

1. Abstrakt

Das Ökosystem „Wattenmeer“, wie es an der deutschen Nordseeküste vorzufinden ist, ist in seiner Bedeutung für Zugvögel, seiner Artenzusammensetzung und Organisation einzigartig. Dieses momentan vorherrschende Gleichgewicht könnte durch die CO₂-bedingte Ozeanversauerung in Gefahr geraten, da einzelne Meeresorganismen mit Kalkschalen oder Kalkskelett beschädigt werden könnten. Dadurch könnten Nahrungsnetze durch Artensterben verschoben werden, und es würde zu einer völlig neuen Strukturierung kommen, wie sie bisher noch nicht im Laufe der Entstehung des Wattenmeeres vorzufinden war. Durch die Industrialisierung und das menschliche Verhalten steigen die CO₂-Emissionen. Da die Meere einen Teil des Kohlendioxids aufnehmen, sinkt der pH-Wert des Wassers, was man als Ozeanversauerung bezeichnet. Die im Meer dominierend vorkommenden Kalkschalentiere wie z.B. Korallen und Muscheln brauchen jedoch einen ganz bestimmten pH-Wert und Karbonat-Ionen-Anteil im Wasser, um ihre schützende Schale bzw. ihr Skelett aufbauen zu können. Durch die von Menschenhand verursachte Ozeanversauerung wird aber genau dieser natürliche Entwicklungsvorgang der Kalkschalentiere beeinträchtigt und zum Teil komplett zerstört. Um diese Auswirkungen untersuchen zu können, wurden im Zusammenhang mit Vorversuchen die Schalen einzelner Kalkschalentiere in saurem bis normalem Seewasser inkubiert und zwischenzeitlich gewogen, um eine Abnahme der Schalenmasse feststellen zu können. Außerdem wurde ein modellhaftes Nahrungsnetz erstellt und so verändert, wie es eventuell im Falle einer verstärkten Versauerung der Ozeane eintreten könnte. Die Ergebnisse zeigten, dass mit sinkendem pH-Wert die Kalkschalen der untersuchten Tiere an Masse verloren. Übertragen auf das System des Wattenmeeres würde diese Abnahme der Schalenmasse verheerende Auswirkungen bedeuten, da das Ökosystem mit all seinen Komponenten komplett verschoben werden würden. Man kann also sagen, dass sowohl das Tier im Einzelnen als auch das System durch die CO₂-bedingte Ozeanversauerung beeinträchtigt werden wird.

2. Einleitung

Das Wattenmeer- ein für an der Nordseeküste lebende Menschen und Tiere unverzichtbarer Lebensraum. Wird jedoch dieser mit 8000 Jahren noch sehr junge und ursprüngliche Lebensraum (Wilhelmsen *et al.*, 2011) durch die von Menschen verursachte Ozeanversauerung bedroht? Dieser Frage soll in dem vorliegendem Projekt mit Hilfe einer auf Vorversuchen basierenden Versuchsreihe nachgegangen werden. Doch was genau ist das Wattenmeer eigentlich?

2.1 Das Wattenmeer

Das Wattenmeer, wie der Übergangsbereich zwischen Land und Meer an der deutschen Nordseeküste genannt wird, ist als eigenes Ökosystem in seiner biologischen Bedeutung in Europa einzigartig (Landesamt für den Nationalpark Schleswig-Holsteinisches Wattenmeer, 1998).

Das Weltnaturerbe Watt wird auch als sehr nahrungsreicher Lebensraum bezeichnet (Stock *et al.*, 2007). Das Wattenmeer erstreckt sich von dem niederländischen „Den Helder“ im Westen bis zum dänischen „Esbjerg“ im Norden (Abb. 2.1). Die deutsche Bucht wird vom Wattenmeer auf einer Strecke von etwa 450 km und in einer Breite von 7 bis 10 km, maximal 25 km umrundet (Stock *et al.*, 2007). Insgesamt hat das Wattenmeer also eine Fläche von etwa 10 000 km² (Wilhelmsen *et al.* 2011), wovon etwa die Hälfte mit dem Tidenwechsel trocken fällt (Krauss, 2011).



