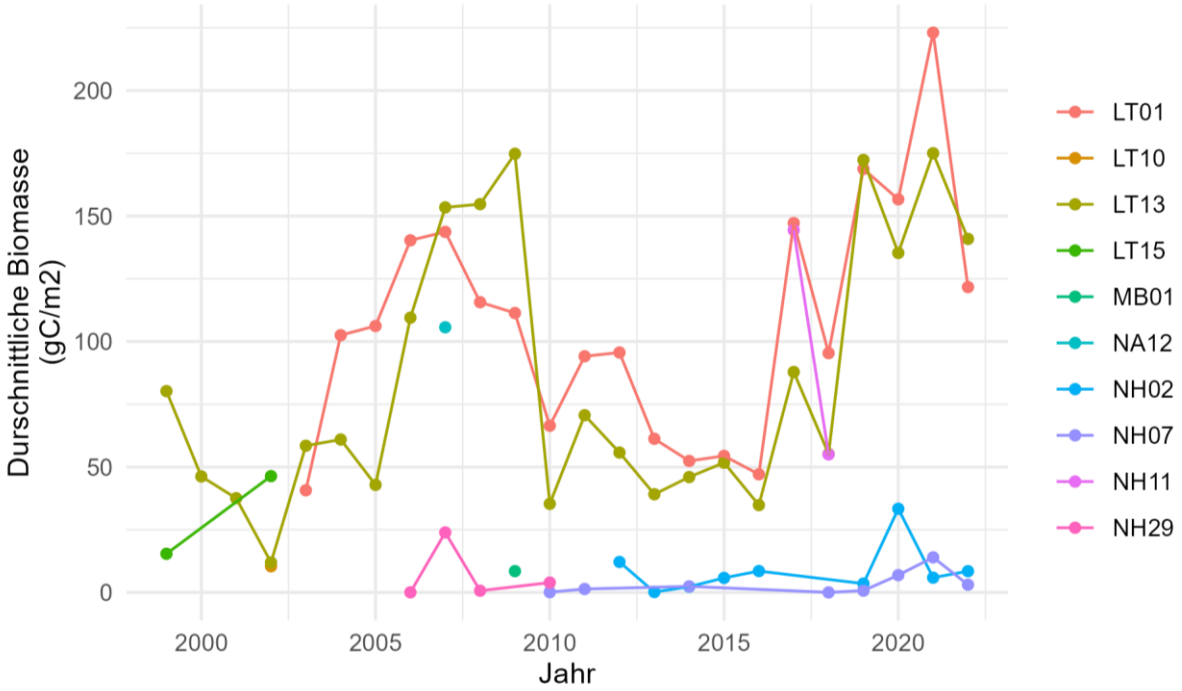

Abb. 6: Durchschnittliche Biomasse von *M. gigas* pro Station von 1999 – 2020. LT = Lister Tief, MB = Meldorfer Bucht, NA = Norderaue, NH = Norderhever

Abbildung 5 dokumentiert das Auftreten von insgesamt elf gebietsfremden Arten auf den untersuchten Miesmuschelbänken. Am häufigsten wurden *Amphibalanus improvisus*, *Austrominius modestus*, *Crepidula fornicata*, *Hemigrapsus* sp. und insbesondere die Pazifische Auster (*Magallana gigas*) nachgewiesen. Letztere erreichte seit ihrem ersten starken Anstieg ab 2003 sukzessive wachsende Biomassen, gefolgt von einem deutlichen Einbruch im Winter 2009/10. Ab 2011 setzte ein erneuter Zuwachs ein, sodass der Biomasse-Spitzenwert von 2007 in 2021 wieder erreicht wurde. Die Pazifische Auster kommt vor allem im Lister Tief vor (Abb. 6Abb), wo man auch den Anstieg, den Einbruch und den erneuten Anstieg der Biomasse besonders erkennt. Im Vergleich dazu zeigt der Norderhever nur moderate Zuwächse mit weniger starken saisonalen Schwankungen; einzig Station NH11 erreicht Biomassehöhen in der Größenordnung des Lister Tiefs, allerdings liegen für sie nur Daten aus 2017–2018 vor (Abb. 6).

