



**Forschungskooperation: „Konzept zum Monitoring der Entwicklung von
Flachwasser-Hartbodengemeinschaften in der s.-h. Ostsee“**

[Aktenzeichen 0608.451722]

- 3. Zwischenbericht -

[Endbericht Projektteil 1]

von

Claas Hiebenthal

(GEOMAR)

IM AUFTRAG

DES LANDESAMTS FÜR LANDWIRTSCHAFT, UMWELT UND LÄNDLICHE RÄUME
(SCHLESWIG-HOLSTEIN)

NOVEMBER 2019

I Inhaltsverzeichnis

- 3. Zwischenbericht -	1
I Inhaltsverzeichnis	2
1 Zusammenfassung	6
2 Einleitung	7
3 Methodisches Vorgehensweise in den Projektmodulen	8
3.1 Vorgehen Modul 1: Konzeptentwicklung	8
3.1.1 Beschreibung bestehender Monitorings an der Schleswig-Holsteinischen Ostseeküste	9
3.1.2 In Monitorings fehlende Aspekte: Reaktion der Gemeinschaften auf abiotische Veränderungen und Identifikation wichtiger funktioneller „Player“ für Ökosystemdienstleistungen	9
3.2 Vorgehen Modul 2: Testmonitoring	10
3.2.1 Eingerichtete Monitoringplätze an der Schleswig-Holsteinischen Ostseeküste	10
3.2.2 Stressexperimente	13
3.2.3 Auswertung Testmonitoring	16
3.3 Vorgehen Modul 3: Gutachterliche Vorhersagen zur Entwicklung der Gemeinschaften	17
4 Ergebnisse und Fazit	18
4.1 Ergebnisse Modul 1: Konzeptentwicklung	18
4.1.1 FFH und MSRL Überwachungsprogramme/Meldepflicht	18
4.1.2 Anwendung bestehender WRRL-Monitoring-Programme in Schleswig- Holstein (Übersicht)	20
4.1.3 RegLocDiv	22
4.1.4 BALDESH/Bio-HAB	23
4.2 Ergebnisse Modul 2: Testmonitoring	23
4.2.1 Zusammenfassung Ergebnisse des Testmonitorings und Test- Experiments	31
4.2.2 Diskussion Ergebnisse des Testmonitorings und Test-Experiments	32
4.2.3 Zusammenfassung Modul 2	34
4.3 Ergebnisse Modul 3	35
4.3.1 Auswirkungen des globalen Wandels auf die Ostsee	35

4.3.2	Auswirkungen des Globalen Wandels auf Makroalgen-/Fucus-Gemeinschaften der Ostsee	36
4.3.3	Auswirkungen des Globalen Wandels auf Miesmuschel-Gemeinschaften der Ostsee	37
	Als wichtige Stressoren von Miesmuscheln gelten neben direkten menschlichen Aktivitäten wie Muschelfischerei und Küstenbebauung auch der Klimawandel (Temperaturerhöhung, Aussüßung, Versauerung) und die Eutrophierung (Hiebenthal et al 2012). Die Effekte von erhöhten Nährstoffbelastungen auf die Miesmuschelpopulation der Ostsee sind aber unklar. Durch erhöhte Phytoplanktondichten verbessert sich tendenziell sogar die Nahrungsversorgung der Muscheln, was sie sogar robuster gegenüber anderen Stressoren (wie Versauerung) macht (Thomsen et al 2010). Auch Sauerstoffmangelsituationen in Folge der Eutrophierung können die Muscheln relativ gut überstehen, solange sie nicht zu lange andauern (Theede et al 1969, Dolmer 1999).	37
4.3.4	Verwendung des Flachwasser-Hartbodenmonitorings zum Testen der Zukunftsszenarien	38
4.3.5	Zusammenfassung Modul 3	38
4.4	Übersicht bisheriges Ergebnisse.....	39
5	Verwendete Quellen.....	40

II Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Typische bewachsene Besiedlungsplatte des seit 2015 laufenden Projekts Bio-HAB (Foto: M. Franz).....	10
Abbildung 2: Messwerte von Temperatur [°C], Salinität und Sauerstoffgehalt [% und mg/L] von Juni bis September 2018 am Standort Staberhuk (Fehmarn).	11
Abbildung 3: Salinitäten der Stationen Falshöft (A), Boknis Eck (B), Bülk (C) und Katharinenhof (D) in den Jahren 2016 und 2017 gemessen an den Logger-Stationen des LLUR-Projekts Flachwasser-Abiotik.....	12
Abbildung 4: Versuchsdesign (A) und technische Umsetzung des Salinitätsbehandlung (B) des Test-Experiments.....	16
Abbildung 5: Auswirkung (Effect ratio ± Konfidenzintervalle) des Testexperiments auf den Besiedlungsgrad der Besiedlungsplatten (null: Kontrolle, S: Salinitätsbehandlung).	24
Abbildung 6: MDS-Plot der Gemeinschaften an den beprobten Standorten (Vor dem Experiment).	24
Abbildung 7: Auswirkung (Effect ratio ± Konfidenzintervalle) des Testexperiments auf die Anzahl der Taxa auf den Besiedlungsplatten (null: Kontrolle, S: Salinitätsbehandlung).	25
Abbildung 8. Auswirkung (Effect ratio ± Konfidenzintervalle) des Testexperiments auf die Gleichverteilung (Pilou's Evenness J') der Gemeinschaften auf den Besiedlungsplatten (null: Kontrolle, S: Salinitätsbehandlung).....	26
Abbildung 9: Auswirkung (Effect ratio ± Konfidenzintervalle) des Testexperiments auf die Abundanz von Balanus improvisus auf den Besiedlungsplatten (null: Kontrolle, S: Salinitätsbehandlung).	27
Abbildung 10: Auswirkung (Effect ratio ± Konfidenzintervalle) des Testexperiments auf die Abundanz von Mytilus edulis auf den Besiedlungsplatten (null: Kontrolle, S: Salinitätsbehandlung).....	27
Abbildung 11: Auswirkung (Effect ratio ± Konfidenzintervalle) des Testexperiments auf die Abundanz von Polydora sp. auf den Besiedlungsplatten (null: Kontrolle, S: Salinitätsbehandlung).....	28
Abbildung 12: Auswirkung (Effect ratio ± Konfidenzintervalle) des Testexperiments auf die Abundanz von Polysiphonia fucoides auf den Besiedlungsplatten (null: Kontrolle, S: Salinitätsbehandlung).....	29
Abbildung 13: Auswirkung (Effect ratio ± Konfidenzintervalle) des Testexperiments auf die Abundanz von Ectocarpus sp. auf den Besiedlungsplatten (null: Kontrolle, S: Salinitätsbehandlung).	29

Abbildung 14: Auswirkung (Effect ratio \pm Konfidenzintervalle) des Testexperiments auf die Abundanz von benthischen Diatomeen auf den Besiedlungsplatten (null: Kontrolle, S: Salinitätsbehandlung).....	30
Abbildung 15: Auswirkung (Effect ratio \pm Konfidenzintervalle) des Testexperiments auf die Abundanz des Neobiots <i>Dasya baillouviana</i> auf den Besiedlungsplatten (null: Kontrolle, S: Salinitätsbehandlung).....	31
Abbildung 16: Salinitäten an den Standorten Boknis Eck (blau) und Staberhuk (schwarz) in den 3 Monaten vor der Probennahme im September 2018.....	33
Abbildung 17: Vergleich der Aussüßungseffekte auf <i>Mytilus</i> sp. (Foto: Erik Veldhuis, Wikimedia.org) und <i>Amphibalanus improvisus</i> (Foto: Auguste Le Roux, Wikimedia.org) in den Gemeinschaften aus Boknis Eck und Staberhuk.....	34

1 Zusammenfassung

Als Vorbereitung für ein Langzeitmonitoring entwickelt das GEOMAR in der vorliegenden Kooperation ein Monitoringkonzept. In dem geplanten Monitoring sollen standardisierte Einheiten (Platten) genutzt werden, um Hartboden- bzw. "Riffgemeinschaften" des küstennahen Flachwasserbereichs gemäß FFH und MSRL bewerten zu können. Zusätzlich soll über die Erfassung von abiotischen Umweltbedingungen (Temperatur, Salz- und Sauerstoffgehalt) während der Besiedlungsphase (also im jeweils vorausgegangenen Jahr) - und deren experimenteller Anwendung auf beprobte benthische Gemeinschaften - Erkenntnisse darüber gewonnen werden, welche Bedingungen die Artengemeinschaft wie beeinflussen. Dabei sollen möglichst biotische Interaktionen (z.B. Konkurrenz, Fraß) berücksichtigt sowie Schlüsselararten identifiziert und ggf. deren Gefährdung herausgestellt werden.

Das RegLocDiv-(Regionale-Lokale-Diversität)-Monitoring des GEOMAR stellt die methodische Basis für das hier erarbeitete Konzept dar. Erfahrungen und Ergebnisse mehrerer laufender LLUR-Projekte gingen - als Bewertungssystem (MarBIT) und als Mess-, Beprobungs- und Experimentiervorgaben („Abiotik-Projekt“ und BALDESH/BioHAB) - in die Weiterentwicklung des RegLocDiv-Monitorings zu einem FFH-/MSRL-Langzeitmonitoring ein.

Zur Prüfung der Machbarkeit der Methodik konnte das erstellte Konzept in der Praxis erfolgreich getestet werden. Dafür wurden im September 2017 an vier küstennahen Standorten (Falshöft, Boknis Eck, Schönberg, Staber Huk) an der schleswig-holsteinischen Ostseeküste Bewuchsplatten ausgebracht. Die auf den Platten siedelnden Benthosgemeinschaften wurden ein Jahr später (September 2018) in sehr gutem Zustand ans GEOMAR gebracht und dort in einem Test-Experiment spontan stark verringerter Salinität ausgesetzt. Dabei zeigte sich eine Tendenz hin zu einer größeren Robustheit von Arten bzw. Gemeinschaften gegenüber Aussüßungsstress, wenn diese bereits zuvor Phasen stärkerer Aussüßung erfahren hatten. Vergleichbare Experimente können in Zukunft -als fester Bestandteil des Monitorings- zur kontinuierlichen Fortentwicklung von Bewertungsindikatoren verwendet werden.

Um zu prüfen inwieweit die Gemeinschaften auf den Besiedlungsplatten die natürlichen lokalen Hartbodengemeinschaften repräsentieren, wurden im September 2019 Benthosproben (besiedelte Steine und Kratzproben) an denselben vier Standorten genommen. Deren Zusammensetzung wird aktuell analysiert und soll mit dem Bewuchs von zeitgleich beprobten Besiedlungsplatten verglichen werden. Damit in Zukunft zuverlässig abiotische Umweltdaten (Temperatur, Salz- und Sauerstoffgehalt) vorliegen, wurden außerdem entsprechende Logger direkt an den Standorten ausgebracht.

Im Rahmen einer gutachterlichen Vorhersage zur Entwicklung der Gemeinschaften wurden zudem durch den Klimawandel erwartete Zukunftsszenarien für die physikalische Umwelt dargestellt und die wahrscheinlichen Reaktionen der Gemeinschaften unter Berücksichtigung rezenter Arbeiten am GEOMAR analysiert. Dies wird auch als Basis der kritischen Betrachtung bestehender und ggf. Entwicklung neuer Indikatoren zur Bewertung des Umweltzustandes dienen. Letzteres soll im weiteren Verlauf (2. Projektphase) - u.A. durch Einbeziehung älterer Datensätze – Schwerpunkt des Vorhabens sein.

[Weiterer Ausblick:] Als Bewertungssystem für das hier entwickelten Flachwasser-Hartboden-Monitoring soll zudem (unter Einbeziehung neuer Erkenntnisse zu Indikatoren) in der 2. Projektphase ein auf die Besiedlungsplatten angepasster MarBIT etabliert werden. Dieser soll testweise auf die Gemeinschaften der Besiedlungsplatten und auf die lokaler Benthosproben angewendet werden. Die Ergebnisse werden dann mit bisherigen (WRRL-)Bewertungen der jeweiligen Wasserkörper verglichen. Der angepasste MarBIT soll zudem auf Daten weiterer (laufender/abgeschlossener LLUR-)Projekte angewendet und so getestet bzw. mit dem bestehenden MarBIT verglichen werden.

2 Einleitung

Der Wert der Biodiversität kann als ökologischen Serviceleistungen für Menschen betrachtet werden (z.B. Tilman & Downing 1994, Naeem et al. 1994, McGradySteed et al. 1997). Beispiele für diese Dienstleistungen im maritimen Bereich sind Reinigung von Wasser und Luft, Erosionsschutz, Nährstoffrecycling, Küstenschutz und Bereitstellung einer „Genbank“. Auch der finanzielle Wert dieser Serviceleistungen wurde wiederholt untersucht (z.B. Edwards & Abivardi 1998, Interwies et al. 2012). Ob für die zuverlässige Versorgung der Menschen mit diesen Diensten aber tatsächlich -über den rein statistischen Rückversicherungseffekt hinaus- eine generell hohe Artenvielfalt oder vielmehr bestimmte Schlüsselarten nötig sind, ist umstritten (Mooney et al. 1995, Doak et al. 1998, Loreau et al. 2001).

Der Flachwasserbereich der Ostsee ist ein Lebensraum mit starken Schwankungen der abiotischen und biotischen Umwelt: neben Temperaturschwankungen variiert auch der Salzgehalt stark. Salzwasser-Einstromereignisse aus der Nordsee bringen das saisonal aktuelle Set von Verbreitungsstadien von Algen und Evertebraten von dort mit. Darüber hinaus unterliegen selbst Flachwassergemeinschaften gelegentlichen starken Schwankungen der O₂-Konzentration, wenn wetterbedingtes Upwelling O₂-armes Tiefenwasser an die Küste treibt.

Innerhalb dieses „Chaos“ von Bedingungen ist es schwierig, bestimmte Einflüsse einer bestimmten Populations- oder Gemeinschaftsentwicklung zuzuordnen. Dennoch ist dies wichtig, um zu verstehen und vorauszusagen, in welcher Weise der Klimawandel und das Einwandern neuer Arten zukünftig die Zusammensetzung und Funktionsweise der Flachwassergemeinschaften der s.-h. Ostseeküste formen und verändern wird.

Biodiversität (wenn z.B. als reine Artenzahl betrachtet) kann auf verschiedenen räumlichen Skalen betrachtet werden (Whittaker 1972, Cornell & Karlson 1996). Die α -Diversität beschreibt die Artenzahl in der kleinsten räumlich abgrenzbaren ökologischen Einheit, zum Beispiel auf einer Versuchseinheit (Besiedlungsplatte, Greiferprobe) und die β -Diversität die Summe solcher gleichen Einheiten, die zum selben Habitat/Standort gehören. Die γ -Diversität dagegen beschreibt die Gesamtheit aller Habitate/Standorte eines größeren abgegrenzten geographischen Gebiets.

In der vorliegenden Kooperation entwickelt das GEOMAR ein Langzeit-Monitoringkonzept, bei dem durch standardisierte Einheiten (Platten) im Flachwasserbereich (3-4 m) angesiedelte

Hartbodengemeinschaften (α -Diversität; zumeist Makroalgen und Makrovertebraten) mit dem lokalen (β -Diversität) und regionalem (γ -Diversität) Larven-/Artenpool einerseits und mit den Umweltbedingungen (während der Besiedlungsphase, also z.B. im vorhergegangenen Jahr) andererseits korreliert werden können. Auf diese Weise kann ermittelt werden, welche Bedingungen die Biodiversität wie beeinflussen, d.h. welche Arten sie unter Berücksichtigung biotischer Interaktionen (z.B. Konkurrenz, Fraß) dominieren bzw. verschwinden lassen. Dabei sollen zur Neu-/Fortentwicklung von Belastungsindikatoren Schlüsselarten identifiziert und ggf. deren Gefährdung herausgestellt werden.

Der langfristige Plan (jenseits der hier vorliegenden Kooperation) ist es, an geeigneten Stellen der s.-h. Ostsee-Küste (ggf. weitere) Messstationen einzurichten, an denen regelmäßig sowohl Besiedlungsplatten als auch geeignete Messsonden für physikalische Bedingungen ausgebracht und gepflegt werden. Dies soll als zusätzliches küstennahes Flachwassermonitoring für Riffe gem. FFH bzw. MSRL dienen. Zuvor, im Rahmen dieser Kooperation, wurde das Monitoringkonzept an 4 Messstationen für 1 Jahr erprobt. Als Teil dieses Testmonitorings wurden Gemeinschaften in Mesokosmen des GEOMAR gezielt für 5 Tage einem relevanten Stressor (Aussüßung) ausgesetzt, um dessen Effekt auf die beprobten Gemeinschaften experimentell zu testen.

3 Methodische Vorgehensweise in den Projektmodulen

Im Folgenden werden die Arbeitsschritte dieses Projekts als Module betrachtet. Die drei bisher bearbeiteten Module sind „*Modul 1: Konzeptentwicklung*“, „*Modul 2: Testmonitoring*“, „*Modul 3: Gutachterliche Vorhersagen zur Entwicklung der Gemeinschaften*“.