Abb. 2.1: Die deutsche Nordseeküste, die gelbe Farbe markiert die Fläche des Wattenmeeres (Delvaux de Fenffe, 2013)

2.2 Tiere im Wattenmeer

Die biologische Artenzusammensetzung im Ökosystems des Wattenmeeres ist einzigartig. So finden sich auf einen Quadratmeter Wattboden im Sediment bis zu 40 Wattwürmer, 130 Herzmuscheln, 620 Seeringelwürmer und 30 000 Schlickkrebse (Krauss, 2011). Abbildung 2.2 veranschaulicht diese Artenzusammensetzung modellhaft.



Abb. 2.2: Wattwürfel (Seidel, 2012)

Trotzdem kann man sagen, dass das Wattenmeer aufgrund seiner extremen Lebensbedingungen vergleichsweise artenarm ist. Das macht das Watt entsprechend empfindlich, da die Tiere maßgebend zur Ökologie des Wattenmeeres beitragen (Nationalpark-Zentrum Cuxhaven, 1992).

Die im Watt lebenden Tiere sind Nahrungsgrundlage für etwa 50 Vogelarten, die mehrere Monate im Jahr im Wattenmeer zu beobachten sind (Krauss, 2011). Diese Vögel, es können mehr als zehn Millionen im Jahr werden (Krauss, 2011), nennt man Zugvögel. 2,5 bis 3 Millionen Vögel rasten in der Hauptzugzeit gleichzeitig. Außerdem bietet das Watt Platz zum Brüten, Rasten, Übersommern, Überwintern und Mausern (Jedicke, 1991). Aufgrund der immensen Bedeutung des Wattenmeeres für viele Tiere, besonders für die Zugvögel

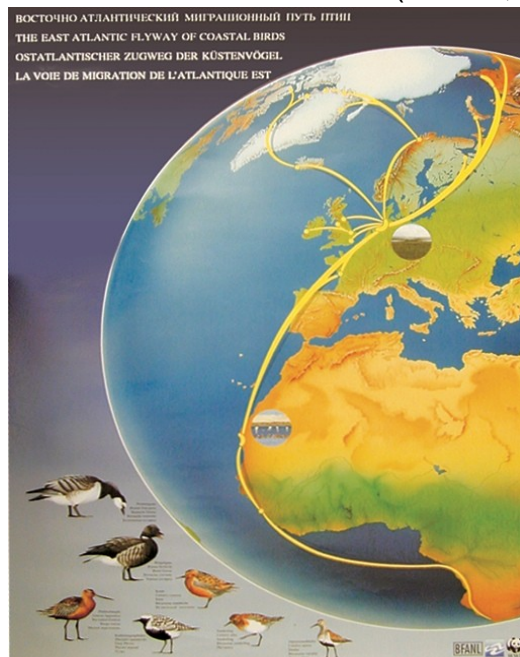


Abb.2.3: Ostatlantischer Vogelzug (o.V.³, 2009)

(Landesamt für den Nationalpark Schleswig-Holsteinisches Wattenmeer, 1998), stellt sich die Frage, wie sich eine durch den Menschen verursachte Ozeanversauerung auf dieses Ökosystem auswirkt. Da das Watt als Nahrungs- und Brutplatz für viele Zugvögel dient, würde eine ernsthafte Schädigung des Wattenmeeres dutzende dieser Vogelarten bedrohen und Verluste in der globalen Artenvielfalt auslösen (Wilhelmsen *et al.*, 2011). Kalkschalentiere würden von der Versauerung der Meere betroffen (Hahn², 2013), und den Vögeln würde eine Nahrungsgrundlage fehlen.