Auch andere gebietsfremde Taxa zeigen charakteristische Biomasse-Trends. So verzeichnete die Amerikanische Pantoffelschnecke *Crepidula fornicata* bereits 1999 eine vergleichsweise hohe Biomasse (Abb. 5), gefolgt von starken Schwankungen und einem Spitzenwert in 2017, vor allem im Lister Tief. Die Australische Seepocke *Austrominius modestus* nahm von 1999 bis 2009 kontinuierlich zu, erlebte jedoch wie *M. gigas* einen Einbruch um 2010, bevor sie ab 2017 erneut anstieg und 2022 ihren Maximalwert erreichte. Die Asiatische Felsenkrabbe *Hemigrapsus* sp. tritt seit 2008 auf, blieb zunächst stabil und stieg ab 2014 deutlich an, sodass seine Biomasse zwischen 2019 und 2021 die von *A. modestus* übertraf; seit 2019 werden hier die Arten *H. sanguineus* und *H. takanoi* unterschieden. Die Einbrüche um 2010 lassen sich höchstwahrscheinlich auf den starken Eiswinter 2009/10 zurückführen, der durch Kältestress und mechanische Schädigung flacher Habitate zu Biomasseverlusten führte.

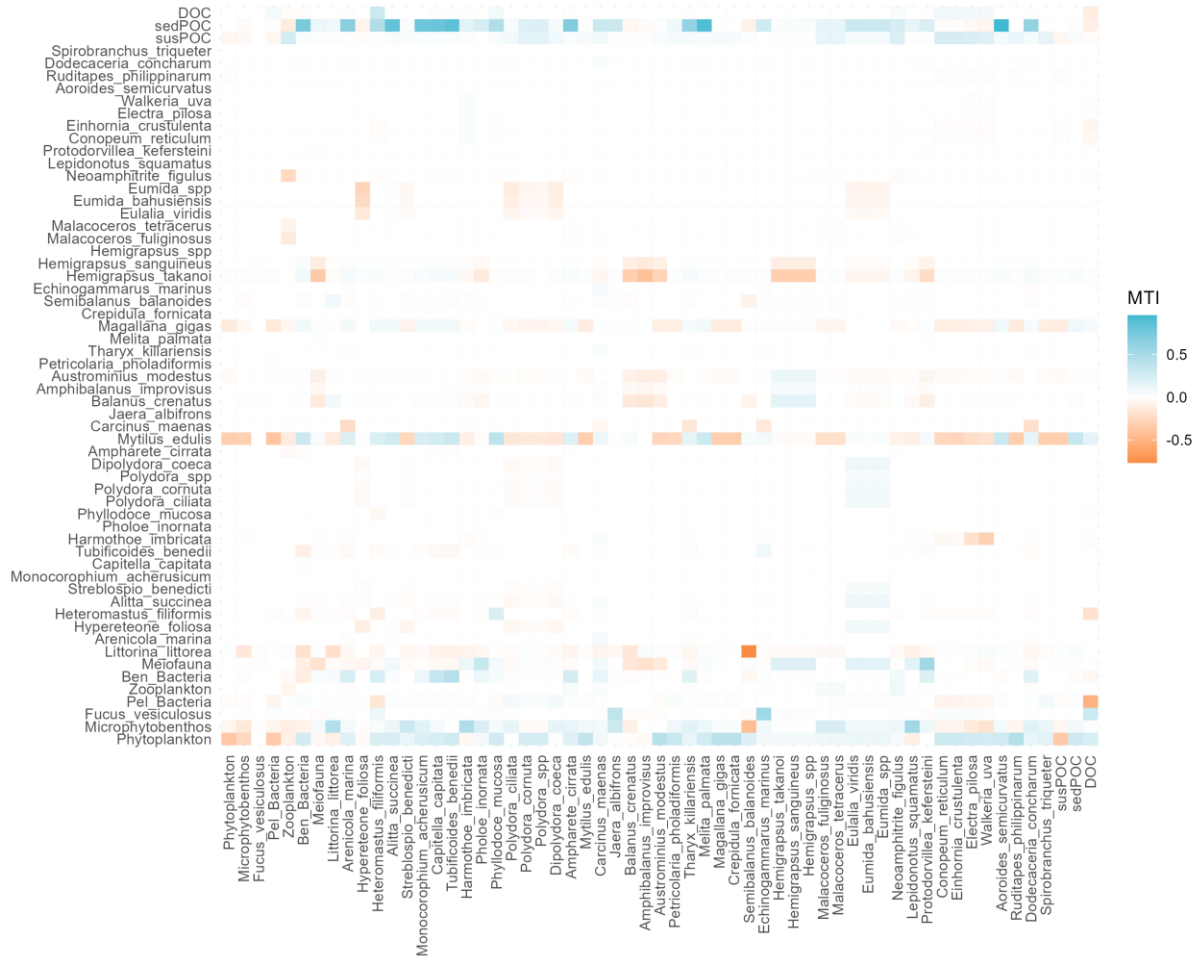

Abb. 7: MTI (Mixed Trophic Impact) Ergebnis für die Station LT01 aus dem Jahr 2022 als Beispiel für das Lister Tief. Die Farbe zeigt die Richtung (blau = positiv, orange = negativ) und die Intensität die Höhe des Einflusses.