3.1 Vorgehen Modul 1: Konzeptentwicklung

In diesem Modul wird ein Konzept für ein Langzeitmonitoring entwickelt, bei dem auf standardisierten Einheiten (Besiedlungsplatten) im Flachwasserbereich (3-4 m) angesiedelte Hartbodengemeinschaften (Makroalgen und Makrovertebraten) mit Umweltbedingungen während der Besiedlungsphase -also z.B. im vorhergegangenen Jahr- korreliert werden können. Auf diese Weise soll in Zukunft ermöglicht werden, auch den Einfluss von sich verändernden Umwelt-Bedingungen auf die Gemeinschaftszusammensetzungen zu erfassen, also welche Bedingungen welche Arten dominieren bzw. verschwinden lassen. Zusätzlich können Gemeinschaften auf Platten gezielt jeweils relevanten Stressoren für begrenzte Zeiträume (1-4 Wochen) (in den Mesokosmen des GEOMAR) ausgesetzt werden, um so die Effekte des Stresses auf die Artenzusammensetzung bzw. auf die Robustheit der Arten experimentell zu testen. Beides soll der kontinuierlichen Fortentwicklung von Bewertungsindikatoren dienen. Als Bewertungsverfahren ist eine angepasste Variante des bestehenden WRRL-Monitoring-Bewertungssystems MarBIT vorgesehen, dass im weiteren Verlauf des Projektteils 2 in Kooperation mit Fa. MariLim ausgearbeitet wird.

Methodische Details zur praktischen Durchführung des Langzeitmonitorings wurden in einem Testmonitoring erprobt, das unter 3.2. Modul 2 erläutert wird.

3.1.1 Beschreibung bestehender Monitorings an der Schleswig-Holsteinischen Ostseeküste

Bei der Entwicklung des Monitoringkonzepts für ein Langzeitmonitoring sollten bestehende und sich in der Entwicklung befindliche LLUR- und GEOMAR-Monitorings an der schleswig-holsteinischen Ostseeküste sowie andere (laufende) inhaltlich verwandte Projekte berücksichtigt werden. Das hier entwickelte Konzept knüpft methodisch vor allem an das Reg-LocDiv-Monitoring an. In dessen Rahmen erforscht das GEOMAR bereits seit 2004 die Beziehung der regionalen auf die lokale Diversität benthischer Flachwasser-Hartbodengemeinschaften. Hierfür werden an sechs Standorten an der schleswig-holsteinischen Ostseeküste (und einem Standort in Mecklenburg-Vorpommern) jährlich Besiedlungsplatten entnommen (bzw. ausgetauscht) und am GEOMAR ausgewertet (Wahl et al. 2013, Franz et al. 2019a).

Die vom LLUR beauftragten Wasserrahmenrichtlinien(WRRL)-Monitorings BALCOSIS und MarBIT werden diskutiert, deren Bewertungen bisher als wichtigste Datengrundlage für den Flachwasserbereich bei Meldungen/Berichte für die FFH-Richtlinie bzw. die Meeresstrategie-Rahmenrichtlinie (MSRL) dienen.

Ein weiteres laufende Monitoringprojekt, dessen Daten und Erfahrungen teilweise direkt in die Entwicklung des Langzeitmonitorings einfließen, ist das „Abiotik-Projekt“ (LLUR-Projekt: „Aufnahme der Flachwasserabiotik in Schleswig-Holstein“). In diesem werden seit Anfang 2016 Informationen über abiotische Parameter im Flachwasser der Schleswig-Holsteinischen Ostseeküste an 13 Standorten von der Flensburger Förde bis zur Lübecker Bucht erfasst (Bock & Lieberum 2016, Franz et al. 2019b).

3.1.2 In Monitorings fehlende Aspekte: Reaktion der Gemeinschaften auf abiotische Veränderungen und Identifikation wichtiger funktioneller „Player“ für Ökosystemdienstleistungen

Als Teil des Forschungsprogramms BALDESH, in dem als Kooperation von LLUR, CAU und GEOMAR flächendeckende Kartierungsarbeiten, Klassifizierungen und ökologische Bewertungen von Steinvorkommen im Flachwasser entlang der schleswig-holsteinischen Ostseeküste durchgeführt werden, werden in dem Projekt „Bio-HAB“ Verfahren zur Ausweisung und Bewertung von (Flachwasser-)Riffen gemäß FFH-Richtlinie weiterentwickelt. Die hierdurch verbesserte FFH-Bewertung dient gleichzeitig der Umsetzung von Überwachungsprogrammen des Küstenbereichs gemäß Meeresstrategie-Rahmenrichtlinie (MSRL, siehe 4.1.1).

In experimentellen Studien am GEOMAR wurde zudem die Stresstoleranz von Hartsubstratgemeinschaften der Ostsee untersucht. Die in dem vorliegenden Projekt durchgeführten Experimente, die als Teil des Langzeitmonitorings konzipiert wurden, haben sich konzeptionell an den vorausgegangenen Bio-HAB-Experimenten orientiert. Bei der Diskussion der Ergebnisse wurde der Rolle von sogenannten Schlüsselarten besondere Aufmerksamkeit geschenkt, was auch der weiteren Indikatorenentwicklung in Projektteil 2 dient.

3.2 Vorgehen Modul 2: Testmonitoring

Zur Prüfung der Machbarkeit und gegebenenfalls Optimierung der Methodik sollte im Rahmen dieses Projekts das oben beschriebene Konzept eines erweiterten Monitorings getestet werden. Hierfür wurden auf Besiedlungsplatten siedelnde Benthosgemeinschaften der schleswig-holsteinischen Ostseeküste lebend ans GEOMAR gebracht und dort unter Berücksichtigung der zuvor im Jahresgang erlebten physikalischen Bedingungen (in diesem Fall: Salinitäts-Schwankungen) entsprechendem Stress ausgesetzt.

3.2.1 Eingerichtete Monitoringplätze an der Schleswig-Holsteinischen Ostseeküste

Einrichtung des Testmonitorings im Feld: Im Zuge der jährlichen RegLocDiv-Monitoringfahrt des GEOMAR mit FK Littorina wurden im September 2017 an vier Standorten der schleswig-holsteinischen Ostseeküste (Falshöft, Boknis Eck, Schönberg, Staberhuk) in 3-4 m Tiefe jeweils sechs Bewuchsplatten ausgebracht (Tab. 1). Die 11 x 11 cm großen Bewuchsplatten wurden horizontal an jeweils einer dafür ausgebrachten Beton-Grundplatte mit Stahlgewindestangen befestigt (Abb. 1). In der Nähe (200 m – 4,2 km Entfernung) der Besiedlungsplattenstandorte befinden sich an vom Ufer aus leicht erreichbaren Standorten Logger, die Temperatur, Salinität und Sauerstoffgehalt des Wassers sowie Licht messen. Zudem werden dort im Rahmen des Abiotik-Projekts („Aufnahme der Flachwasserabiotik in Schleswig-Holstein“) im 14-tägigen Abstand Wasserproben für Nährstoffanalysen (Nitrat, Nitrit, Phosphat, anorganischer Stickstoff, Gesamtstickstoff und Gesamtphosphor) genommen.



Abbildung 1: Typische bewachsene Besiedlungsplatte des seit 2015 laufenden Projekts Bio-HAB (Foto: M. Franz).

Aufnahme der abiotischen Umweltdaten an den vier Standorten: Im Abstand von 3-6 Monaten werden die Standorte der Besiedlungsplatten (bzw. der Logger) von Tauchern des GEOMAR aufgesucht und die Logger ausgelesen. Im Abstand von zwei Wochen werden zudem dort Wasserproben für Nährstoffanalysen genommen. Die Nährstoffe (Nitrat, Nitrit, Phosphat, anorganischer Stickstoff, Gesamtstickstoff und Gesamtphosphor) werden als Teil des „Abiotik-Projekts“ in einem externen Labor (PD Dr. Rhena Schumann, biologische Station Zingst) gemessen.

Eigene Messwerte zur lokalen Seewasser-Abiotik: Da sich die nächstgelegene Loggerstation des Flachwasser-Abiotik-Projekts am Strand Katharinendorf (Fehmarn) in einem anderen Wasserkörper befindet, wurde die Station Staberhuk zusätzlich zu dem vorhandenen Temperaturlogger im Juni 2018 mit je einem Sauerstoff- und Salinitätslogger ausgestattet. Die Daten wurden im Rahmen der RegLocDiv-Ausfahrt mit FK Littorina im am 5. September ausgelesen (Abbildung 2).

[Da es bei der Datenerhebung im Rahmen des „Abiotik-Projekts“ zu wesentlichen Ausfällen (von Sensoren/Loggern) kam, wurden inzwischen alle RegLocDiv-Stationen mit Loggern ausgestattet, was für eine zukünftig zuverlässigere Versorgung mit Temperatur-, Salzgehalts- und Sauerstoff Daten führen wird.]

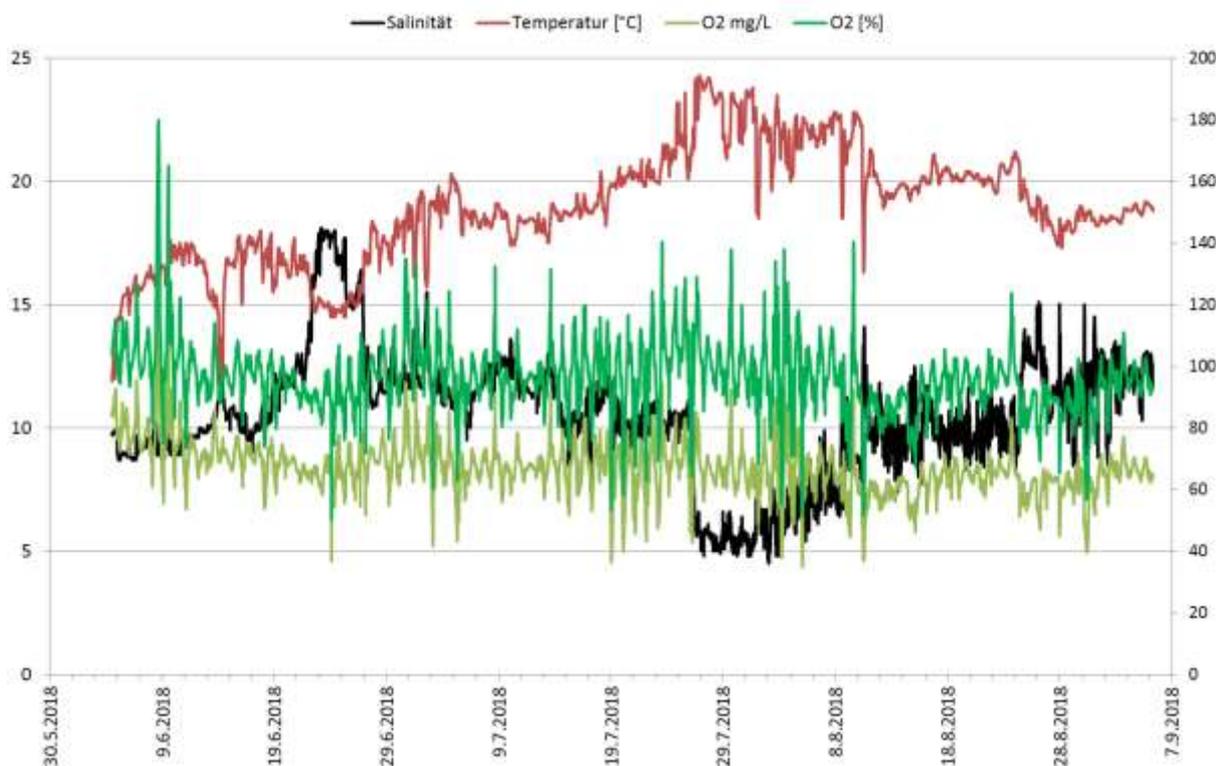


Abbildung 2: Messwerte von Temperatur [°C], Salinität und Sauerstoffgehalt [% und mg/L] von Juni bis September 2018 am Standort Staberhuk (Fehmarn).

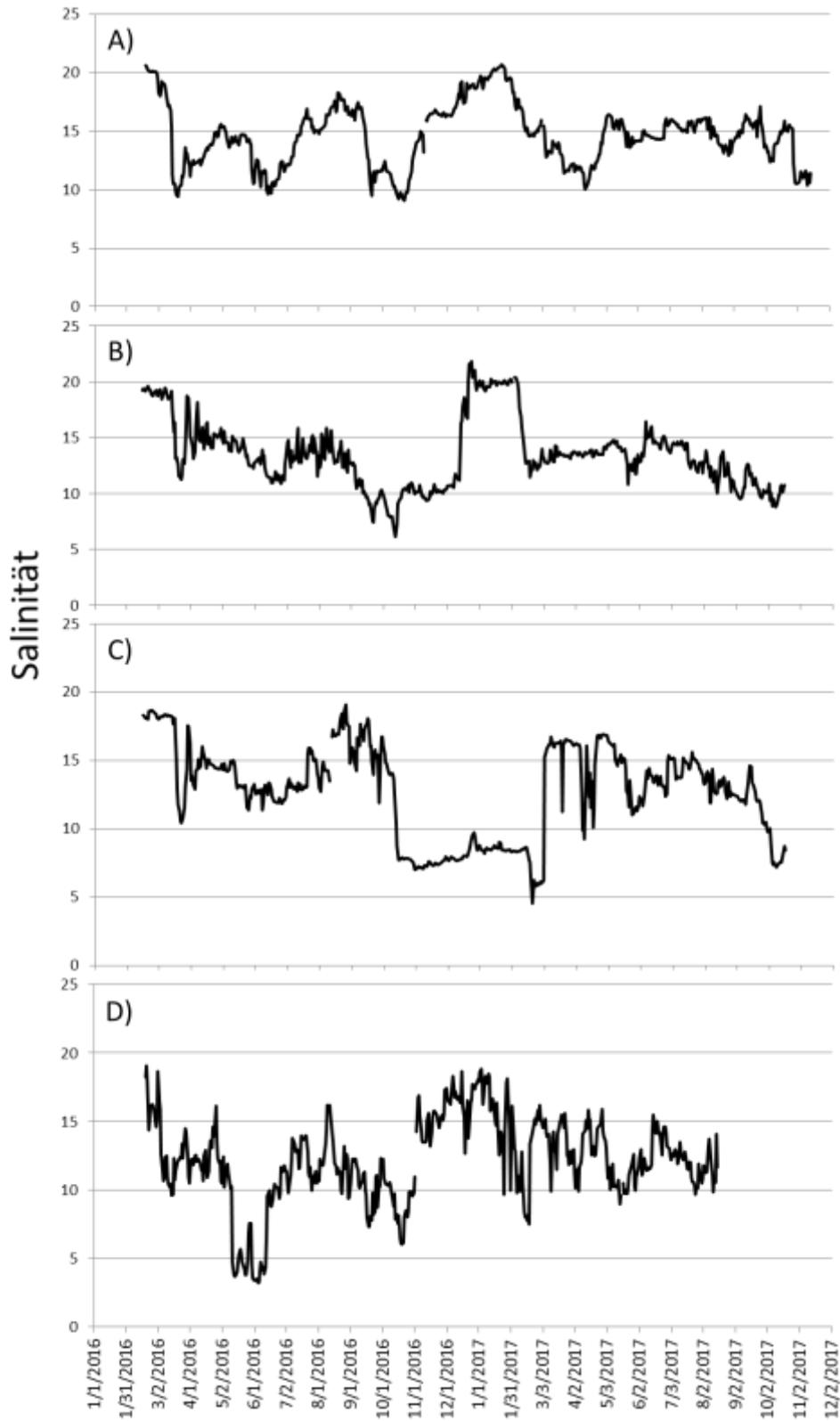


Abbildung 3: Salinitäten der Stationen Falshöft (A), Boknis Eck (B), Bülk (C) und Katharinenhof (D) in den Jahren 2016 und 2017 gemessen an den Logger-Stationen des LLUR-Projekts Flachwasser-Abiotik.

Beprobung der gesiedelten Benthogemeinschaften: Im September 2018 wurden während der RegLocDiv-Monitoringfahrt mit FK Littorina die 2017 ausgebrachten und in der Zwischenzeit von lokalen Benthogemeinschaften besiedelten Besiedlungsplatten wieder taucherisch eingesammelt. Hierzu wurden die sechs Platten jeweils von der Grundplatte abgeschraubt und in Kunststoffbeuteln verpackt vorsichtig an Bord von FK Littorina gebracht. Dort wurden sie -zur Zwischenhälterung wiederum auf Gewindestangen angebracht- in Wasserbädern bis zum nächsten Hafen gebracht.