2.3 Ozeanversauerung

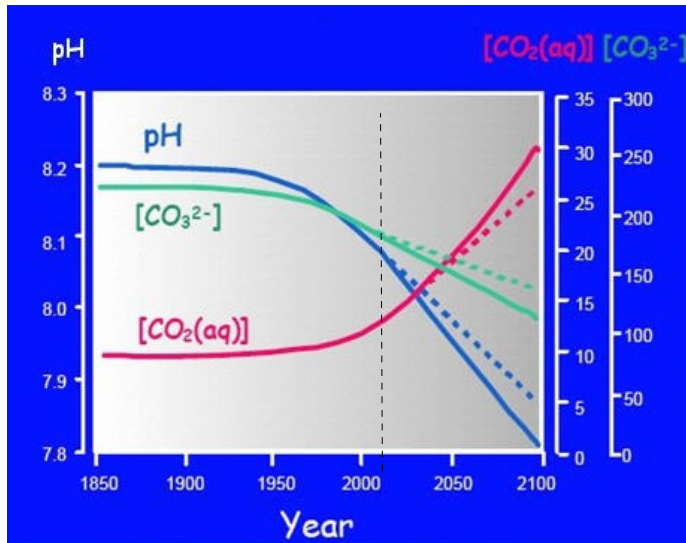
Um den Begriff „Ozeanversauerung“ zu verstehen, sollten zwei wichtige beteiligte Reaktionen genannt werden. Die sogenannte „Ozeanversauerung“ (pH bewegt sich noch im alkalischen Bereich) ist Folge eines durch menschliche Emissionen erhöhten Kohlenstoffdioxid-Gehalts (CO₂) in der Atmosphäre. Die Ozeane nehmen diesen auf, da an der Meeresoberfläche das Wasser mit der Atmosphäre im ständigem Gasaustausch steht (Brosin, 1985). Reagieren nun Kohlendioxid und Wasser miteinander, entsteht Kohlensäure. Diese Kohlensäure setzt unter anderem Wasserstoff-Ionen (H⁺-Ionen) frei. Wasserstoff-Ionen haben zur Eigenschaft, dass sie das Wasser sauer werden lassen, indem der pH-Wert durch die erhöhte Anzahl der H⁺-Ionen sinkt. Säure greift Kalk an, weshalb viele im Meer lebende Organismen mit einem Exoskelett oder einer Kalkschale davon beeinflusst werden dürften (Hahn², 2013).

Außerdem brauchen genannte Organismen Karbonat-Ionen, um ihre Kalkschale bzw. ihr Skelett aufbauen zu können. Diese Karbonat-Ionen kommen natürlicherweise in den Meeren vor. Reagieren jedoch CO₂, Wasser und die Karbonat-Ionen, entstehen Hydrogenkarbonat-Ionen (HCO₃⁻-Ionen), und die Anzahl der Karbonat-Ionen sinkt. Somit fehlt den Meeresbewohnern eine Grundlage, ihre Schale und damit ihren Schutz aufrecht zu erhalten (s. Anhang, Abb. 8.1).

2.4 Prognose der Ozeanversauerung

Um einen Anhaltspunkt bezüglich der voranschreitenden Ozeanversauerung zu haben, wurde folgende Prognose gewählt, um darauf aufbauend die Versuchsreihe zu gestalten und die verschiedenen pH-Werte

auszuwählen.



Diese Prognose der Ozeanversauerung geht davon aus, dass bis zum nächsten Jahrhundert der pH-Wert der Ozeane mit steigendem Anteil von in Wasser gelöstem Kohlendioxid auf 7,8 sinken wird (Abb. 2.4).

Abb. 2.4: Prognose der Ozeanversauerung (Müller-Jung, 2009, die gestrichelte Linie kennzeichnet das Jahr 2014)

Momentan liegt der normale Durchschnittswert des Nordseewassers bei etwa 8,1 (Hahn², 2013). Regionale Abweichungen sind jedoch möglich, da Faktoren wie die Temperatur, Salzgehalt oder Süßwassereinflüsse von Flüssen den pH-Wert beeinflussen können.

2.5 Vorversuche

Im Zeitraum vom 12.07. - 23.08.2013 wurde im Rahmen des Meereswettbewerb eine Versuchsreihe im Alfred-Wegener-Institut in Bremerhaven durchgeführt (Hahn², 2013). Hierbei wurden Seepocken bei einer Segelexkursion aus ihrem natürlichem Lebensraum von Helgoland entnommen. Die Tiere wurden über sechs Wochen in drei verschiedenen pH-Werten gehalten, um die Auswirkungen der Ozeanversauerung auf Meerestiere am Beispiel der Seepocken zu untersuchen. Die Tiere wurden in einem Becken mit dem pH-Wert 7,1 gehalten, was eine extremes Beispiel der Ozeanversauerung darstellen sollte. Außerdem wurde der pH-Wert 7,6 gewählt, was die zu erwartende Ozeanversauerung in ca. 100 Jahren simulierte (Müller-Jung, 2009). Um eine Kontrolle gegenüber den veränderten pH-Werten zu haben, wurde zusätzlich ein Kontrollbecken mit dem pH-Wert 8,1, dem gemessenen pH-Wert von Helgoland (Hahn², 2013), eingerichtet. Genauere Untersuchungen der Schalenmasse und des Fressverhaltens der Seepocke sowie der Kalkschalenstruktur ergaben, dass die Seepocken von den Veränderungen der pH-Werte vielseitig beeinflusst

wurden. Diese Ergebnisse gaben Anlass, weitere Faktoren und eine größere Bandbreite an kalkbildenden Arten aus dem Watt zu untersuchen.