Ein zentrales Ergebnis der ENA ist der **Mixed Trophic Impact (MTI),** der den direkten trophischen Einfluss jeder Art auf alle anderen quantifiziert (Abb. 7, 8). Im Lister Tief dominiert *M. edulis* diesen Impact, obwohl *M. gigas* dort die größere Biomasse aufweist; ihr MTI liegt jedoch nur unwesentlich darunter. In Jahren mit stark erhöhten Auster-Biomassen steigt deren MTI zwar an, bleibt aber proportional geringer als der der Miesmuschel. Die konstant negative MTI beider Arten untereinander reflektiert ihre Nahrungskonkurrenz und ihre Stellung als dominierende Bestandteile des Netzwerks. In der Norderhever, wo die Austerbiomasse generell niedriger ist, bleibt die Miesmuschel unbestrittene Haupttriebkraft des trophischen Gefüges (Abb. 8).

Andere gebietsfremde Taxa üben insgesamt schwächere trophische Effekte aus. Sowohl im Lister Tief als auch in der Norderhever weisen die Brackwasser-Seepocke (*Amphibalanus improvisus*) und die Australische Seepocke (*Austrominius modestus*) negative MTI-Werte gegenüber anderen Seepocken, einschließlich sich selbst und der heimischen Kerbseepocke (*Balanus crenatus*), auf – ein Hinweis auf Nahrungskonkurrenz (Abb. 7 & 8). Umgekehrt profitieren *Hemigrapsus* sp. durch positive MTI-Einflüsse dieser Seepocken, da sie als Beute dienen. Im Gegenzug hat die Krabben-Gattung negative MTI-Werte gegenüber beiden nicht-heimischen Seepockenarten sowie der heimischen *B. crenatus*. Abgesehen von der Pazifischen Auster üben gebietsfremde Arten ansonsten kaum messbaren trophischen Einfluss auf die Miesmuschel oder andere Netzwerkmitglieder aus.