Die Besiedlungsplatten der Stationen Boknis Eck, Schönberg und Staberhuk wurden am Tag der Beprobung direkt mit FK Littorina zum GEOMAR nach Kiel gebracht und dort in eine Zwischenhälterungsanlage eingesetzt. Die Besiedlungsplatten der Station Falshöft wurden im Hafen von Maasholm an Land und anschließend mit einem Transporter nach Kiel zum GEOMAR gebracht.

Die Salinität an den Stationen Falshöft, Boknis Eck und Schönberg entsprach bei der Beprobung derselben wie in der Kieler Förde am GEOMAR (Salinität 17). An der Station Staberhuk lag bei der Beprobung die Salinität mit einem Wert von 12 etwas niedriger, weshalb das Wasser, in dem die Platten an Bord transportiert wurden, in zwei Schritten an den Kieler Salzgehalt angenähert wurde (nach 2.5 Stunden: Salinität 12 auf Salinität 14, nach 5 Stunden Salinität 14 auf Salinität 16) bevor die Organismen in die Zwischenhälterung auf der GEOMAR-Pier (Durchfluss bei Salinität 17) überführt wurden.

Nachdem die gesammelten Gemeinschaften am GEOMAR in Zwischenhälterung genommen wurden, wurden sie konservativ, d.h. ohne Entfernung / Beschädigung der Organismen (Untersuchung per Binokular, Schätzung besiedelte Fläche der einzelnen Taxa) erfasst.

Beprobung der lokalen „Riff“-Gemeinschaft: Zur Beprobung der lokal auf natürlichem Untergrund siedelnden Gemeinschaft *sollten laut Projektplan* bereits 2018 taucherisch parallel 5-10 Kratzproben (11 x 11 cm) von ausreichend großen Steinen genommen werden. Aufgrund ungünstiger Witterung musste dieser Programmpunkt bei der Ausfahrt im September 2018 leider verworfen werden, da ansonsten nicht alle RegLocDiv-Stationen hätten bearbeitet werden können. **Die Beprobung der natürlichen Hartsubstrate wurde bei der Ausfahrt im September 2019 nachgeholt. Die Auswertung der Proben dauert aktuell noch an.**

3.2.2 Stressexperimente

Da zum Zeitpunkt der Beprobung (September 2018) noch keine Abiotikdaten der Stationen vorlagen (außer eigener Messwerte an der Station Staberhuk: *Abbildung 2*), musste auf Basis *älterer* Daten über die Stressbehandlung entschieden werden. Hierfür wurden die Daten der Stationen Falshöft, Boknis Eck, Bülk (statt Schönberg) und Katharinenhof (statt Staberhuk) aus den Jahren 2016 und 2017 verwendet (Die Gemeinschaften der nach Kiel transportierten (nicht fixierten) Besiedlungsplatten der vier beprobten Standorte wurden nach der Zwischenhälterung und Erfassung ihrer Zusammensetzung (siehe 3.2.1) am GEOMAR für 5 Tage einer starken Ausübung als Stressor ausgesetzt (Stress-Behandlung: Salinität 9, Kontrolle: Salinität 18). Die Experimente wurden in bestehenden Experimentieranlagen (den „Kiel Outdoor Benthokosmen“) durchgeführt (**Error! Reference source not found.**). Hierfür wurden die Besiedlungsplatten jeweils einzeln in 10L-Hälterungsgefäße überführt, in denen sie im

Durchfluss mit frischem Wasser versorgt wurden (Durchfluss 60ml/min, entspricht einem Wasserwechsel von ca. 10L in 2.5 Stunden).

Auf der Basis der Salinitätsdaten dieser vier Stationen wurde entschieden, dass eine spontane Aussüßung von einer erwarteten Salinität von 17-19 auf die jeweilige Hälfte für mehrere Tage nicht unrealistisch ist – und gleichzeitig ein ausreichend starkes Stress-Szenario darstellt, um im Experiment Effekte beobachten zu können.

Die Gemeinschaften der nach Kiel transportierten (nicht fixierten) Besiedlungsplatten der vier beprobten Standorte wurden nach der Zwischenhälterung und Erfassung ihrer Zusammensetzung (siehe 3.2.1) am GEOMAR für 5 Tage einer starken Aussüßung als Stressor ausgesetzt (Stress-Behandlung: Salinität 9, Kontrolle: Salinität 18). Die Experimente wurden in bestehenden Experimentieranlagen (den „Kiel Outdoor Benthokosmen“) durchgeführt (**Error! Reference source not found.**). Hierfür wurden die Besiedlungsplatten jeweils einzeln in 10L-Hälterungsgefäße überführt, in denen sie im Durchfluss mit frischem Wasser versorgt wurden (Durchfluss 60ml/min, entspricht einem Wasserwechsel von ca. 10L in 2.5 Stunden).

Um die Aussüßung des Ostseewassers im Durchfluss zu ermöglichen, wurde ein entsprechendes Misch-System erdacht und implementiert. Hierbei musste zum einen berücksichtigt werden, dass durch die Aussüßung des Ostseewassers mit salzfreiem Wasser nicht auch die Pufferkapazität (\approx Wasserhärte / Alkalinität) zu stark gesenkt wird, weil dies zu signifikanten Änderungen des pH und der Kalzifizierung kalkbildender Meeresorganismen führen würde. Da die Aussüßung zudem eine effektive Verdünnung des Ostseewassers auch hinsichtlich der enthaltenen Nahrungspartikel (Plankton) darstellte, musste eine vergleichbare Verdünnung auch für das Ostseewasser der Kontrolle durchgeführt werden, *jedoch ohne den Salzgehalt zu senken*.

Ostseewasser in der Kieler Förde hat bei einer Salinität von 18 in etwa eine Alkalinität von ca. 2000 μ mol/kg. Das Kieler Leitungswasser hat dagegen eine Alkalinität von ca. 4000 μ mol/kg. Zur Aussüßung des (ungefilterten) Ostseewassers wurde daher eine 1:1 – Mischung aus Leitungswasser und ionen-ausgetauschtem (VE-)Wasser genutzt, das aus 60L-Tanks bereitgestellt wurde. Aus den Tanks wurde dieses Wasser nach Bedarf in Mischbecken gepumpt, in denen es mit Ostseewasser vermischt wurde und die gleichzeitig als Hochbecken für den Wasserdurchlauf der Hälterungs-Gefäße dienten.

Die Aufrechterhaltung des korrekten Salzgehaltes im Mischbecken wurde durch den Einsatz eines GHX „ProfiLux“ Aquariencomputers gewährleistet, welcher über einen Leitfähigkeitssensor die Salinität in den Becken gemessen und über Dosierpumpen synchron Leitungswasser und ionen-ausgetauschtes (VE-)Wasser (jeweils mit einer Pumpleistung von 120ml/min) zugemischt hat.

Um zu verhindern, dass die Gemeinschaften in den Kontroll-Einheiten nicht mit mehr Nahrungspartikeln (und Vermehrungsformen benthischer Organismen) versorgt werden, wurde das Durchflusswasser dieser Behandlung ebenfalls verdünnt – mit gefiltertem Ostseewasser. Hierfür wurde das Wasser durch einen Abschäumer, einen Sandfilter und einen Kartuschenfilter (Porengröße 10 μ m) geleitet, bevor es im Mischbecken (= Hochbecken) der Kontrolle 1:1 mit ungefiltertem Ostseewasser vermischt wurde.

[Auf weitere Messungen von sogenannten Ökosystemdienstleistungen (z.B. Sauerstoffproduktion/Respirationsraten) wurde dabei verzichtet, da Erfahrungen im Rahmen des Projekts Bio-HAB zeigten, dass bei den hier beprobten Gemeinschaften trotz enormem logistischem Aufwand nur Ergebnisse mit begrenzter Aussagekraft zu erwarten gewesen wären.]

Nach Abschluss der Experimente wurde die Zusammensetzung der Gemeinschaften erneut konservativ (per Binokular) erfasst und anschließend die Gemeinschaften für eine spätere detailliertere Analyse fixiert (3.2.3).

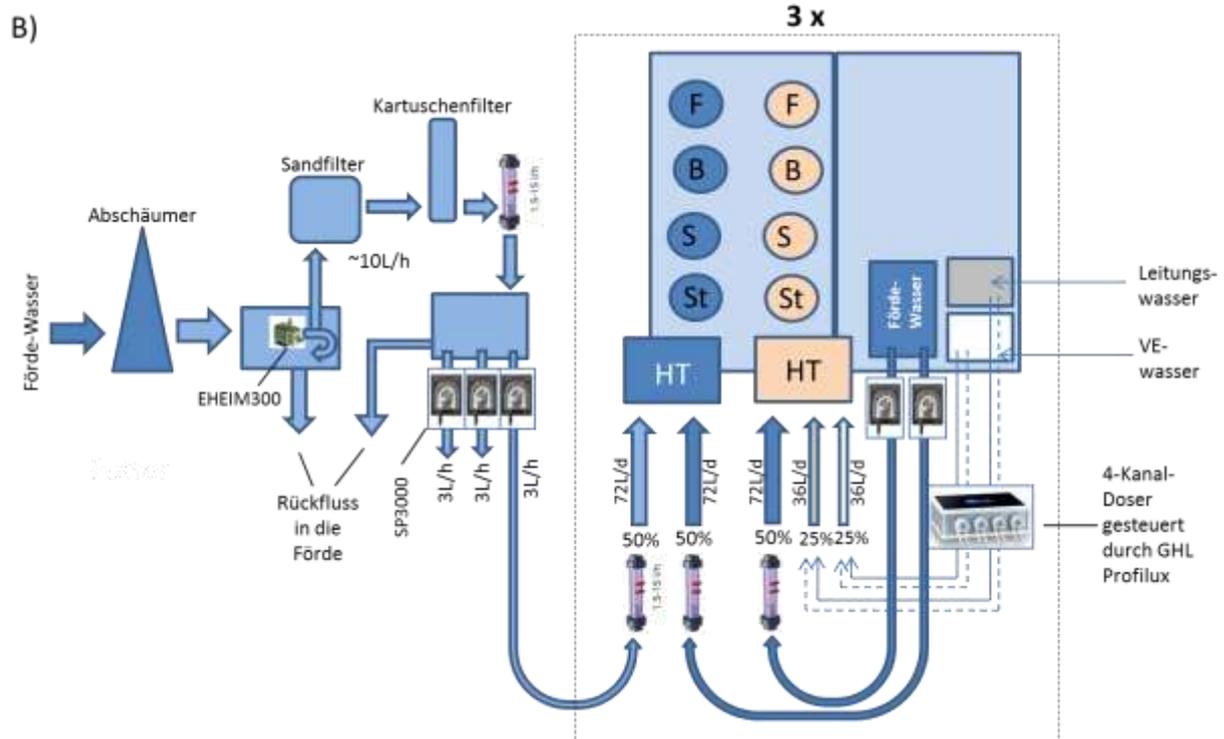
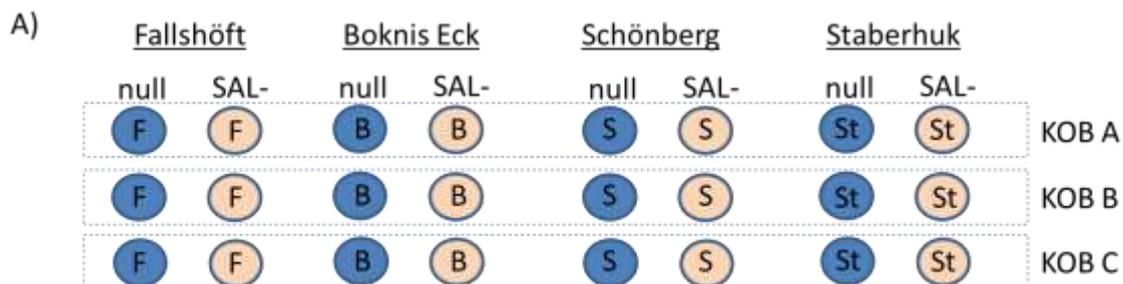


Abbildung 4: Versuchsdesign (A) und technische Umsetzung des Salinitätsbehandlung (B) des Test-Experiments.

3.2.3 Auswertung Testmonitoring

Bestimmung der Taxa. Wenn möglich wurden die (per Binokular identifizierbaren) Organismen, die auf den Besiedlungsplatten siedelten, bis zur Art bestimmt. In Fällen, in denen dies nicht möglich war, wurden die Taxa bis zur exakteren Bestimmung der fixierten Gemeinschaften mit Arbeitstiteln versehen oder in einzelnen Fällen auf höheren taxonomischen Ebenen zusammengefasst (z.B. Diatomeen). Von jedem Taxon wurde dann die Abundanz (besiedelte Fläche) pro Besiedlungsplatte ermittelt.

Gemeinschaftsanalysen. Zum Vergleich der Besiedlungsplatten-Gemeinschaften der vier beprobten Standort sowie jeweils vor und nach der experimentellen Stressbehandlung wurden multifaktorielle Gemeinschaftsanalysen auf der Grundlage des Bray-Curtis Ähnlichkeitsindex durchgeführt (ANOSIM, PRIMER6-Softwarepaket, siehe z.B. Pfaff et al. (2010)). Als Replikationseinheit gilt jeweils eine Besiedlungsplatte. Im PRIMER6 Manual werden die als Ergebnisse der Analysen ermittelten R-Werte folgendermaßen interpretiert:

$R > 0,75$: gut getrennt

$R > 0,5$: überlappend aber klar getrennt

$R < 0,25$: kaum unterscheidbar

Um Informationen über den prozentualen Anteil der verschiedenen Taxa an den Unterschieden in den Gemeinschaften zu erhalten, wurden anschließend oben genannte Gemeinschaften mit einer SIMPER-Analyse (ANOSIM, PRIMER6-Softwarepaket) unterzogen.

Diversitätsanalysen. Anhand der gesammelten Gemeinschaftsdaten wurden Anzahl Taxa S und Pilon's Evenness E (siehe Modul 3, 3.3) berechnet und deren Muster in den Gemeinschaften der vier beprobten Standorte sowie in den Gemeinschaften desselben Standorts vor und nach der experimentellen Stressbehandlung verglichen. Hierfür wurden logarithmierte „Effect ratios“ aus dem Verhältnis der Werte nach dem Salinitätsexperiment zu den Werten vor der Behandlung berechnet. Dabei kann von einer signifikanten Veränderung der Anzahl Taxa oder der Evenness ausgegangen werden, wenn der Mittelwert ober oder unterhalb von „0“ und die Konfidenzintervalle nicht die „0“-Linie schneiden.

Häufige / Bedeutende Arten: Auf Basis der Gemeinschaftsanalysen (SIMPER-Analysen) wurden 6 Taxa identifiziert, die besonders Abundant waren und/oder besonders stark zur Unähnlichkeit von Gemeinschaften verschiedenen Standorte oder Behandlungen beigetragen haben: *Balanus improvisus*, *Mytilus edulis*, *Polydora* sp., *Polysiphonia fucoides*, *Chorda filamentum*, *Ectocarpus* sp., Diatomeen. Die Abundanzen dieser Taxa wurden vor und nach der experimentellen Stressbehandlung verglichen. Zum Vergleich der Abundanzen der einzelnen Taxa

wurden -entsprechend dem Vorgehen bei den Diversitätsanalysen- die logarithmierten „Effect ratios“ verwendet.

Neobiota: Veränderungen in den Abundanzen der invasiven Art *Dasya baillouviana* wurden gesondert betrachtet und diskutiert.

3.3 Vorgehen Modul 3: Gutachterliche Vorhersagen zur Entwicklung der Gemeinschaften

In diesem Modul werden durch den Klimawandel erwartete Zukunftsszenarien der physikalischen Umwelt (aktuelle Projektionen zu Temperaturerhöhung, Sauerstoffmangelereignisse, verringerte Salinität, evtl. Ozeanversauerung) dargestellt und die wahrscheinlichen Reaktionen von Ostsee-Hartbodengemeinschaften als Reaktion auf die Szenarien in einer tiefergreifenden Diskussion entwickelt. Als Basis für die Diskussion in diesem Projektteil diente eine Literaturrecherche mit besonderer Berücksichtigung aktueller Forschungsergebnisse aus GEOMAR-Projekten zu Gemeinschaften der süd-westlichen Ostsee (RegLocDiv, Kiel Outdoor Benthokosmen, Kiel Indoor Benthokosmen, andere ökologische und physiologische Arbeiten). Als strukturgebende Schlüsselarten wurden hier die wahrscheinlichen Entwicklungen von *Fucus* und *Mytilus* unter zu erwartenden Zukunftsszenarien näher beleuchtet. Zudem wurde dargelegt, wie die diskutierten Zukunftsszenarien durch das in diesem Projekt entwickelte Langzeitmonitoring untermauert/getestet werden können.