2.6 Versuche mit Kalkschalen verschiedener Tierarten

Anknüpfend an die Vorversuche sollten nun die Schalen einzelner Wattbewohner untersucht werden, jedoch ohne das Tier. Diese Schalen wurden in vier verschiedenen pH-Werten inkubiert und mehrmals gewogen, um eine Abnahme der Schalenmasse feststellen zu können. Auf Grundlage der Ergebnisse wurde zusätzlich ein Nahrungsnetz erstellt und so verändert, wie die Ozeanversauerung es bewirken könnte. Die pH-Spanne war der der Vorversuche ähnlich (pH 7.1, 7.6, 8.1), es wurde zusätzlich der pH-Wert 4 untersucht, um die Auswirkungen einer Säure auf die Kalkschalen zu untersuchen.

2.7 Fragestellungen

Unter folgenden leitenden Fragestellungen wurde die vorliegende Arbeit und ihre Ergebnisse ausgewertet:

- Haben stärkere pH-Senkungen größere Einflüsse auf die Schale?
- Wie verschiebt sich das Nahrungsnetz zwischen Kalkschalentier und Wattvogel, wenn Organismen aus dem Watt durch die Ozeanversauerung betroffen werden, und welche Auswirkungen hätte dies?
- Wie wirkt sich ein erhöhter CO₂-Gehalt, und die damit ausgelöste Ozeanversauerung auf einzelne Tiere und systemökologisch übertragen auf das Watt aus?

3. Material und Methoden

Um zu untersuchen, wie sich ein erniedrigeter pH-Wert auf die Kalkschale verschiedener Kalkschalentiere auswirkt, wurde folgender Versuch entwickelt.

3.1 pH-Werte

Über zehn Wochen wurden die Schalen einiger Watttiere in vier verschiedenen pH-Werten inkubiert. Hierbei wurde eine pH-Spanne von 4-8.1 gewählt. Die pH-Werte 4, 7.1, 7.6 und 8.1 wurden mit Salzsäure (HCl) eingestellt, um keine Fremdionen einzufügen. Der pH-Wert 4 sollte ein in

den nächsten Jahrhunderten nicht zu erwartendes Beispiel darstellen. Trotzdem ist es interessant, die Auswirkungen einer Säure auf Kalkschalen zu untersuchen, da es sich bei der Ozeanversauerung noch nicht um eine Säure handelt. Der pH-Wert 7.1 stellt die stark vorangeschrittene Ozeanversauerung dar, 7.6 ist der zurzeit messbare Wert des Cuxhavener Seewassers und 8.1 ist der gemessene pH-Wert von Helgoland (Hahn², 2013).

Um der vorherigen Versuchsreihe gerecht zu werden und den Schalen keinen zusätzlichen Stressfaktor zu bieten, wurden zusätzlich die gleichen Salinitätswerte von Cuxhaven eingestellt. Die Vorversuche hatten ergeben, dass der Salzgehalt in Cuxhaven bei etwa 16 ‰ lag (Hahn², 2013).

3.2 Die Versuchstierarten

Als Versuchstiere wurden die Seepocken (*Balanus spec.*) aus dem vorherigen Versuch verwendet. Diese wurden von Platten entnommen, die im Cuxhavener Segelhafen angebracht wurden. Außerdem wurde die Plattmuschel (*Macoma baltica*) verwendet, da auch schon mit diesem Tier Vorversuche stattfanden (Hahn¹, 2013). Als weiteres Versuchstier diente die Miesmuschel (*Mytilus edulis*). Diese besitzt auch eine Kalkschale und war wegen ihrer Bedeutung im Ökosystem Watt interessant zu untersuchen. Die in großer Anzahl zu findenden Herzmuschel (*Cerastoderma edule*) wurde zusätzlich gewählt, da sich die Frage stellte, welche Auswirkungen es haben würde, wenn die in Cuxhaven häufig vorkommende Muschel in dem Gleichgewicht des Wattenmeeres aufgrund der Ozeanversauerung Schaden annehmen würde.