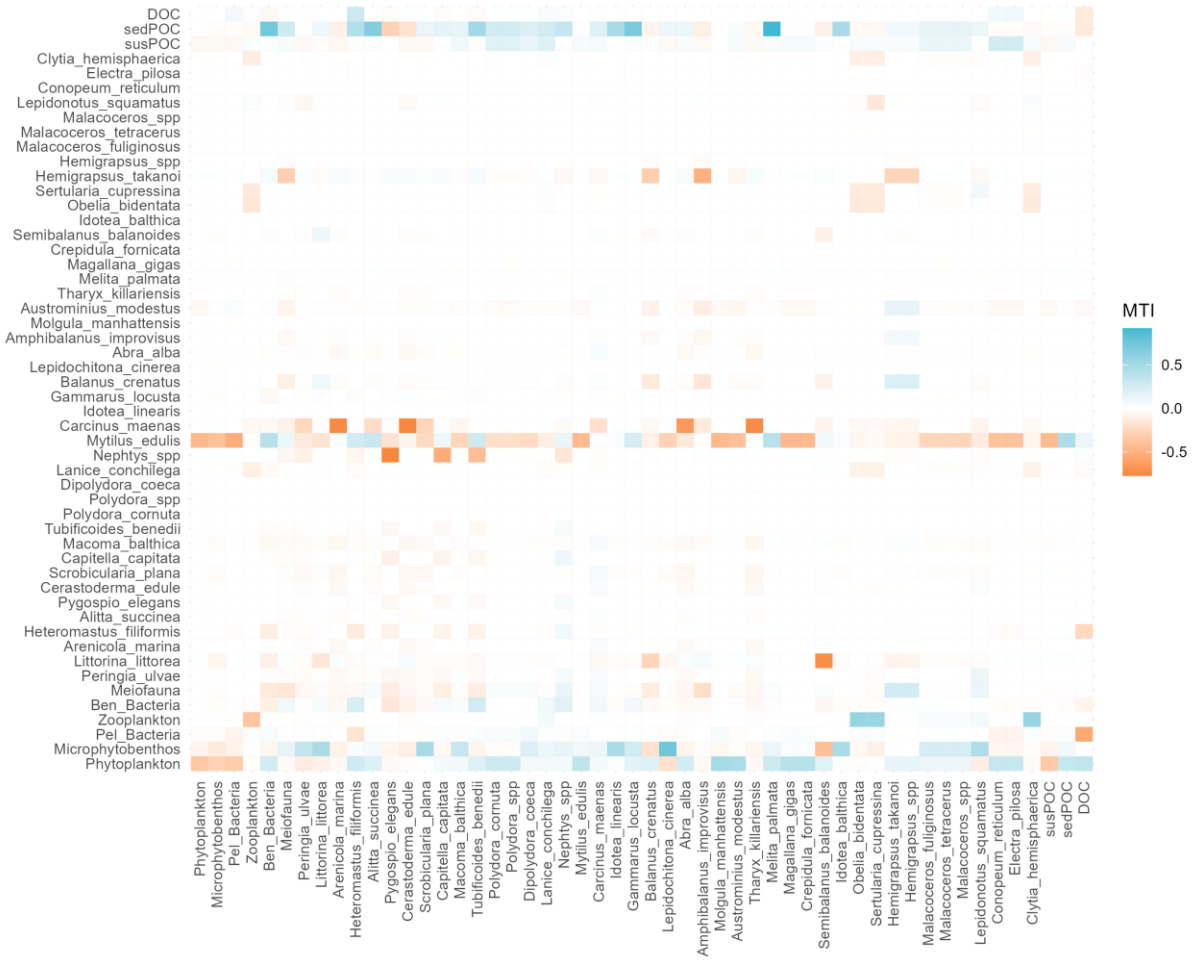

Abb. 8: MTI (Mixed Trophic Impact) Ergebnis für die Station NH02 aus dem Jahr 2021 als Beispiel für die Norderhever. Die Farbe zeigt die Richtung (blau = positiv, orange = negativ) und die Intensität die Höhe des Einflusses.

Tab. 3: Pearson Korrelation zwischen der mittleren Biomasse aller gebietsfremden Arten und verschiedenen ENA-Indizes. Dafür wurden die Stationen ausgewählt, die die vollständigsten Datenreihen haben: Lister Tief (LT01, LT13) und Norderhever (NH02, NH07). Die Indizes sind der Shannon-Diversitäts-Index (H), die Evenness (J), Detritivorie/Herbivorie-Verhältnis (D/H), Herbivorie, Detritivorie, Finn Cycling Index (FCI), Relative Redundancy (RED/CAP), Relative Ascendency (ASC/CAP, ASC/CAP_int), Relative Overheads (OH/CAP, OH/CAP_int), Flow Diversity, Total System Throughput (TSTp) und das Produktion/Biomasse-Verhältnis (P/B). Positive Werte weisen auf eine positive Korrelation hin, während negative Werte eine negative Korrelation zeigen. Die Sternchen zeigen das Signifikanz-Level an (* ≤ 0.05, ** ≤ 0.01, *** ≤ 0.001)

Index	LT01		LT13		NH02		NH07	
H	0,206	***	0,073		0,109		0,044	
J	0,167	***	0,015		0,090		-0,020	
D/H	-0,215	***	-0,194	***	-0,089		-0,103	*
Herbivory	0,447	***	0,222	***	0,282	***	0,242	***
Detritivory	0,438	***	0,249	***	0,335	***	0,292	***
FCI	-0,172	***	-0,251	***	-0,113		-0,123	**