Für den weiteren Projektverlauf (Projektteil 2) sollen Daten aus (alten) Artenlisten, aus rezenten GEOMAR-Projekten der letzten Jahre sowie aus WRRL-Monitorings (BALCOSIS, MarBIT) mit Umwelt-Belastungen und –Veränderungen korreliert werden. Neben der Vorhersage für die Zukunftsszenarien dient dies auch einer kritischen Überprüfung von bestehenden Bewertungsverfahren (konkret deren Bewertungs-Indikatoren) bzw. deren Fortentwicklung zur zukünftigen Bewertung von Riffen.

4 Ergebnisse und Fazit

4.1 Ergebnisse Modul 1: Konzeptentwicklung

Da bestehende Monitoringprogramme für die regelmäßige MSRL- und FFH-Berichtspflicht insbesondere im Küstenbereich Schleswig-Holsteins lückenhaft sind, soll das hier entwickelte Langzeitmonitoring helfen, diese Lücken zu schließen. Entsprechend wird im Folgenden auch auf die Anforderungen an Überwachungsprogramme seitens MSRL und FFH (kurz) eingegangen und in der weiteren Konzeptentwicklung vertieft.

4.1.1 FFH und MSRL Überwachungsprogramme/Meldepflicht

Die im Rahmen der **Meeresstrategie-Rahmenrichtlinie (MSRL)** geforderten Überwachungsprogramme wurden auf der Grundlage der MSRL-Anfangsbewertung, gestützt durch

MSRL-eigene Vorgaben (indikativen Listen in Anhang III, Liste in Anhang V) und auf die MSRL-Umweltziele Bezug nehmend, entwickelt. Aufgabe der Überwachungsprogramme (als Teil des Bund-/Länder-Messprogramms (BLMP)) ist, regelmäßig den aktuellen Umweltzustand (sowie Umweltziele und Maßnahmen) zu übermitteln. Dabei sollen die MSRL-Überwachungsprogramme auf bestehenden Bewertungs- und Überwachungsbestimmungen beruhen und mit diesen vereinbar sein.

Konkreter dienen die Monitoringprogramme:

- der Beobachtung und Bestimmung des **Zustands der Meeresökosysteme und ihrer Merkmale** sowie der Bewertung des erzielten Fortschritts und der verbleibenden Aufgaben im Hinblick auf das Erreichen bzw. die Erhaltung des jeweiligen Zielzustands nach MSRL
- der Überprüfung des Erreichens (Erfolgskontrolle) und der Aktualisierung von Umweltzielen nach § 45e WHG
- der Überprüfung der Wirksamkeit (Erfolgskontrolle) und der Aktualisierung von Maßnahmen und Bewirtschaftungsplänen
- der Erfassung und Bewertung von Belastungen durch menschliche Aktivitäten und ihren Auswirkungen (einschließlich der wichtigsten kumulativen und synergetischen Wirkungen) auf die Meeresumwelt
- der **Erfassung und Bewertung der natürlichen Variabilität und der langfristigen Entwicklungen und Änderungen der natürlichen Bedingungen, zum Beispiel verursacht durch den Klimawandel**
- der Erfassung und Bewertung relevanter grenzüberschreitender Auswirkungen und Belastungen
- der Ursachenforschung bei Verfehlung von Umweltzielen und/oder GES sowie Identifizierung neuer und sich abzeichnender Belastungen und Gefahren
- der Bereitstellung aggregierter Informationen als Beitrag für Bewertungen von Meeresregionen oder -unterregionen im Rahmen der MSRL

Die nationale Umsetzung der aktualisierten MSRL-Richtlinien für Monitoringprogramme befindet sich nach wie vor in der Entwicklung. Sie soll bei der abschließenden Konzeptentwicklung berücksichtigt werden. Bislang werden für die Bewertung des Küstenbereichs Ergebnisse der WRRL-Monitorings BALCOSIS und MarBIT genutzt. Ein gemeinsames, die bestehenden Lücken schließendes Monitoring im Sinne der MSRL- und FFH-Berichtspflicht für küstennahe Hartbodengemeinschaften, befindet sich ebenfalls in der Diskussion (siehe auch BALDESH, 4.1.4).

Inhalt der **FFH-Berichte** (gem. Artikel 17 der FFH-Richtlinie) sind Beschreibungen durchgeführter Maßnahmen und die Bewertung der erzielten Auswirkungen auf den Erhaltungszustand der FFH-Arten **und FFH-Lebensraumtypen** sowie die wichtigsten Ergebnisse des **FFH-Monitorings** (Artikel 11 der FFH-Richtlinie). Die zu übermittelnden Berichte bestehen dabei aus drei Teilen:

Anhang A: Allgemeines Berichtsformat (z.B. Gebietskulisse, Managementpläne, Maßnahmen, Wiederansiedlung von Arten)

Anhang B: Überwachung nach Art. 11 für Arten der Anhänge II, IV und V

Anhang D: Überwachung nach Art. 11 für **Lebensraumtypen** nach Anhang

In Anhang D wird der Erhaltungszustand aller FFH-Lebensraumtypen (LRT) und Arten der FFH-Richtlinie (Anhang I, II, IV, V) bewertet, wobei folgende Parameter überwacht werden müssen: "aktuelles natürliches Verbreitungsgebiet", "aktuelle Fläche", "Strukturen und Funktionen" und "Zukunftsaussichten".

Bewertet wird der Erhaltungszustand von Arten und Lebensraumtypen nach einem EU-weiten "Ampelschema". Das Schema unterscheidet vier Kategorien:

"günstig" = (grün),

"ungünstig-unzureichend" = (gelb),

"ungünstig-schlecht" = (rot) und

"unbekannt" (grau).

Bisher werden für die schleswig-holsteinische Ostseeküste -bei passender Überlappung- die Ergebnisse bestehender Bewertungssysteme (BALCOSIS, MarBIT) bei Lebensraumtypen des Küstenbereichs für die gemeldeten vorhandenen FFH-LRT-Vorkommen gemeldet. In Küstennähe gibt es demnach aber bislang keine „Riffe“ bzw. sind sie nicht gemeldet, obwohl große Teile der Küste der FFH-Definition von Riffen entsprechen. Das BfN nimmt ebenfalls eine Bewertung von Benthosgemeinschaften vor, bei welcher Flachwassergemeinschaften bisher aber nicht berücksichtigt werden. Da für den kommenden Bericht (Phase 2013/24) ein ausgereifteres Bewertungssystem vorliegen soll, wurde von MariLim (MariLim Gesellschaft für Gewässeruntersuchung mbH, Schönkirchen) ein dem WRRL-Bewertungssystem MarBIT (siehe unten 4.1.2) ähnliches Bewertungsverfahren für Riffe entwickelt. Im Projekt BALDESH werden außerdem Küstenriffe erfasst und Verfahren zum Ausweisen und Bewerten von Riffen weiterentwickelt.

Die Ergebnisse beider laufender Projekte werden als wichtige Grundlagen in die Ausarbeitung des Langzeitmonitorings zum einen als Bewertungssystem (angepasstes MarBIT) und als konkrete Beprobungs- und Experimentiervorgaben (BALDESH/BioHAB) eingehen.

4.1.2 Anwendung bestehender WRRL-Monitoring-Programme in Schleswig-Holstein (Übersicht)

Gemäß Anhang V WRRL müssen zur Bewertung des Zustands der Oberflächengewässer als „Qualitätskomponenten für die Einstufung des ökologischen Zustands“ der Küstengewässer der Nord- und Ostsee unter den biologischen Komponenten u.A., die Zusammensetzung und

Abundanz sowie empfindliche und tolerante Taxa der „sonstigen Gewässerflora (nicht planktisch)“ und der benthischen wirbellosen Fauna erfasst werden.

Hierzu finden an der äußeren schleswig-holsteinischen Ostseeküste insgesamt 2 Bewertungsverfahren für küstennahes Makrobenthos statt: BALCOSIS („Baltic ALgae COmmunity analySIs System, (Schories et al. 2006; Fürhaupter & Meyer 2009)) und MarBIT (Marine Biotic Index Tool, (Meyer et al. 2008)). Während mit dem MarBIT-Verfahren der Zustand des Makrozoobenthos bewertet wird, bewertet das BALCOSIS-Verfahren den Zustand der Makrophyten dieser Gewässer:

BALCOSIS-Verfahren

Zur Bewertung des Zustands der „sonstigen Gewässerflora (nicht planktisch)“, also der Makrophyten (gemäß Anhang V WRRL RandNr 1-2-4) zieht das BALCOSIS-Verfahren insgesamt sieben unterschiedlich gewichtete Parameter heran (Schories et al. 2006; Fürhaupter & Meyer 2009):

1. Tiefengrenze *Zostera marina*
2. *Zostera marina*-assoziierte Opportunisten
3. Tiefengrenze *Fucus* spp*.
4. Dominanz *Fucus* spp*. (in 0-2 m Tiefe)
5. Opportunisten auf Hartsubstrat (in 5-7 m Tiefe)
6. Artenreduktion auf Hartsubstrat (in 5-7 m Tiefe)
7. Anteil Biomasse *Furcellaria lumbricalis* auf Hartsubstrat (in 5-7 m Tiefe).

*= *F. vesiculosus* und *F. serratus*

Für jeden der Parameter wird im BALCOSIS-Verfahren eine Bewertung entsprechend einer von fünf Bewertungsstufen („sehr gut“, „gut“, „mäßig“, „unbefriedigend“ und „schlecht“) anhand messbarer Variablen (z.B. Tiefenverbreitung *Fucus* spp. $\geq 8,5$ m: „sehr gut“, $< 0,5$ m: „schlecht“) durchgeführt. Jeder Bewertungsstufe wurde zur Normierung ein Intervall zwischen 0 und 1 zugeordnet („sehr gut“: 1,0-0,8; „gut“: 0,8-0,6; „mäßig“: 0,6-0,4; „unbefriedigend“: 0,4-0,2; „schlecht“: 0,2-0,0). So können die Werte verglichen werden und am Ende eine Gesamtbewertung für einen Wasserkörper berechnet werden (Schories et al. 2006; Fürhaupter & Meyer 2009). Die Bewertung des Zustands der Makrophyten an der schleswig-holsteinischen Ostseeküste wird durch MariLim jährlich einmal jeweils im Sommerhalbjahr (Zeitraum Juni-Oktober) durchgeführt.

MarBIT-Verfahren

Zur Bewertung des Zustands der benthischen wirbellosen Fauna (gemäß Anhang V WRRL RandNr 1-2-4) zieht das MarBIT -Verfahren vier Parameter heran (Meyer et al. 2005; Meyer et al. 2008):

1. Artenvielfalt: Taxonomic Spread Index (TSI)
2. Abundanz(-verteilung): (Test auf Log-Normalverteilung)
3. Obligatorische störungsempfindliche Taxa (spezialisiert auf einen Lebensraum und/oder spezialisiert auf eine Nahrung und/oder k-Strategie und/oder auf der Roten Liste der Ostsee)
4. Anteil toleranter Taxa (eutrophierungstolerant und/oder r-Strategie) im Vergleich zu Referenzanteil

Dem MarBIT-Verfahren liegen dabei eine Datenbank mit Informationen zur Autökologie vieler Ostseetaxa (z.B. Temperatur- oder Salinitätsansprüche und Sedimentpräferenzen) sowie eine Referenzartenliste zugrunde. Wie im BALCOSIS-Verfahren liefert auch im MarBIT-Verfahren jeder Parameter einen Wert zwischen 0 und 1. Als Gesamtbewertung dient im MarBIT-Verfahren der Median der den 4 Parametern entsprechenden Einzelwerten.

Die Bewertung des Zustands des Makrozoobenthos an der schleswig-holsteinischen (und mecklenburg-vorpommerschen) Ostseeküste geschieht auf der Grundlage von jährlich einmal jeweils im Sommerhalbjahr (Zeitraum Juni-Oktober) genommenen Greiferproben des LLUR und (im geringeren Umfang) des GEOMAR und wird in Zusammenarbeit mit MariLim (MariLim Gesellschaft für Gewässeruntersuchung mbH, Schönkirchen) durchgeführt.

Für die Bewertung von des FFH-Lebensraumtyps „Riffe“ (LRT 1170) wurde nun durch MariLim ein Bewertungsverfahren vorgelegt, das unter anderem auch auf dem MarBIT basiert (Berg et al. 2019). **Im weiteren Verlauf dieses Projekts (im Projektteil 2) wird geprüft, inwieweit sich dieser „Riff-MarBIT“ für die Bewertung von Flachwasservorkommen von Riffen im Rahmen des hier entworfenen Langzeitmonitorings anpassen lässt.**

4.1.3 RegLocDiv

Das RegLocDiv-(Regionale-Lokale-Diversität)-Monitoring des GEOMAR stellt die methodische Basis für das hier erarbeitete Langzeitmonitoring von küstennahen Hartbodengemeinschaften entlang der schleswig-holsteinischen Ostseeküste dar – und liefert gleichzeitig eine bestehende umfangreiche Datenbasis (die in Modul 3 in größerer Tiefe betrachtet werden soll), da es bereits seit Jahren durchgeführt wird.

Im RegLocDiv-Monitoring werden seit 2004 jährlich im September insgesamt 6 Standorte der schleswig-holsteinischen Ostseeküste (von Nord-West nach Süd-Ost: Falshöft, Boknis Eck, Schönberg, Fehmarn NW, Staberhuk, Kellenhusen/Schwarzgrund) mit FK Littorina angefahren und beprobt. An den Standorten liegen jeweils 7-9 Betonplatten aus, die mit jeweils 2

PVC-Besiedlungsplatten (11 x 11 cm) an Edelstahlgewindestangen ausgestattet sind. Eine der Besiedlungsplatten einer Betonplatte wird jährlich taucherisch ausgetauscht, die andere (Mehrjahresplatte) in unregelmäßigen Abständen. Die jährlich entnommenen Besiedlungsplatten werden an Bord von FK Littorina gebracht und dort fixiert. Die Erfassung und Analyse der Gemeinschaften auf den Platten erfolgt später am GEOMAR. Seit 2013 werden zudem an den Standorten die lokalen Temperaturen geloggt.

Die Datenerhebung/Probennahme des hier entwickelten Langzeitmonitorings kann also auf dem RegLocDiv-Monitoring aufbauen, wenn dieses langfristig weitergeführt wird und die Standorte mit Datenloggern zur Messung physikalischer Parameter (Temperatur, Salzgehalt, Sauerstoff) ausgestattet werden/sind.

Für die Verwendung der RegLocDiv-Platten als repräsentative Probeneinheiten/Replikate für die lokalen Riffgemeinschaften gemäß FFH muss dabei sichergestellt werden, dass sie die Hartbodengemeinschaften repräsentieren. Zu diesem Zweck sollten im Langzeitmonitoring regelmäßig -wie im Testmonitoring- Kratzproben der lokalen Benthosgemeinschaft genommen und die Zusammensetzung mit den Gemeinschaften der PVC-Platten verglichen werden.

Neben der Absicherung, dass die Besiedlungsplatten die lokalen Gemeinschaften repräsentieren und deshalb für eine Zustandserhebung der Riffgemeinschaften herangezogen werden können, können die Kratzproben auch als Stichprobe der lokalen Larvengemeinschaft und damit als das Potential zur Erholung der lokalen Gemeinschaft betrachtet werden.

Außerdem kann so die Frage beantwortet werden, inwieweit die auf den Platten vorgefundene Diversität (tatsächlich) von der Diversität der lokalen Gemeinschaft abhängt.

4.1.4 BALDESH/Bio-HAB

Im Rahmen des Projekts BALDESH werden flächendeckende Kartierungsarbeiten im Flachwasser entlang der schleswig-holsteinischen Ostseeküste durchgeführt, um Steinvorkommen zu vermessen, zu klassifizieren und einer ökologischen Bewertung zu unterziehen. So sollen Verfahren zum Ausweisen und Bewerten von Riffen gemäß FFH weiterentwickelt werden.

Im Teilprojekt Bio-HAB werden durch Feldstudien und Laborexperimente Umweltbedingungen erforscht, die die Struktur der Hartsubstratgemeinschaften (Riffgemeinschaften) formen. Auf diese Weise sollen Faktoren identifiziert werden, die in Bewertungsverfahren Berücksichtigung finden müssen. In Zusammenarbeit mit dem Schwesterprojekt „Geo-HAB“ werden Strategien zur Ausweisung von Riffflächen erarbeitet. Neben dieser Weiterentwicklung von bisherigen Monitoringstrategien dienen die experimentellen Studien auch der Erforschung der Stresstoleranz von Hartsubstratgemeinschaften der Ostsee. Ziel dieses Ansatzes ist es, die Auswirkungen *zukünftiger* Stressoren auf die Funktionalität der Gemeinschaften und die Bereitstellung von Ökosystemdienstleistungen zu untersuchen.

Für den experimentellen Teil von Bio-HAB wurden PVC-Besiedlungsplatten an RegLocDiv-Standorten ausgebracht. Die besiedelten Platten wurden nach einem Jahr taucherisch entnommen und samt lebender siedelnder Gemeinschaft ans GEOMAR gebracht. Dort wurden die Experimente zur Stressresistenz der Gemeinschaften durchgeführt. Hierfür wurden die

Besiedlungsplatten samt siedelnder Gemeinschaften Temperatur- oder Sauerstoffmangelstress ausgesetzt.