Ausgenommen der Seepocken wurden alle Tiere am 20.11.2013 dem angrenzenden Watt von Cuxhaven / Döse entnommen.

3.3 Die Versuchsbehälter

Die Schalen der Tiere wurden für zehn Wochen in Bechergläsern inkubiert (vgl. Abb. 3.1). Um die Verschmutzung möglichst gering zu halten, wurde das Seewasser mit entionisiertem Wasser und Meersalz (Tropic Marin, Wartenberg, Deutschland) selbst angesetzt.

Jeweils zu Beginn und am Ende der Versuchsreihe wurde jede Schale mit einer Feinwaage (Sartorius, Bremerhaven, Deutschland) gewogen, um eine

Schalenabnahme erkennen zu können. Sowohl Salinitätswerte als auch die pH-Werte wurden wöchentlich mit einem schuleigenen Messgerät (Sartorius, Göttingen, Deutschland) kontrolliert und bei Bedarf nachgebessert.

Abb. 3.1: Übersicht der inkubierten Schalen verschiedener Tiere aus dem Watt bei verschiedenen pH-Werten

pH 4	pH 7,1	pH 7,6	pH 8,1
3 See-pocken	3 See-pocken	3 See-pocken	3 See-pocken
1 Mies-muschel	1 Mies-muschel	1 Mies-muschel	1 Mies-muschel
3 Herz-muscheln	3 Herz-muscheln	3 Herz-muscheln	3 Herz-muscheln
3 Platt-muscheln	3 Platt-muscheln	3 Platt-muscheln	3 Platt-muscheln

Am Ende der Versuchsreihe wurden die Daten der Schalenmassen mathematisch ausgewertet und in einem Diagrammen dargestellt.

4. Ergebnisse

Die vorliegenden Ergebnisse beschäftigte sich mit den Auswirkungen der voranschreitenden Ozeanversauerung auf Kalkschalen verschiedener Tiere des Wattenmeeres.

4.1 Prozentuale Abnahme der Schalenmasse verschiedener Tiere

Die Schalen aus allen pH-Werten der vier verschiedenen Arten wurden im Laufe der Versuchsreihe mehrmals gewogen, um eine erwartete Abnahme der Schalenmasse bestätigen zu können. (s. Tabelle 8.2 / 8.3 im Anhang)