RED/CAP	0,441	***	0,375	***	0,145	*	0,220	***
ASC/CAP	-0,030		0,048		-0,021		0,043	
ASC/CAP_int	-0,293	***	-0,351	***	-0,221	***	-0,361	***
OH/CAP	0,030		-0,048		0,021		-0,043	
OH/CAP_int	0,293	***	0,351	***	0,221	***	0,361	***
FlowDiversity	0,160	***	0,005		0,004		0,039	
FlowDiversityint	0,458	***	0,396	***	0,230	***	0,212	***
TSTp	0,168	***	0,031		0,262	***	0,108	*
P/B	-0,444	***	-0,331	***	-0,082		-0,210	***

Die ENA liefert eine Vielzahl von Metriken, von denen wir uns an den im OSPAR Quality Status Report (Schückel et al. 2022) empfohlenen Indizes orientiert haben:

- **Detritivorie/Herbivorie (D/H)**
  Gibt das Verhältnis der detritusbasierten zur herbivoren Nettoprimärproduktion wieder – ein Indikator für die dominante Nahrungsquelle im System.
- **Finn Cycling Index (FCI)**
  Misst den Anteil der Gesamtflüsse, der innerhalb des Netzwerks recycelt wird.
- **Relative Redundancy (RED/CAP)**
  Erfasst die Anzahl paralleler Pfade im Netzwerk, also die Vielfalt alternativer Flusswege, und steht für Resilienz gegenüber Störungen.
- **Relative Ascendency (ASC/CAP)**
  Beschreibt das Ausmaß an Organisation und Effizienz der Flussstruktur.
- **Relative Overhead (OH/CAP)**
  Komplementär zur Ascendency, zeigt den unorganisierten Anteil der Flüsse.
- **Flow Diversity (FD)**
  Quantifiziert sowohl die Vielfalt als auch die Gleichmäßigkeit der Flussverteilungen im Netzwerk.

Alle diese Indizes zusammen geben ein umfassendes Bild darüber, wie Invasionen die Struktur (Redundanz vs. Spezialisierung), Funktion (Recycling, Nahrungsquellen) und Resilienz der Muschelbänke verändern.

In unserer Pearson-Korrelationsanalyse zwischen der mittleren Biomasse gebietsfremder Arten und ausgewählten ENA-Indizes an vier Stationen mit vollständiger Zeitreihe (LT01, LT13, NH02, NH07) ergaben sich folgende zentrale Befunde:

- **Detritivorie/Herbivorie (D/H)**
  – Kehrt sich mit wachsender Invasions-Biomasse um: höhere Biomasse → niedrigeres D/H
  – **Signifikanz**: LT01 & LT13: *** ($p \leq 0.001$), NH02: n.s., NH07: * ($p \leq 0.05$)
  – **Interpretation**: Mit mehr gebietsfremden Arten verschiebt sich das System zugunsten von Herbivorie.
- **Finn Cycling Index (FCI)**
  – Stets negativ korreliert: mehr Biomasse → weniger internes Recycling
  – **Signifikanz**: LT01 & LT13: ***($p \leq 0.001$), NH07: ** ($p \leq 0.01$), NH02: n.s.
  – **Interpretation**: Invasionsdruck reduziert die Unabhängigkeit vom externen Kohlenstoff-Input.
- **Relative Redundancy (RED/CAP)**
  – Durchgehend positiv: mehr Biomasse → höhere Netzwerk-Redundanz

– **Signifikanz**: alle vier Stationen * bis ***
– **Interpretation**: Zunahme gebietsfremder Arten erhöht die Anzahl paralleler Flusswege und damit die Resilienz.

- **Relative Ascendency (ASC/CAP)** & **Relative Overhead (OH/CAP)**
  – **ASC/CAP**: stark negativ korreliert (*** an allen Stationen)
  – **OH/CAP**: komplementär stark positiv (*** an allen Stationen)
  – **Interpretation**: Höhere gebietsfremde Biomasse führt zu weniger Spezialisierung (niedrige ASC) und mehr Pufferkapazität (hoher OH).
- **Flow Diversity (FD)**
  – Immer positiv korreliert (*** an allen Stationen)
  – **Interpretation**: Mit wachsender gebietsfremder Biomasse nehmen Anzahl und Gleichverteilung der Flusswege zu.