4.2 Ergebnisse Modul 2: Testmonitoring

Es konnten erfolgreich Besiedlungsplatten von den vier geplanten Standorten nach Kiel gebracht und dort für ein Test-Experiment verwendet werden. Im Mittel nahm im Laufe des Experiments der Besiedlungsgrad der Platten stärker unter ausgesüßten Behandlungen zu als in der Kontrollgruppe (Abbildung 5).

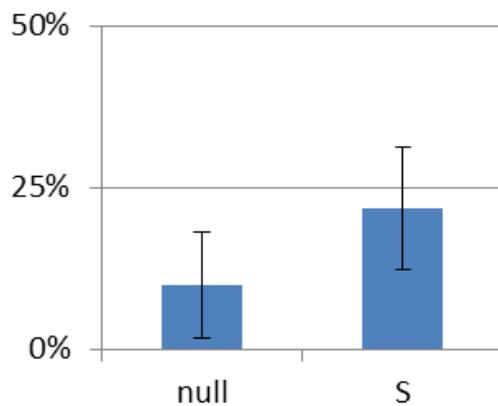


Abbildung 5: Auswirkung (Effect ratio \pm Konfidenzintervalle) des Testexperiments auf den Besiedlungsgrad der Besiedlungsplatten (null: Kontrolle, S: Salinitätsbehandlung).

Gemeinschaftsanalysen. Die benthischen Gemeinschaften auf den Besiedlungsplatten unterschieden sich klar nach ihrer Herkunft von den vier beprobten Standorten (ANOSIM, $R = 0.844$, Abbildung 6).

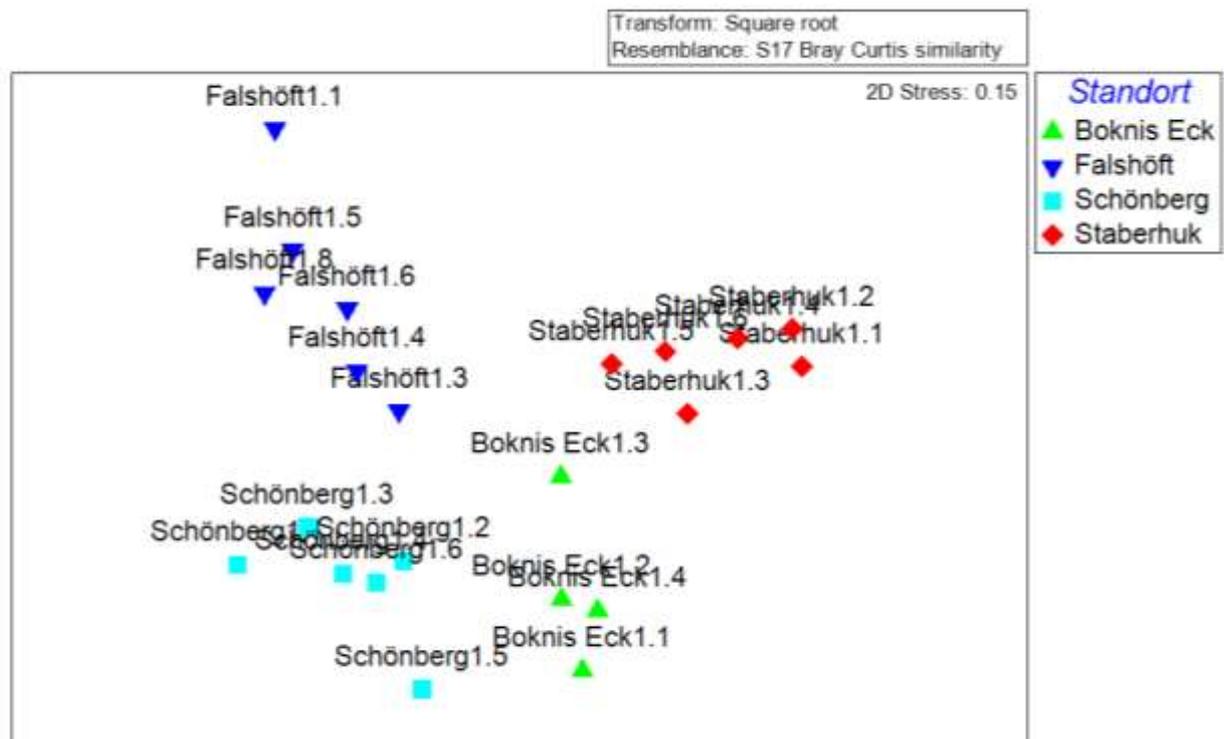


Abbildung 6: MDS-Plot der Gemeinschaften an den beprobten Standorten (Vor dem Experiment).

Bei den Gemeinschaften der Standorte Falshöft (PERMANOVA, Pseudo-F = 8.71, $p = 0.014$) und Schönberg (PERMANOVA, Pseudo-F = 7.80, $p = 0.013$) konnten darüber hinaus nach dem Testexperiment signifikante Veränderungen der Gemeinschaftstrukturen gegenüber den Gemeinschaften vor dem Experiment festgestellt werden. Jedoch zeigte sich kein signifikanter Effekt der Aussüßung auf die Gemeinschaften, sie veränderten sich also sowohl unter der Salinitätsbehandlung als auch in der Kontrollgruppe.

Als wichtigste Taxa, die zur Unterschiedlichkeit der Gemeinschaften der vier Standorte beitrugen wurden *Balanus improvisus*, *Mytilus edulis*, *Polydora* sp., *Polysiphonia fucooides*, *Dasya baillouviana*, *Ectocarpus* sp., *Chorda filum* sowie benthische Diatomeen identifiziert (SIMPER-Analyse, kumulativer Beitrag zu mind. 50% der Unterschiedlichkeit)..

Diversitätsanalysen.

- **Anzahl Taxa S:** Die Anzahl der identifizierten Taxa auf den Besiedlungsplatten wurde kaum durch das Experiment beeinflusst. Sie nahm nur an den Kontrollen von Boknis Eck (-1.5 ± 0.5 StAbw) und Schönberg (-3.3 ± 1.25 StAbw) jeweils leicht ab (Abbildung 7).

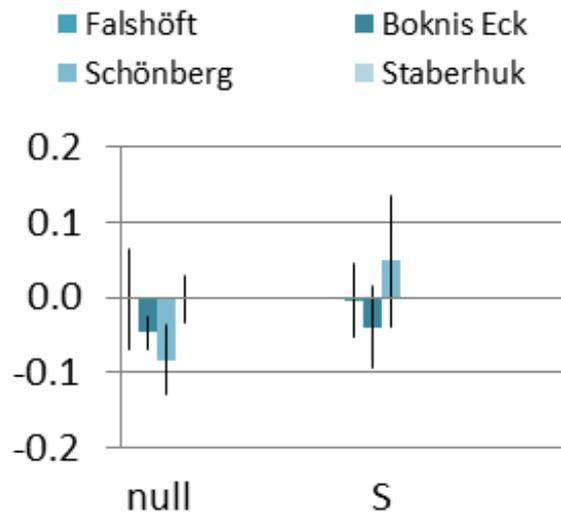


Abbildung 7: Auswirkung (Effect ratio \pm Konfidenzintervalle) des Testexperiments auf die **Anzahl der Taxa** auf den Besiedlungsplatten (null: Kontrolle, S: Salinitätsbehandlung).

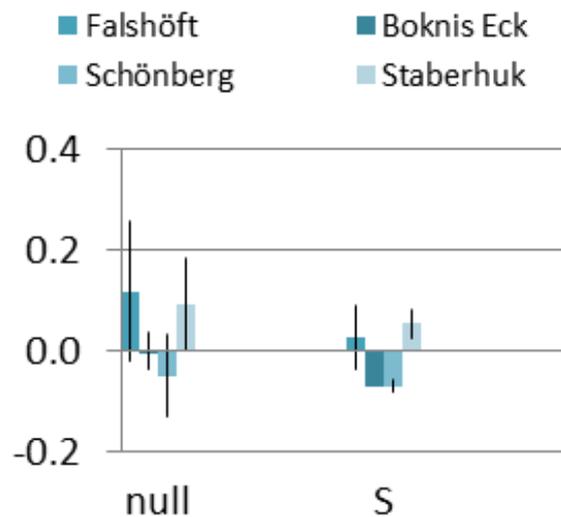


Abbildung 8. Auswirkung (Effect ratio \pm Konfidenzintervalle) des Testexperiments auf die Gleichverteilung (**Pilou's Evenness J'**) der Gemeinschaften auf den Besiedlungsplatten (null: Kontrolle, S: Salinitätsbehandlung).

- **Pilou's Evenness E:** Die Salinitätsbehandlung beeinflusste die Gleichverteilung (,Evenness') der Taxa der Gemeinschaften von den Standorten Boknis Eck, Schönberg und Staberhuk, nicht jedoch von Falshöft (Abbildung 8). Unter verringerter Salinität verringerte sich die Gleichverteilung der Gemeinschaften von Boknis Eck und Schönberg (die Dominanz einzelner Taxa nahm also *zu*). Auf den Platten von Staberhuk erhöhte sich dagegen die Gleichverteilung unter verringerter Salinität (die Dominanz einzelner Taxa nahm also *ab*).

Häufige / Bedeutende Arten (gem. Ergebnisse SIMPER-Analyse):

- ***Balanus improvisus*:** Über die Gemeinschaften aller Standorte gemittelt betrachtet nahm die Abundanz der Seepocke *Balanus improvisus* unter der Kontroll-Salinität leicht zu, jedoch nicht unter der ausgesüßten Behandlung. Bei Betrachtung der Gemeinschaften der einzelnen Standorte zeigt sich, dass die Salinitätsbehandlung die Abundanz von *B. improvisus* in der Boknis Eck-Gemeinschaft unter Aussüßung sogar leicht abnahm (Abbildung 9). In der Staberhuk-Gemeinschaft nahm die *B. improvisus*-Bedeckung bei höherer Salinität stärker zu als bei niedrigerer Salinität. Als Teil der Schönberg-Gemeinschaft dagegen profitierte *B. improvisus* im Mittel sogar etwas stärker von der Aussüßung, da der Zuwachs unter der Kontroll-Salinität stark schwankte.

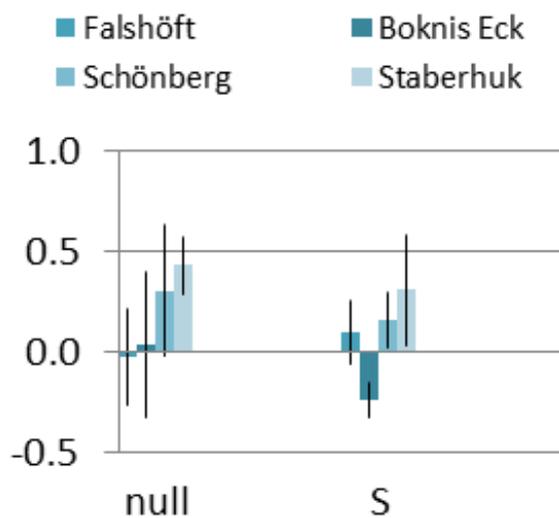


Abbildung 9: Auswirkung (Effect ratio \pm Konfidenzintervalle) des Testexperiments auf die Abundanz von *Balanus improvisus* auf den Besiedlungsplatten (null: Kontrolle, S: Salinitätsbehandlung).

- ***Mytilus edulis*:** Nur bei den Gemeinschaften von Boknis Eck und Schönberg zeigten die Miesmuscheln eine Reaktion auf die Salinitätsbehandlung. In beiden Fällen nahm die Bedeckung von *M. edulis* stärker bzw. konsistenter in der Kontrollbehandlung zu als unter ausgesüßten Bedingungen (Abbildung 10).

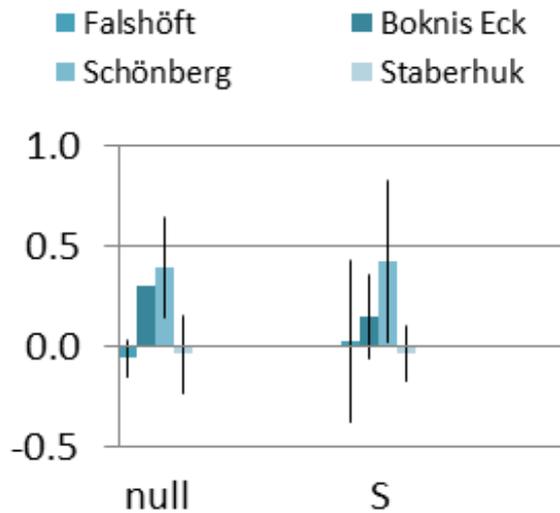


Abbildung 10: Auswirkung (Effect ratio \pm Konfidenzintervalle) des Testexperiments auf die Abundanz von *Mytilus edulis* auf den Besiedlungsplatten (null: Kontrolle, S: Salinitätsbehandlung).

Polydora sp.: Polychaeten der Gattung *Polydora* profitierten auf den meisten Besiedlungsplatten von der Hälterung in der Versuchsanlage, bei starker Streuung im Mittel etwas stärker unter der ausgesüßten Behandlung (

- Abbildung 11). Am konsistentesten nahm in der Gemeinschaft aus Falshöft die *Polydora* sp.-Abundanz unter verringerter Salinität zu – und in der Staberhuk-Gemeinschaft unter beiden Behandlungen.

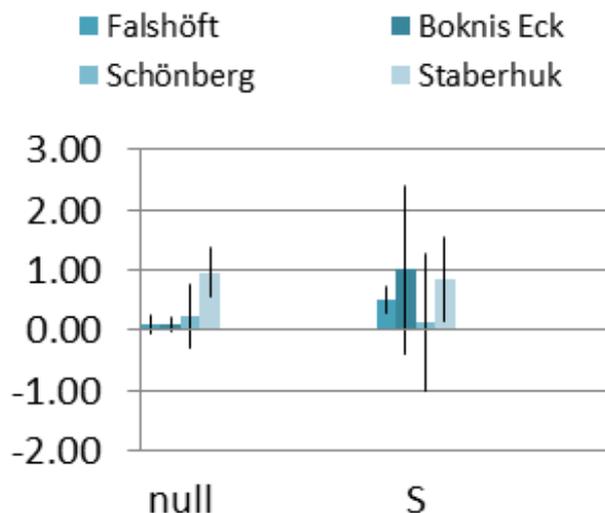


Abbildung 11: Auswirkung (Effect ratio \pm Konfidenzintervalle) des Testexperiments auf die Abundanz von *Polydora* sp. auf

den Besiedlungsplatten (null: Kontrolle, S: Salinitätsbehandlung).

- ***Polysiphonia fucoides***: Die Abundanzen der fädigen Rotalge *Polysiphonia fucoides* wurden nur wenig – oder wenig konsistent – durch die Salinitätsbehandlung beeinflusst. Nur in der Falshöft-Gemeinschaft nahm die Abundanz von *P. fucoides* und nur unter Kontrollbedingungen signifikant zu (Abbildung 12).

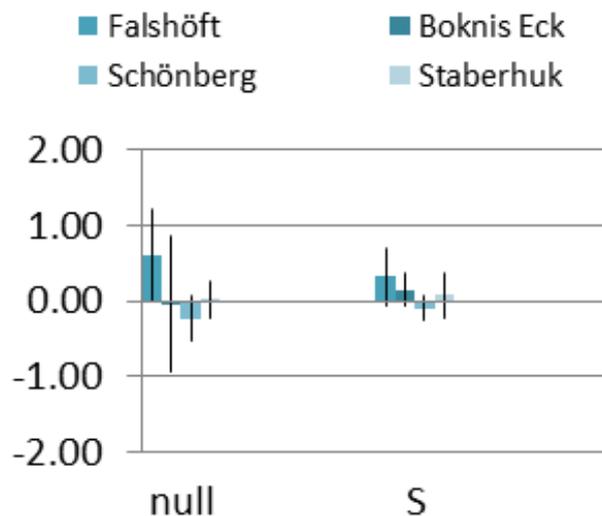


Abbildung 12: Auswirkung (Effect ratio \pm Konfidenzintervalle) des Testexperiments auf die Abundanz von ***Polysiphonia fucoides*** auf den Besiedlungsplatten (null: Kontrolle, S: Salinitätsbehandlung).

- ***Ectocarpus* sp.**: Fädige Braunalgen der Gattung *Ectocarpus* nahmen im Mittel in ihrer Abundanz stärker unter Kontrollbedingungen ab als unter ausgesüßten Bedingungen (Abbildung 13). Während die Abundanz von *Ectocarpus* sp. in den Boknis Eck-Gemeinschaften generell abnahm, war dieser Effekt auf den Platten von Schönberg unter Kontrollbedingungen deutlich stärker als unter ausgesüßten Bedingungen.

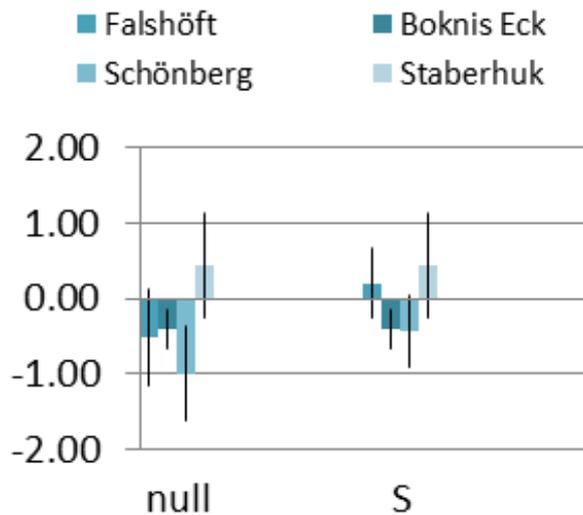


Abbildung 13: Auswirkung (Effect ratio \pm Konfidenzintervalle) des Testexperiments auf die Abundanz von *Ectocarpus sp.* auf den Besiedlungsplatten (null: Kontrolle, S: Salinitätsbehandlung).

- ***Chorda filum***: Diese Braunalgenart kam nur bei Boknis Eck vor und ihre Abundanz wurde nicht signifikant durch die Salinitätsbehandlung beeinflusst
- **Diatomeen**: Die Bedeckung der Besiedlungsplatten durch benthische Diatomeen nahm auf vielen Platten sowohl der Kontrolle, als auch der ausgesüßten Behandlung, zu. Unter ausgesüßten Bedingungen war dieser Effekt jedoch im Mittel etwas stärker als in der Kontrolle (Abbildung 14). Am deutlichsten wurde dieser Effekt in den Gemeinschaften von Schönberg und Staberhuk sichtbar. Auf den Platten aus Falshöft wuchsen die Diatomeen dagegen stärker unter Kontrollbedingungen als unter verringerter Salinität.

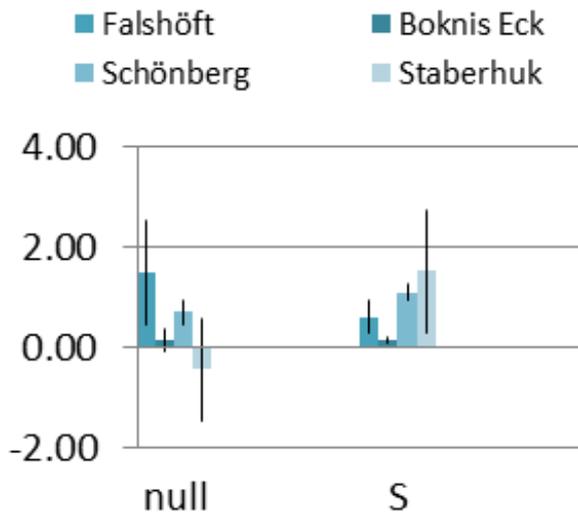


Abbildung 14: Auswirkung (Effect ratio \pm Konfidenzintervalle) des Testexperiments auf die Abundanz von benthischen **Diatomeen** auf den Besiedlungsplatten (null: Kontrolle, S: Salinitätsbehandlung).

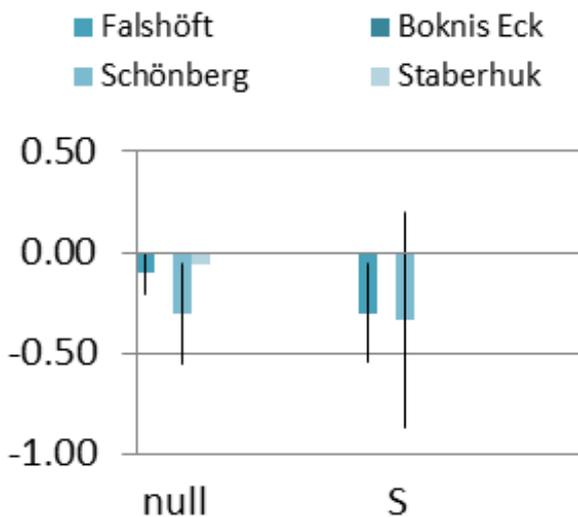


Abbildung 15: Auswirkung (Effect ratio \pm Konfidenzintervalle) des Testexperiments auf die Abundanz des Neobiots ***Dasya baillouviana*** auf den Besiedlungsplatten (null: Kontrolle, S: Salinitätsbehandlung).

4.2.1 Zusammenfassung Ergebnisse des Testmonitorings und Test-Experiments

Im Rahmen des Testmonitorings wurden erfolgreich die -auf zuvor ausgebrachten Besiedlungsplatten siedelnden- Benthos-Gemeinschaften der vier ausgewählten Standorte taucherisch beprobt und anschließend in einem Test-Experiment am GEOMAR einer Stressbehandlung (Aussüßung) ausgesetzt. [Aufgrund ungünstiger Witterung konnten die zusätzlichen Hartbodenproben der lokalen natürlichen Riffgemeinschaften erst 2019 genommen werden – und werden derzeit noch ausgewertet.]

Mit dem Test-Experiment wurde gezeigt, dass es möglich ist, die unterschiedlichen Benthosgemeinschaften verschiedener Standorte in der Kieler Bucht schnell und schonend ans GEOMAR in Kiel zu transportieren und dort für Experimente zu nutzen. Im Experiment hatte die angewendete Stressbehandlung zwar meist nur schwache aber (trotz geringer Replikation (n=3)) durchaus signifikante Effekte auf die beprobten Gemeinschaften, die sich je nach Herkunft der Gemeinschaften unterschieden. Während die Artenzahlen der 4 behandelten Gemeinschaften jedoch nicht durch die Aussüßung verringert wurden (es starben keine Arten aus), gab es doch Verschiebungen in den Gemeinschaftszusammensetzungen hin zu mehr Dominanz in den Gemeinschaften aus Boknis Eck und Schönberg, während in der Staberhuk-Gemeinschaft die Dominanz einzelner Arten abnahm.

Die Gemeinschaft des Standortes Falshöft zeigte nach der Aussüßung gegenüber der Kontrolle verringerte Abundanzen der Rotalgen *Dasya baillouviana*. Die Abundanzen von *Polysiphonia fucoides* und von benthischen Diatomeen nahmen weniger zu als in der Kontrolle. Polychaeten der Gattung *Polydora* konnten dagegen von der Aussüßung profitieren.

Die Gemeinschaften der Standorte Boknis Eck und Schönberg zeigten im Test-Experiment ähnliche Reaktionen: Während benthische Diatomeen unter der verringerten Salinität stärker wuchsen, nahm die Abundanz von Miesmuscheln unter der höheren Salinität stärker zu. An beiden Standorten nahm außerdem die Gleichverteilung („Evenness“) unter der Aussüßung ab, die Dominanz einzelner Taxa (insb. Diatomeen) nahm also zu. Während die Abundanz der Seepocke *Balanus improvisus* durch die Aussüßung in der Boknis Eck-Gemeinschaft leicht abnahm, nahm die in der Schönberg-Gemeinschaft unter geringerem Salzgehalt leicht zu.

Die von *M. edulis* und *Balanus improvisus* dominierte Staberhuk-Gemeinschaft zeigte relativ geringe Einflüsse der Salinitätsbehandlung. Während die Abundanz von *Balanus improvisus* unter niedriger Salinität weniger zunahm als unter hoher, vermehrten sich die benthischen Diatomeen nur bei verringertem Salzgehalt signifikant. Hierdurch wurde die Dominanz von Miesmuscheln und Seepocken verringert, was sich in einer höheren Evenness widerspiegelt.

4.2.2 Diskussion Ergebnisse des Testmonitorings und Test-Experiments

Laut den Salinitätsdaten aus 2016 und 2017 kann für Falshöft die geringste Wahrscheinlichkeit von spontanen mehrtägigen Exkursionen des Salzgehalts unter eine Salinität von 10 angenommen werden (Abbildung 3). Die Gemeinschaft dieses Standorts mit hohem Anteil an Rotalgen zeigte relativ klare Reaktionen auf die applizierte Aussüßung. Die Gemeinschaft von Staberhuk, wo die benthische Gemeinschaft schon früher in diesem Jahr längere Phasen von Salinitäten unter 10 erlebt hat (Abbildung 2), zeigte sich dagegen bis auf eine leichte Zunahme von benthischen Diatomeen im Experiment (erwartungsgemäß) robust gegenüber geringem Salzgehalt.

Von den Standorten Falshöft und Schönberg liegen aufgrund von Verlusten an den Messstationen (Projekt Flachwasser-Abiotik) leider keine Umweltdaten aus 2018 vor. Daher beschränkt sich die Diskussion im Folgenden auf die Standorte Boknis Eck und Staberhuk.

Hier zeigte sich, dass in den 3 Monaten vor der Beprobung bei kräftigen Schwankungen bei Boknis Eck erwartungsgemäß im Durchschnitt eine leicht höhere Salinität (11,7) vorherrschte als bei Staberhuk (10,5; Abbildung 16). Allerdings gab es bei Staberhuk deutlich häufigere, längere und ausgeprägtere Phasen von Salzgehalten unterhalb von Salinität 10 als in Boknis Eck: In Staberhuk ergab die Summe der Abweichungen unterhalb Salinität 10 in dem Zeitraum 9291, in Boknis Eck nur 2020.

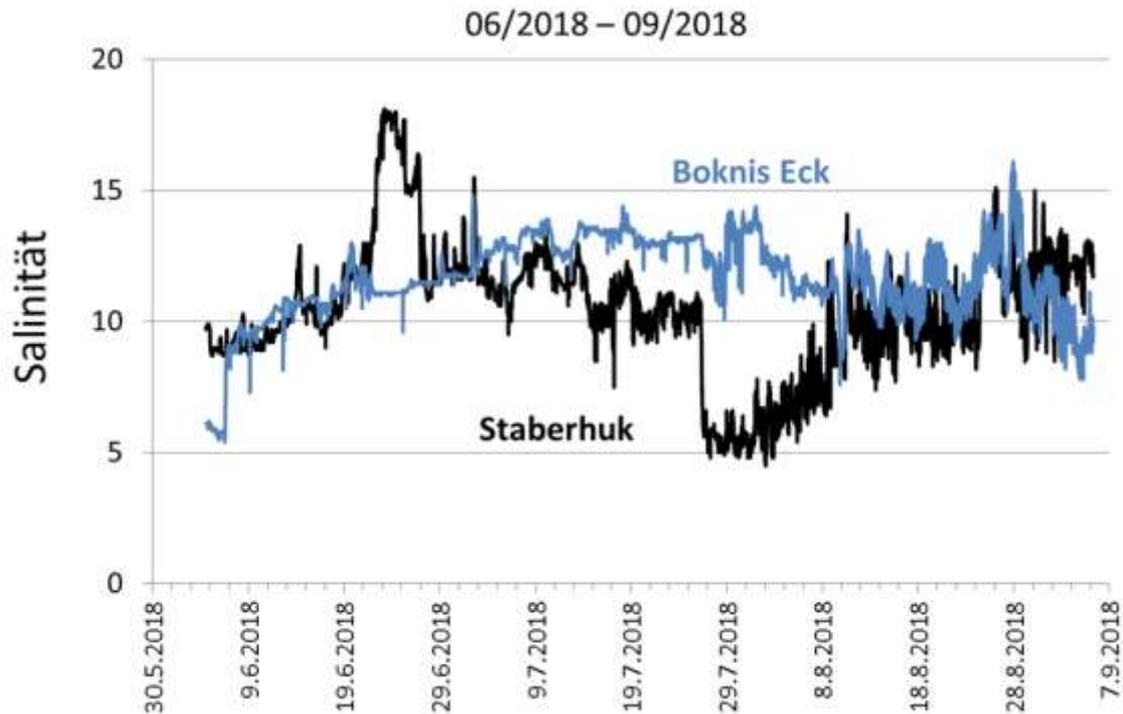


Abbildung 16: Salinitäten an den Standorten Boknis Eck (blau) und Staberhuk (schwarz) in den 3 Monaten vor der Probennahme im September 2018.

Insbesondere die Ergebnisse der Abundanzveränderungen bei *Mytilus edulis* und *Amphibalanus improvisus* lassen sich gut durch die an den Standorten Boknis Eck und Staberhuk in den drei Monaten vor der Probennahme gemessenen Salinitäten erklären: Während in der Staberhuk-Gemeinschaft, die vor den Experimenten häufiger und ausgeprägter Bedingungen mit Salinitäten unter 10 erfahren hat, keine Effekte zu sehen sind, zeigen in der Boknis Eck-

Gemeinschaft sowohl *Mytilus* sp. als auch *A. improvisus* im Mittel niedrigere Abundanz-Effekte unter ausgesüßten Bedingungen als unter normaler Salinität (Abbildung 17).

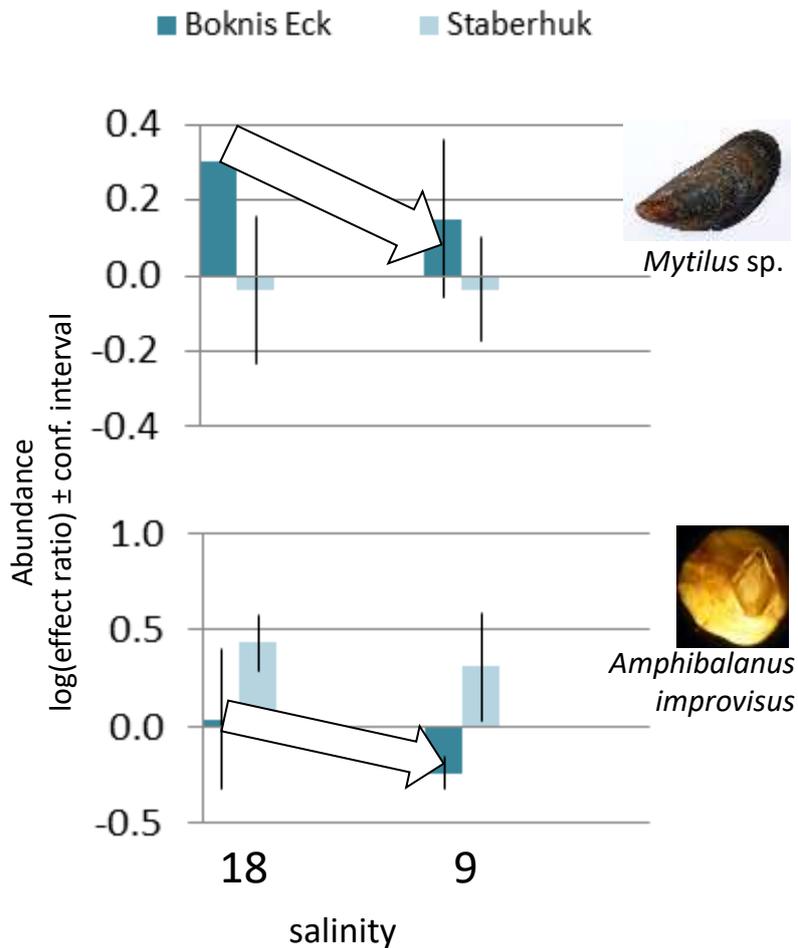


Abbildung 17: Vergleich der Aussüßungseffekte auf *Mytilus* sp. (Foto: Erik Veldhuis, Wikimedia.org) und *Amphibalanus improvisus* (Foto: Auguste Le Roux, Wikimedia.org) in den Gemeinschaften aus Boknis Eck und Staberhuk.

4.2.3 Zusammenfassung Modul 2

- Wir konnten erfolgreich vitale Gemeinschaften nach Kiel bringen und dort mit ihnen experimentieren.
- Es konnten schwache aber signifikante Unterschiede zwischen Organismen aus unterschiedlichen Herkunfts-Umweltbedingungen gezeigt werden.

- Auf diese Weise könnten *in Zukunft* – neben dem reinen Flachwasser-Hartboden- Monitoring – biologische Indikatoren für Umweltbedingungen fortentwickelt werden.
- Als Voraussetzung für die Indikatoren-Fortentwicklung wurde ein vollständiges Sensoren-Set (T, SAL, O₂) direkt an den Standorten ausgebracht.

4.3 Ergebnisse Modul 3

4.3.1 Auswirkungen des globalen Wandels auf die Ostsee

Trotz nationaler und internationaler Anstrengungen (BMU 2019) steigen die weltweiten CO₂-Emissionen weiter stark an (in den Jahren 2017 und 2018 sogar besonders stark, mit einem neuen Rekord von 33,1 Gt aus der Energieproduktion in 2018; IEA 2019). Demnach bewegen sich die CO₂-Emissionen bisher entlang des gemeinhin als „business as usual“-Szenarios „RCP8.5“, das auf eine CO₂-Konzentration von 1370ppm im Jahr 2100 hinausläuft und einem erwarteten globalen Temperaturanstieg von 3,2 bis 5,4 °C entspricht (z.B. Laffoy & Baxter 2018). In den Meeren wurde infolge des Klimawandels seit 1990er Jahren eine beschleunigte Erwärmung gemessen (IPCC 2019). Da über 90% der durch den anthropogenen Treibhauseffekt erzeugten Überschusswärme in den Ozean gespeichert werden, wird bis 2100 mit einer Erhöhung der mittleren globalen Meerestemperatur von 1 bis 4 °C gerechnet (Laffoy & Baxter 2016).