Zusammengefasst:

- **Mehr Biomasse gebietsfremder Arten** → stärkere Herbivorie, geringeres Recycling, mehr Redundanz und Puffer, höhere Fluss-Diversität.
- Diese Muster sprechen dafür, dass Invasionen die Netzwerke weniger spezialisiert, dafür aber robuster gegenüber Störungen machen – auf Kosten der inneren Effizienz.

Diese Analyse zeigt, dass sich die Biomasse von gebietsfremden Arten auf die verschiedenen Indizes auswirkt.

Indikatorentwicklung

Ein zentrales Ergebnis von WP2 (Aufgabe 2.4) war die Entwicklung von Indikatoren und eines Monitoringkonzepts zur systematischen Erfassung invasiver Arten. Im Februar 2024 trafen sich dafür über 30 Expert*innen aus Forschung und Management zum Workshop der neu gegründeten sustainMare Arbeitsgruppe „Monitoring und Assessment“ am Senckenberg am Meer in Wilhelmshaven unter der Leitung von Dr. Ulrike Schückel und Prof. Dr. Pedro Martínez Arbizu. Es wurden konkrete Arbeitspakete definiert, die nun nicht nur auf nationaler (BLANO) Ebene weiterbearbeitet, sondern unter anderem im Rahmen der OSPAR-Kommission in die Entwicklung von Indikatoren für die MSFD Descriptor D2 (Kriterium 2 und 3) integriert werden. Das Konzept dazu wurde auf der BLANO Sitzung am 18.6.2024 vorgestellt. Dieser erfolgreiche Transfer auf internationale Ebene legt den Grundstein für ein abgestimmtes, praxisnahes Frühwarn- und Monitoringsystem invasiver Arten.

Referenzen

Markert A, Wehrmann A, Kröncke I (2010) Recently established Crassostrea-reefs versus native Mytilus-beds: differences in ecosystem engineering affects the macrofaunal communities (Wadden Sea of Lower Saxony, southern German Bight). Biol Invasions 12:15–32. https://doi.org/10.1007/s10530-009-9425-4

Schückel U, Nogues Q, Brito J, et al (2022) Pilot Assessment of Ecological Network Analysis Indices. OSPAR, 2023: The 2023 Quality Status Report for the North-East Atlantic

Die wichtigsten Positionen des zahlenmäßigen Nachweises:

Position Gesamtfinan-zierungsplan	Anerkannte Ausgaben insgesamt bis einschl. 2024	Positionsbezeichnung
812	212.508,30	Personalausgaben
822	17.517,10	Wissenschaftliche und studentische Hilfskräfte

835	7.090,02	Aufträge
843	46.661,28	Verbrauchsmittel
846	3.244,27	Reisekosten

Die Mittel wurden wie beantragt verwendet.

Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Projektarbeiten

Die im Rahmen des Projekts durchgeführten Arbeiten waren sowohl notwendig als auch angemessen, um die anhaltende Ausbreitung invasiver Arten im Wattenmeer fundiert zu dokumentieren und bewertbare Indikatoren für ihren ökologischen Einfluss zu entwickeln.

Erstens ermöglichte die wiederholte Probenahme an vier unterschiedlichen Standorten eine robuste Grundlage zur Analyse räumlicher und zeitlicher Veränderungen in der Makrofauna, was für ein adaptives Monitoring unerlässlich ist. Zweitens lieferte die Anwendung der ökologischen Netzwerkanalyse (ENA) erstmals quantitative Einblicke in die Auswirkungen invasiver Arten auf Nahrungsketten und Energieflüsse, wodurch traditionelle Biodiversitätsmetriken sinnvoll ergänzt wurden.