In Deutschland vollzieht sich der Klimawandel dabei sogar schneller als im weltweiten Mittel. Die derzeit international als begrenzendes Ziel für die globale Erwärmung angestrebten 1,5 °C wurden 2018 in Deutschland bereits erreicht (Umweltbundesamt 2019). Die Ostsee ist als Binnenmeer (mit umliegenden Landmassen) zudem stärker als andere Meere von Erwärmung betroffen (Barboza & Franz 2016). Im Vergleich zu den Weltmeeren wird für die Ostsee daher eine bis zu 3-fache Erwärmungsrate erwartet (Belkin 2009). Die Auswirkungen sind bereits spürbar: Die Hitzewelle in 2018 erstreckte sich auch über die gesamte Ostsee, deren mittlere Oberflächentemperatur im Juli mit 20,0 °C einen neuen Rekord darstellte (Umweltbundesamt 2019). Die Entwicklung in der Ostsee wird daher auch wie ein Blick in Zukunft anderer Meeresregionen betrachtet (Reusch et al 2018). Für das Ende des 21. Jahrhunderts wurde bisher für die südliche / westliche Ostsee mit einer Erwärmung der Meeresoberflächentemperatur um etwa 2 °C (0,5 – 2,5 °C) gerechnet (Gräwe et al. 2013, HELCOM 2013). In der jüngeren Studie von Gröger et al. (2019) wurde für die Ostsee sogar ein mittlerer Temperaturanstieg von 2,3 bis 4,7 °C im Vergleich der Jahre 2070-2099 gegenüber 1970-1999 berechnet.

Entsprechend dieser Entwicklung wandern in der *Nordsee* seit den 1990er Jahren zunehmend mehr wärmeliebende Fischarten aus südlicheren Regionen ein - und kälteliebende nach Norden aus (Umweltbundesamt 2019). Durch den Salinitätsgradienten besteht diese Fluchtmöglichkeit in der Ostsee für viele Arten aber nicht (Barboza & Franz 2016). Da der Salinitätsgradient gemeinsam mit der Beckenstruktur der Ostsee zum Teil auch den Austausch zwischen Populationen behindert (Hinrichsen et al. 2018, Franz et al. 2019a), besteht zudem Zweifel an der genetischen Anpassungsfähigkeit von Ostseearten an den Klimawandel. Insbesondere im Sommer und Winter können daher in Zukunft wesentliche Verschiebungen in *Fucus*-Gemein-

schaften der Ostsee erwartet werden (Wahl et al. 2019). Hohe Sommertemperaturen führen in Flachwasser-Hartbodengemeinschaften der Ostsee zu erhöhtem Umsatz, was zu verringertem Biomasseaufbau und sogar zum Zusammenbruch der Gemeinschaften führen kann (Franz 2018). Neben der langjährigen Erhöhung mittlerer Temperaturen werden aber zukünftig auch Zunahmen von Frequenz, Amplitude und Dauer von Hitzewellen erwartet (Gräwe et al. 2013, Pansch & Hiebenthal 2019). Dies erhöht das Risiko durch Temperaturerhöhungen für die Ostseegemeinschaften zusätzlich (Bates et al. 2018, Pansch et al. 2018).

Aber auch andere Effekte des Globalen Wandels werden die Ostseegemeinschaften in Zukunft betreffen. Da diese Studie Hartbodengemeinschaften behandelt, sollen im Folgenden aber nur solche Effekte genannt werden, die diese Gemeinschaften betreffen:

Ebenfalls durch den Klimawandel verursacht wird - durch erhöhte Niederschlagsmengen im Einzugsgebiet - ostseeweit bis 2100 mit einer Abnahme der Salinität um 1,5 bis 2 Salzgehaltseinheiten gerechnet (Gräwe et al 2013, HELCOM 2013). Gröger et al. (2019) gehen von einer ostseeweiten Abnahme von 0,6 bis 2,3 Einheiten zwischen den Jahre 1970-1999 und 2070-2099 aus, wobei die Prognosen für die süd-westliche Ostsee z.T. sogar eine Verringerung um bis zu 3 Einheiten zeigen. Die verstärkten Niederschläge tragen aber nicht nur zur Aussüßung bei. Es wird im 21. Jahrhundert auch ein verstärkter Nährstoffeintrag über die Flüsse erwartet (Meier et al. 2012), der die Eutrophierung mit stärkerem Wachstum von planktischen Mikroalgen und ephemeren Makroalgen verstärkt: Eine negative Folge ist die verringerte Lichtversorgung langlebiger Makroalgen und Seegräser. Sterben die opportunistischen Algen ab, sinken sie zudem zu Boden und durch den bakteriellen Abbau wird der Sauerstoff in Bodennähe aufgezehrt. Die erhöhte Temperatur verstärkt zudem die Remineralisierung von Nährstoffen aus Sedimenten (Meier et al. 2012) und sorgt für eine stabilere Schichtung (Gröger et al 2019). Veränderte Windverhältnisse werden laut Simulationen in Zukunft auch die Anzahl von Einstromereignissen und damit die Versorgung von tieferen Wasserschichten mit Sauerstoffreichem Wasser verringern (Gräwe et al. 2013). So werden die Eutrophierungseffekte insgesamt zusätzlich verstärkt und der Sauerstoffmangel in den Becken der Ostsee verschärft sich (Barboza & Franz 2016). Durch windgetriebene „Upwelling“-Ereignisse kommt es bereits heute gelegentlich zu hypoxischen Bedingungen im Flachwasser der Ostsee (Melzner et al. 2013). Wenn das dabei an die Oberfläche strömende Wasser aus tieferen Schichten in Zukunft häufiger sauerstoffarm ist, stellt dies eine weitere Belastung für Flachwassergemeinschaften dar.

Weitere Einwirkungen auf die Lebensgemeinschaften der Ostsee ergeben sich aus der direkten Einflussnahme der Menschen auf die besiedelten Nischen (Substratentnahme, Sedimentation), auf einzelne Organismen(-gruppen) (Überfischung) oder auf die Gemeinschaften selbst (Einführung neuer Arten) (Bock 2003, Barboza & Franz 2016). Da sich die Ostsee nach wie vor in einer postglazialen Sukzession befindet und relativ artenarm ist, sind die Ostseegemeinschaften überdurchschnittlich anfällig für Invasionen (Barboza & Franz 2016). Gleichzeitig stellt die geringe genetische Diversität und niedrige funktionale Redundanz (zumindest bei Weichbodenarten) ein höheres Risiko für den Ausfall von Ökosystemleistungen dar, wenn Arten (lokal) aussterben (Barboza & Franz 2016).

4.3.2 Auswirkungen des Globalen Wandels auf Makroalgen-/*Fucus*-Gemeinschaften der Ostsee

In einer Zusammenfassung wurden von Hiebenthal et al. (2012) als wichtige Stressoren für Makrophytenbestände die Eutrophierung inkl. Hypoxie, erhöhte Temperatur, Aussüßung, Sedimentation sowie invasive Arten identifiziert. Noch 2015 wurde allerdings der Einfluss des Klimawandels auf *Fucus* spp. als eher gering eingeschätzt (Wahl et al. 2015), insbesondere an Standorten mit natürlich vorkommenden starken Schwankungen in der abiotischen Umwelt (wie der Ostsee).

In der Zwischenzeit zeigten neuere Ergebnisse aus Mesokosmenexperimenten jedoch ein anderes / differenzierteres Bild. Demnach bricht die Verteidigung von *Fucus vesiculosus* gegenüber Fouling und Fraßfeinden bereits bei Sommertemperaturen über 18 °C ein (Wahl et al. 2019). Da parallel auch der Fraßdruck auf ephemere Aufwuchsalgen abnimmt, leidet *Fucus* doppelt unter den hohen Temperaturen. Das Wachstum von *Fucus* selbst verringert sich ab Temperaturen oberhalb von 20 °C; ab 27 °C wächst die Alge nicht mehr und es tritt nach wenigen Tagen Nekrose auf (Graiff et al. 2015). Bislang treten Temperaturen oberhalb 18 bzw. 20 °C nur in einem relativ kurzen Zeitraum zwischen Juli und September auf. Bei einer erwarteten Erhöhung der sommerlichen Wassertemperaturen um mehr als 2°C bis 2100 (Gröger et al. 2019) würde sich dieses für *Fucus* kritische Zeitfenster aber um mehrere Wochen verlängern (Wahl et al. 2019) – bei gleichzeitiger Erhöhung der Wahrscheinlichkeit von Hitzewellen. Die Folge dieses Szenarios wären mit hoher Wahrscheinlichkeit absterbende *Fucus*-Bestände. In Kombination mit (durch die ebenfalls verstärkte Eutrophierung verursachten) Lichtmangel fallen diese Effekte erwartbar noch stärker aus (Weinberger et al. 2011).

Verschärft wird die Lage für *Fucus* zusätzlich durch die Aussüßung von wahrscheinlich ebenfalls über 2 Salinitätseinheiten bis zum Ende des 21. Jahrhunderts (Gröger et al. 2019), da sich hierdurch das Ostseeweit das besiedelbare Habitat verkleinert. Aktuelle Ergebnisse zeigen, dass sich lokal angepasste *Fucus*-Populationen weder schnell genug anpassen, noch über Verbreitung in Richtung günstigerer Bedingungen ‚mitwandern‘ können (Jonsson et al. 2018).

Schließlich zeigte sich, dass auch Invasionen nicht-einheimischer Arten die Makrophytenbestände der Ostsee schwächen können: Weinberger et al zeigten 2008, dass sich Isopoden bevorzugt bei Tag zwischen invasiven Algen („*Gracilaria vermiculophylla*“, heute *Agarophyton vermiculophyllum*) vor ihren Fressfeinden verstecken, um dann bei Nacht bevorzugt *Fucus* zu fressen – anstelle gut verteidigter „*Gracilaria*“.

4.3.3 Auswirkungen des Globalen Wandels auf Miesmuschel-Gemeinschaften der Ostsee

Als wichtige Stressoren von Miesmuscheln gelten neben direkten menschlichen Aktivitäten wie Muschelfischerei und Küstenbebauung auch der Klimawandel (Temperaturerhöhung, Aussüßung, Versauerung) und die Eutrophierung (Hiebenthal et al 2012). Die Effekte von erhöhten Nährstoffbelastungen auf die Miesmuschelpopulation der Ostsee sind aber unklar. Durch erhöhte Phytoplanktondichten verbessert sich tendenziell sogar die Nahrungsversor-

gung der Muscheln, was sie ggf. robuster gegenüber anderen Stressoren (wie Versauerung) macht (Thomsen et al 2010). Auch Sauerstoffmangelsituationen in Folge der Eutrophierung können die Muscheln relativ gut überstehen, solange sie nicht zu lange andauern (Theede et al 1969, Dolmer 1999).

Hohe Wassertemperaturen über 20°C können, insbesondere unter nahrungslimitierten Verhältnissen, Verfassung und Wachstumsraten von Miesmuscheln reduzieren (Hiebenthal et al. 2012, Clements et al. 2018). Ebenso können Temperaturschwankungen und Hitzewellen ungünstig für das Muschelwachstum sein (Pansch et al 2018, Pansch & Hiebenthal 2019). Auf der anderen Seite war *Mytilus* in jüngeren Studien fähig, sich an Hitzewellen zu akklimatisieren, sodass sie unter folgenden Wellen weniger stark litten (Lenz et al 2018, Pansch et al 2018). Höhere Temperaturen können im Frühling sogar das Larvenwachstum beschleunigen und damit die Population stärken (Franz et al 2019, Knoebel et al. *in review*).

Insgesamt scheint in der Ostsee der Salinitätsgradient der entscheidende Verbreitungsfaktor der *Mytilus*-Populationen sein (Stuckas et al. 2017). Bei niedrigeren Salinitäten verringern sich sowohl das Schalenwachstum der Muschellarven, als auch der adulten Tiere (Thomsen et al 2018, Sanders et al 2018). Da die Tiere jeweils an lokale Salzgehalte genetisch angepasst (adaptiert) sind und nur geringe Verbreitungsdistanzen aufweisen, sind die lokalen Populationen relativ klar getrennt (Franz et al 2019, Knoebel et al. *in review*). Bei einer Aussüßung der Ostsee um mehr als 2 Salinitätseinheiten würden sich die heutigen Populationen weiter nach Westen verschieben müssen.

4.3.4 Verwendung des Flachwasser-Hartbodenmonitorings zum Testen der Zukunftsszenarien

Die hier diskutierten Zukunftsszenarien für *Fucus*- und *Mytilus*-Gemeinschaften können durch das hier (Modul 2) entwickelte Monitoring getestet werden. Dafür können in Zukunft zum einen *Korrelationen* zwischen Abundanzen von strukturgebenden Schlüsselarten wie *Fucus* und *Mytilus* sowie von Störungsanzeigern wie benthischen Feinalgen und Diatomeen und abiotischen Umweltfaktoren (Temperatur, Salzgehalt, Sauerstoffgehalt) während der gesamten Siedlungsphase erstellt werden. Zum anderen können gezielt (und wiederholt) Zukunftsszenarien in Experimenten an Hartbodengemeinschaften mit unterschiedlicher Zusammensetzung und Vorgeschichte simuliert werden. Möglich wäre zum Beispiel, entsprechende Experimente in 3-Jahresabständen durch die 3 gemessenen Umweltfaktoren rotierend durchzuführen, um so die Entwicklung der Stressempfindlichkeit im Laufe des fortschreitenden Klimawandels zu verfolgen.

4.3.5 Zusammenfassung Modul 3

- Aktuelle wissenschaftliche Studien zeigen, dass die Vorhersagen zum Klimawandel dahingehend angepasst werden müssen, dass die erwarteten Veränderungen mit hoher Wahrscheinlichkeit in der Ostsee früher und stärker eintreten werden.
- Gleichzeitig zeigt sich, dass wichtige Gemeinschaften empfindlicher auf die erwarteten Veränderungen reagieren werden – und weniger Möglichkeiten zur Anpassung oder zum Ausweichen haben als bisher angenommen.

- Für Makroalgen-/Fucus-Bestände scheint dies stärker zu gelten als für Miesmuschelgemeinschaften.
- Das hier entwickelte Monitoring kann verwendet werden, um diese Zukunftsszenarien in Zukunft regelmäßig zu testen.