Drittens war die Integration von Smartfarm-Daten ein zukunftsweisender Schritt, um die Übertragbarkeit ökologischer Erkenntnisse von natürlichen zu kultivierten Systemen zu prüfen und potenzielle Managementmaßnahmen abzuleiten. Nicht zuletzt sicherte der Experten-Workshop im Februar 2024 die unmittelbare Verzahnung mit nationalen und internationalen Gremien (BLANO, OSPAR) und legte so die Basis für standardisierte Indikatoransätze gemäß MSFD Descriptor D2. Insgesamt entsprechen Umfang und Methode der Projektarbeiten dem aktuellen Stand der Wissenschaft und erfüllen die Anforderungen an ein evidenzbasiertes, praxisorientiertes Monitoring invasiver Arten.

Voraussichtlicher Nutzen, insbesondere die Verwertbarkeit des Ergebnisses – auch konkrete Planungen für die nähere Zukunft - im Sinne des fortgeschriebenen Verwertungsplans

Praxisnahe Monitoring-Tools

Durch die ENA-basierten Indikatoren (z. B. D/H, FCI, RED/CAP) steht den Küstenmanagern erstmals ein Set quantitativer Kennzahlen zur Verfügung, mit dem der Einfluss invasiver Arten auf Nahrungsketten und Energieflüsse systematisch verfolgt werden kann. Diese Indikatoren lassen sich ohne großen Mehraufwand in bestehende Monitoring-Programme integrieren.

Transfer auf Kultivierungssysteme

Die vergleichende Auswertung natürlicher Miesmuschelbänke und Smartfarms liefert Anhaltspunkte, wie sich gebietsfremde Arten in Nutzsysteme einschleichen und welche ökologischen Risiken damit verbunden sind. Fischereiverbände und Aquakulturbetreiber können diese Erkenntnisse nutzen, um Beprobungsstrategien und Erntetermine so anzupassen, dass Einwanderungsprozesse früh erkannt und abgemildert werden.

Verzahnung mit nationalen und internationalen Gremien

Die im Februar 2024 mit SustainMare und OSPAR eingeleiteten Arbeitspakete bringen die entwickelten Indikatoren direkt in den überregionalen Verwertungsplan ein.

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

Im Nachgang der Vorstellung der Aktivitäten der Working Group 'Monitoring & Assessment' auf der BLANO-Sitzung im Juni 2024 beteiligen sich nunmehr auch das BSH (Mariusz Zabrocki) und GoConsult (Stephan Gollasch) innerhalb der

OSPAR NIS-Gruppe an der Weiterentwicklung des Deskriptors D2C3. Hier sollen beispielhaft Daten für die zeitliche und räumliche Verbreitung von nicht-einheimischen Arten zusammengetragen werden, damit eine Modellierung stattfinden kann. Dabei wird die Datenverfügbarkeit, nicht nur national, als wesentlich angesehen und ist für die Bedienung der beiden sekundären Kriterien ausschlaggebend.

Im OSPAR Quality Status Report 2023 wurde eine Pilotstudie zur Nutzung der ENA in drei Bereichen der OSPAR Region II (Baie de Seine, Elbe Plume und Kattegat) vorgestellt. Mehrere Monitoring- und Erhebungsdaten aus unterschiedlichen Ökosystemkomponenten wurden genutzt, um die Nahrungsnetzmodelle zu erstellen. Diese Pilotstudien demonstrieren die Anwendbarkeit der ENA als Indikator Indikator FW9 in verschiedenen Ökosystemen (Küstenzone, Kontinentalschelf, Tiefsee).

Erfolgte Veröffentlichungen der Ergebnisse

Ein Teil der erfolgten Arbeiten sind in Qualifikationsarbeiten entstanden:

Schultz, E. (2023) Vergleich der Begleitfauna der beiden eulitoralen Austernriffe Dornumer Nacken und Kaiserbalje im Niedersächsischen Wattenmeer. Durchgeführt an der Carl- von Ossietzky Universität Oldenburg.

Schwarzkopf., D. (2023) Vergleich der Begleitfauna des eulittoralen Austernriffs Nordland und der Miesmuschelbank Crildumersiel im Niedersächsischen Wattenmeer. Durchgeführt an der Carl- von Ossietzky Universität Oldenburg.

Rieß, J. (2024) Einfluss von invasiven Arten auf die Miesmuschel-kulturen im Niedersächsischen Wattenmeer. Durchgeführt an der Carl- von Ossietzky Universität Oldenburg.