4.4 Übersicht bisherige Ergebnisse

Folgende Punkte wurden *bislang* erarbeitet:

- Ausbringung von Besiedlungsplatten an 4 Standorten im Rahmen der jährlichen Ausfahrt mit FK Littorina
- Identifizierung passender Erhebungen von Umweltdaten
- Identifizierung verwandter Monitorings (RegLocDiv), Bewertungsverfahren (BALCOSIS, MarBIT) und experimenteller Projekte (Bio-HAB), auf denen aufbauend das Langzeitmonitoring-Konzept entwickelt werden soll
- Planung und Durchführung des Testmonitorings, inkl. Rückholens der Platten im September 2018 und anschließendem Test-Experiments.
- Auswertung des Test-Experiments
- Ausbringung von Loggern zur
- Diskussion von Zukunftsszenarien für Ostsee-Hartbodengemeinschaften; Darlegung, wie diese mithilfe des entwickelten Monitorings getestet werden können.
- Fortführung Konzeptentwicklung Langzeitmonitoring inklusive Bewertungssystem

5 Verwendete Quellen

- 92/43/EWG (1992): Richtlinie 92/43/EWG des Rates vom 21. Mai 1992 zur Erhaltung der natürlichen Lebensräume sowie der wildlebenden Tiere und Pflanzen (Flora-Fauna-Habitat-Richtlinie). Der Rat der Europäischen Gemeinschaften: 44 S.
- 2000/60/EG (2000): Richtlinie 2000/60/EG des Europäischen Parlaments und des Rates vom 23. Oktober 2000 zur Schaffung eines Ordnungsrahmens für Maßnahmen der Gemeinschaft im Bereich der Wasserpolitik (Wasserrahmenrichtlinie). Das Europäische Parlament und der Rat der Europäischen Union: 83 S.
- 2008/56/EG (2008): Richtlinie 2008/56/EG des Europäischen Parlaments und des Rates vom 17. Juni 2008 zur Schaffung eines Ordnungsrahmens für Maßnahmen der Gemeinschaft im Bereich der Meeresumwelt (Meeresstrategie-Rahmenrichtlinie). Das Europäische Parlament und der Rat der Europäischen Union: 22 S.
- Barboza, F. & M. Franz (2016): Die Biodiversität der Ostsee: Erkenntnisse der Vergangenheit und Perspektiven für die Zukunft. In: Lozán, J. L., S.-W. Breckle, R. Müller & E. Racher (Hrsg.). Warnsignal Klima: Die Biodiversität. pp. 277-283. doi:10.2312/warnsignal.klima.die-biodiversitaet.45.
- Bates, AE, Helmuth, B, Burrows, MT, Duncan, MI, Garrabou, J, Guy-haim, T, Lima, F, Queiros, AM, Seabra, R, Marsh, R, Belmaker, J, Bensoussan, N, Dong, Y, Mazaris, AD, Smale, D, Wahl, M & Rilov, G (2018): Biologists ignore ocean weather at their peril, Nature, vol. 560, no. 7718, pp. 299-301. <https://doi.org/10.1038/d41586-018-05869-5>
- Belkin, I. M. (2009): Rapid warming of Large Marine Ecosystems. Prog Oceanogr 81:207-213.
- Berg, T., Fürhaupter, K. und Meyer, T. (2019): Entwicklung eines Bewertungsverfahrens für den Lebensraumtyp Riffe (LRT 1170) nach MSRL und FFH-RL. Endbericht für das Landesamt für Landwirtschaft, Umwelt und ländliche Räume. MariLim. 140 S.
- Bock G, Lieberum C (2016): Aufnahme der Flachwasserabiotik in Schleswig-Holstein – Zwischenbericht. Im Auftrag des Landesamts für Landwirtschaft, Umwelt und ländliche Räume Schleswig-Holstein (LLUR). GEOMAR, 33 S.
- Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und nukleare Sicherheit BMU (2019): Klimaschutz in Zahlen - Fakten, Trends und Impulse deutscher Klimapolitik Ausgabe 2019. BMU, 68 S.
- Clements, JC., Hicks, C., Tremblay, R. and Comeau, LA. (2018): Elevated seawater temperature, not pCO₂, negatively affects post-spawning adult mussels (*Mytilus edulis*) under food limitation. Conservation Physiology, 6: 14 S. doi: 10.1093/conphys/cox078.
- Cornell, H. V. & Karlson, R. H. (1996): Species richness of reef-building corals determined by local and regional processes. Journal of animal ecology, 65:233-241.
- Dixon, P.S. & Irvine, L.M. (1995): Seaweeds of the British Isles. Vol. 1 Rhodophyta. Part 1 Introduction, Nemaliales, Gigartinales. The Natural History Museum: 252 S.

- Doak, D. F. et al. (1998): The statistically inevitability of stability-diversity relationships in community ecology. *The American Naturalist*, 151(3):264-276.
- Dolmer, P., Sand Kristensen, P. and Hoffmann, E. (1999): Dredging of blue mussels (*Mytilus edulis* L.) in a Danish sound: stock sizes and fishery-effects on mussel population dynamic. *Fisheries Research* 40(1): 73-80.
- Edwards, P. J. & Abivardi, C. (1998): The value of biodiversity: Where ecology and economy blend. *Biological Conservation*, 83(3):239-246.
- Fürhaupter, K. & Meyer, T. (2009): Handlungsanweisung zum Monitoring in den äußeren Küstengewässern der Ostsee nach den Vorgaben der EU-Wasserrahmenrichtlinie. Qualitätskomponente Makrophyten. BALCOSIS-Verfahren. Bearbeitungsstand 31. März 2009. Landesamt für Landwirtschaft, Umwelt und ländliche Räume (LLUR) Schleswig-Holstein und Landesamt für Umwelt, Naturschutz und Geologie (LUNG) Mecklenburg-Vorpommern. MariLim, Schönkirchen: 38 S.
- Franz M. (2018): LLUR Bericht BioHab: Erfassung von Flachwasser-Hartsubstratgemeinschaften (LRT „Riff“) und deren Sensitivität gegenüber Umweltstress Aktenzeichen: LLUR Az 0608.451426. 40 S.
- Franz, M., Barbosa, F., Hinrichsen, H-H., Lehmann, A., Scotti, M., Hiebenthal, C., Wahl, M. (2019a): Long-term records of hard-bottom communities in the southwestern Baltic Sea reveal the decline of a foundation species. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*. 219(242-251).
- Franz, M., Lieberum, C., Bock, G. and Karez R. (2019b): Environmental parameters of shallow water habitats in the SW Baltic Sea. *Earth Syst. Sci. Data*, 11, 947–957.
- Graiff, A., Liesner, D., Karsten, U., Bartsch, I. (2015) Temperature tolerance of western Baltic Sea *Fucus vesiculosus* – growth, photosynthesis and survival. *Journal of Experimental Marine Biology and Ecology* 471:8–16 DOI: 10.1016/j.jembe.2015.05.009
- Gräwe, U., R. Friedland, and H. Burchard (2013): The future of the western Baltic Sea: Two possible scenarios. *Ocean Dyn.* 63: 901–921. doi:10.1007/s10236-013-0634-0
- Gröger, M., Arneborg, L., Dieterich, C., Höglund, A. and Meier, H. E. M. (2019): Summer hydrographic changes in the Baltic Sea, Kattegat and Skagerrak projected in an ensemble of climate scenarios downscaled with a coupled regional ocean–sea ice–atmosphere model. *Climate Dynamics*. 53:5945–5966.
- HELCOM (2013): Climate change in the Baltic Sea Area. HELCOM thematic assessment in 2013. *Baltic Sea Environment Proceedings* No. 137. Helsinki Commission. 70 S.
- Hiebenthal, C., N. Blöcher, J. Krause und H. Rumohr (2012) Steckbriefe der Lebensraumtypen / Biotope ("Ästuarien", "Küstenlagunen", "Flache große Meeresarme und -buchten (Flachwasserzonen)", "Vegetationsfreies Schlick-, Sand- und Mischwatt", "Sandbänke mit nur schwacher ständiger Überspülung", "Riffe", "Seegrasswiesen", "Makrophytenbestände", "Miesmuschelbänke", "Seefedern und Grabende Megafauna", "Sabellaria-Riffe", "Schillgründe", "Kiesgründe mit *Ophelia*-Arten" und "Küstenfernes Tiefenwasser unterhalb der Halokline"). In: Ingo Narberhaus, Jochen Krause und Ulrike Bernitt (Bearb.), *Bedrohte Biodiversität in der deutschen Nord- und Ostsee - Empfindlichkeiten gegenüber anthropogenen Nutzungen und den Effekten des Klimawandels*. *Naturschutz und Biologische Vielfalt* 116, Bonn-Bad Godesberg, Bundesamt für Naturschutz. S. 43-221.
- Hinrichsen HH., von Dewitz B., Dierking J. (2018): Variability of advective connectivity in the Baltic Sea. *Journal of Marine Systems* 186:115-122. DOI: 10.1016/j.jmarsys.2018.06.010

- International Energy Agency IEA (2019): Global Energy & CO2 Status Report 2018: The latest trends in energy and emissions in 2018. IEA Publications 27 S.
- Interwies, E., Angeli, D., Bertram, C., Dworak, T., Friedrich, R., Görlitz, S., Hiebenthal, C., Kugler, U., Meyerhoff, J., Preiss, P., Rumohr, H., Reumann-Schwichtenberg, J., Rehdanz, K., (2012): Methodische Grundlagen für sozio-ökonomische Analysen sowie Folgenabschätzungen von Maßnahmen einschließlich Kosten-Nutzen Analysen nach EG-Meeressstrategie-Rahmenrichtlinie (MSRL): Abschlussbericht an das Umweltbundesamt (Förderkennzeichen (UFOPLAN) 3710 25 202). Unter der Leitung von: InterSus Sustainability Services, Berlin. 453 S.
- IPCC (2019): “Changing Ocean, Marine Ecosystems, and Dependent Communities“ Special Report: Special Report on the Ocean and Cryosphere in a Changing Climate. 198 S.
- Knöbel, L., Nascimento-Schulz, J.C., Sanders, T., Zeus, D., Thomsen, J., Hiebenthal, C., Barboza, F.R., Stuckas, H. and Melzner, F. (in review): "Allele shift under laboratory selection and local adaptation to low salinity in Baltic Sea mytilid mussel larvae".
- Laffoley, D. & Baxter, J. M. (2016): Explaining ocean warming: Causes, scale, effects and consequences. Full report. Gland, Switzerland: IUCN. 456 S.
- Laffoley, D., and J. M. Baxter (2018): Ocean connections. An introduction to rising risks from a warming, changing ocean. IUCN. 38 S. doi:10.2305/IUCN.CH.2018.09.en
- Loreau, M. et al. (2001): Biodiversity and ecosystem functioning: Current knowledge and future challenges. *Science*, 294:804-808.
- McGrady-Steed, J. et al. (1997): Biodiversity regulates ecosystem predictability. *Nature*, 390(6656):162-165.
- Meier, H. E. M., Hordoir, R., Andersson, H. C., Dieterich, C., Eilola, K., Gustafsson, B. G., Höglund, A., Schimanke, S. (2012): Modeling the combined impact of changing climate and changing nutrient loads on the Baltic Sea environment in an ensemble of transient simulations for 1961 — 2099. *Climate Dynamics*, 39, 2421-2441.
- Melzner, F., J. Thomsen, W. Koeve, A. Oschlies, M. Gutowska, H. Bange, H. Hansen, and A. Körtzinger (2013): Future ocean acidification will be amplified by hypoxia in coastal habitats. *Mar. Biol.* 160: 1875–1888. doi:10.1007/s00227-012-1954-1
- Meyer, T., Berg, T. & Fürhaupter, K. (2008): Ostsee-Makrozoobenthos-Klassifizierungssystem für die Wasserrahmenrichtlinie. Referenz-Artenlisten, Bewertungsmodell und Monitoring. MariLim, Schönkirchen: 131 S.
- Meyer, T., Reincke, T., Fürhaupter, K. & Krause, S. (2005): Ostsee-Makrozoobenthos-Klassifizierungssystem für die Wasserrahmenrichtlinie. Bericht im Auftrag des Landesamtes für Natur und Umwelt des Landes Schleswig-Holstein (LANU). Flintbek: 73 S.
- Mooney, H. A. et al. (1995): Biodiversity and ecosystem functioning: Basic principles. In: Global Biodiversity Assessment, Eds. Heywood, V. H. & Watson, R. T., Cambridge: Cambridge Univ. Press, pp. 279-325.
- Naeem, S. et al. (1994): Declining biodiversity can alter the performance of ecosystems. *Nature*, 368(6473):734-737.
- Pansch, C., Scotti, M., Barboza, F. R., Al-Janabi, B., Brakel, J., Briski, E., Buchholz, B., Franz, M., Ito, M., Paiva, F., Saha, M., Sawall, Y., Weinberger, F. and Wahl, M. (2018): Heat waves and their significance for a temperate benthic community: A near-natural experimental approach. *Glob. Chang. Biol.* 24: 4357–4367. doi:10.1111/gcb.14282

- Pansch C. and Hiebenthal C. (2019): A new mesocosms system to study the effects of environmental variability on marine species and communities. *Limnology & Oceanography: Methods* 17, 2019, 145–162. DOI: 10.1002/lom3.10306
- Pfaff, M. C., Hiebenthal, C., Molis, M., Branch, G. M. & Wahl, M. (2010): Patterns of diversity along experimental gradients of disturbance and nutrient supply - the confounding assumptions of the Intermediate Disturbance Hypothesis. *African Journal of Marine Science* 32(1): 127-135.
- Reimers, H. C. (2005): Typologie der Küstengewässer der Nord- und Ostsee. In: P. Feldens (Bearb.): *Typologie, Bewertung, Management von Oberflächengewässern*. *Limnologie aktuell* Band 11. Stuttgart (Schweizerbart): 37-45.
- Schories, D., Selig, U. & Schubert, H. (2006): Testung des Klassifizierungsansatzes Mecklenburg-Vorpommern (innere Küstengewässer) unter den Bedingungen Schleswig-Holsteins und Ausdehnung des Ansatzes auf die Außenküste. *Küstengewässer-Klassifizierung deutsche Ostsee nach EU-WRRL. Teil A: Äußere Küstengewässer*. Stand 16.3.2006. 187 S.
- Schubert, H., C. Blümel, Eggert, A., Rieling, T., Schubert, M. & Selig, U. (2003): Entwicklung von leitbildorientierten Bewertungsgrundlagen für innere Küstengewässer der deutschen Ostseeküste nach der EU-WRRL (Förderkennzeichen. 0330014). *FORSCHUNGSBERICHT zum BMBF Projekt ELBO*. UNIVERSITÄT ROSTOCK Institut für Aquatische Ökologie, Rostock: 183 S.
- Selig, U., Marquardt, R. & Porsche, C. (2008): Vorläufige Handlungsanweisung zur Erfassung der Angiospermen der Deutschen Ostseeküste - Bewertung entsprechend der Vorgaben der EU-Wasserrahmenrichtlinie. Stand: 28.4.2008. Bericht für das LUNG-MV. 21 S.
- Stuckas, H., Knöbel, L., Schade, H., Breusing, C., Hinrichsen, H. H., Bartel, M., Langguth, K. and Melzner, F. (2017) Combining hydrodynamic modelling with genetics: can passive larval drift shape the genetic structure of Baltic *Mytilus* populations?. *Molecular Ecology*, 26 (10). pp. 2765-2782. DOI 10.1111/mec.14075.
- Theede, H., Ponat, A., Hiroki, K. and Schlieper, C. (1969): Studies on the resistance of marine bottom invertebrates to oxygen-deficiency and hydrogen sulphide. *Marine Biology* 2(4): 325-337.
- Thomsen, J., M.A. Gutowska, J. Saphörster, A. Heinemann, K. Trübenbach, J. Fietzke, C. Hiebenthal, A. Eisenhauer, A. Körtzinger, M. Wahl, and F. Melzner. (2010). Calcifying invertebrates succeed in a naturally CO₂-rich coastal habitat but are threatened by high levels of future acidification. *Biogeosciences* 7: 3879-3891.
- Thomsen, J., Ramesh, K. , Sanders, T. , Bleich, M. and Melzner, F. (2018) Calcification in a marginal sea - influence of seawater [Ca²⁺] and carbonate chemistry on bivalve shell formation. *Open Access Biogeosciences (BG)*, 15 . pp. 1469-1482. DOI 10.5194/bg-15-1469-2018.
- Tilman, D. & Downing, J. A. (1994): Biodiversity and stability in grasslands. *Nature*, 367(6461):363-365
- Umweltbundesamt (2019): *Monitoringbericht 2019 zur Deutschen Anpassungsstrategie an den Klimawandel*. Bericht der interministeriellen Arbeitsgruppe Anpassungsstrategie der Bundesregierung. Umweltbundesamt. 276 S.
- Wahl M, Hinrichsen, H-H, Lehmann A, Lenz M (2013): Natural variability in hard-bottom communities and possible drivers assessed by a time-series study in the SW Baltic Sea: know the noise to detect the change. *BIOGEOSCIENCES* 10(7): 5227-5242.

- Wahl, M. , Molis, M., Hobday, A. J., Dudgeon, S., Neumann, R., Steinberg, P., Campbell, A. H., Marzinelli, E. and Connell, S. (2015) The responses of brown macroalgae to environmental change from local to global scales: direct versus ecologically mediated effects. *Open Access Perspectives in Phycology*, 2 (1). pp. 11-29. DOI 10.1127/pip/2015/0019.
- Wahl, M., Werner, F. J., Buchholz, B., Raddatz, S., Graiff, A., Matthiessen, B., Karsten, U., Hiebenthal, C., Hamer, J., Ito, M., Gülzow, E., Rilov, G. and Guy-Haim T. (2019): Season affects strength and direction of ocean warming impacts and biotic stress modulation in a coastal seaweed ecosystem. *Limnology & Oceanography*. DOI: 10.1002/lno.11350.
- Weber v., M. (2005): Ergebnisse der Bestandsaufnahme 2004 zur Umsetzung der Europäischen Wasserrahmenrichtlinie (WRRL) in den Küstengewässern Mecklenburg-Vorpommerns
- Results of the status quo analysis 2004 for the implementation of the Water Framework Directive (WFD) in the Mecklenburg-Western Pomeranian coastal waters. Rostock. *Meeresbiolog. Beitr.* 14: 7-15.
- Weinberger, F., Buchholz, B., Karez, R. & Wahl, M. (2008): The invasive red alga *Gracilaria vermiculophylla* in the Baltic Sea: adaptation to brackish water may compensate for light limitation. – *Aquat. Biol.* 3: 251–264.
- Weinberger, F., Rohde, S., Oschmann, Y., Shahnaz, L., Dobretsov, S. & Wahl, M. (2011): Effects of limitation stress and of disruptive stress on induced antigrazing defense in the bladder-wrack *Fucus vesiculosus*. – *Mar. Ecol. Prog. Ser.* 427: 83–94.
- Whittaker, R. H. (1972): Evolution and measurement of species diversity. *Taxon*, 21:213-251.