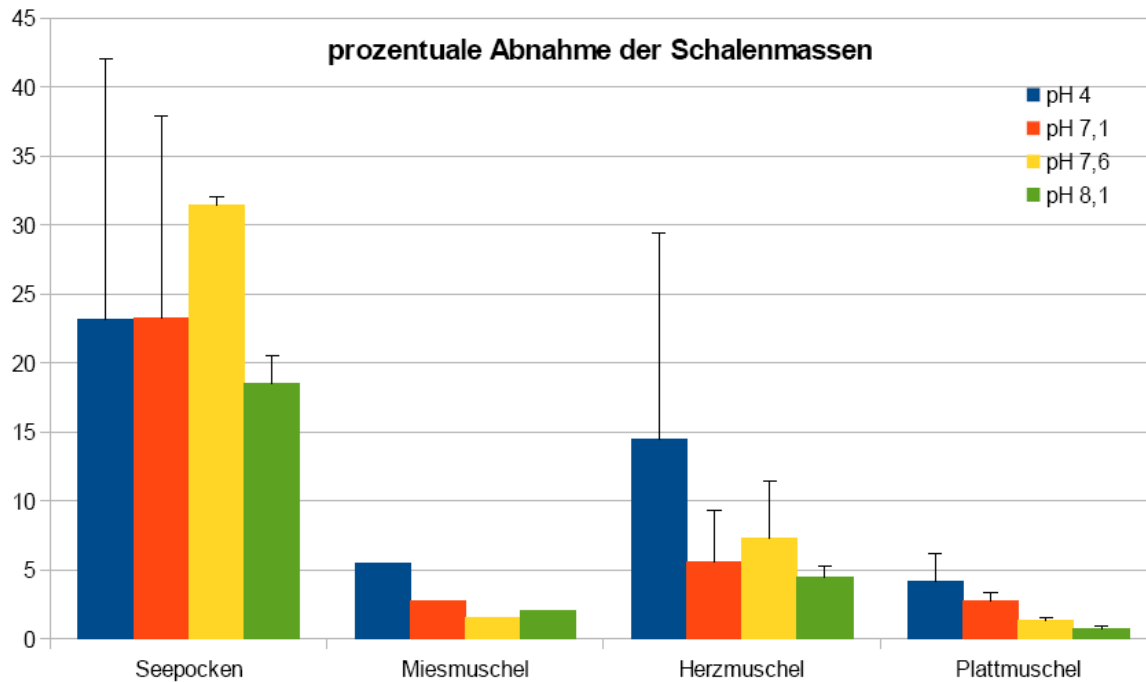


Abb. 4.1: Mathematische Auswertung der prozentualen Abnahme der Schalenmasse verschiedener Tierarten nach 10 Wochen bei unterschiedlichen pH-Werten, basierend auf einer Tabelle mit Messwerten des Wiegens (s. Anhang) MW \pm SD, n = 1-3

4.2 Seepockenschalen (*Balanus spec.*)

Schaut man sich zuerst die Seepocken an (Abb. 4.1), kann man klar sehen, dass diese die höchsten Verluste an Schalenmasse zu verzeichnen hatten. Die hohen Standardabweichungen bei pH 4 und 7,1 bestätigen diese Beobachtung. Bei pH 7,6 und 8,1 sind die individuellen Standardabweichungen dagegen relativ gering. Schaut man sich nun die Balken an, die die prozentuale Abnahme der Schalenmasse angeben, weicht der pH-Wert 7,6 aus der Reihe. Hier ist nicht wie zu Anfang vermutet, eine geringere Abnahme wie bei den pH-Werten 7,1 und 4 erkennbar. Mit einer Abnahme der Schalenmasse von etwa 32 Prozent liegt dieser Wert höher als alle anderen aus dem Diagramm. Dies ist mit der hohen Gefahr eines Messfehlers zu begründen. Die Seepocken mussten von ihrem natürlichen Untergrund entfernt werden, und sind dadurch in kleine Teile zerbrochen. Diese Teile mussten bei jedem Wiegen aus dem Becherglas genommen, gewogen und wieder zurück transportiert werden. Hierbei ist es möglich, dass eventuell ein Bruchstück im Laufe der Zeit trotz höchster Vorsicht verloren gegangen ist. Mit dieser hohen Verlustgefahr der kleinen

Bruchstücke kann man auch insgesamt die relativ hohe prozentuale Schalenmassenabnahme auch der Kontrolltiere der Seepocken begründen. Das Spektrum liegt bei 18 bis 32 Prozent, für die kleinen Schalen also sehr hohe Verluste. Allerdings bestätigen die Mittelwerte die zuvor aufgestellte Hypothese, dass mit sinkendem pH-Wert die Abnahme der Schalenmasse größer wird.

4.3 Miesmuschelschalen (*Mytilus edulis*)

Die Miesmuschel war als Versuchstier jeweils nur einmal in jedem untersuchtem pH-Wert vertreten. Daher sind die Ergebnisse (Abb. 4.1) unter dem folgendem Aspekt zu betrachten, dass individuelle Abweichungen der einzelnen Tiere und damit auch Schalen das Ergebnis geringfügig beeinflussen könnten. Aus diesem Grund konnte hier also keine Standardabweichung berechnet werden, da dafür mindestens drei Exemplare pro pH-Wert nötig gewesen wären, was jedoch aus organisatorischen Gründen in dieser Versuchsreihe nicht möglich war.

Trotz der geringen Stichprobenanzahl ist ein höhere Abnahme der Schalenmasse mit sinkendem pH-Wert erkennbar. Der pH-Wert 8,1 verzeichnet zwar eine sehr kleine Abweichung, die Abnahme der Schalenmasse ist also um etwa ein Prozent höher als die des pH-Wertes 7,6, ist aber mit der zuvor erwähnten individuellen Abweichung zu erklären. Außerdem ist die Abweichung nur extrem gering, liegt also noch in einem akzeptablen Schwankungsbereich. Die Miesmuschel scheint allgemein betrachtet nur eine geringe Abnahme ihrer Schalenmasse zu verzeichnen, der Schwankungsbereich liegt nur bei etwa drei bis sechs Prozent. Hinzuzufügen ist, dass beobachteten Ergebnisse nur Zufallsergebnisse sein könnten, obwohl die Auswertung eine Parallelität der Ergebnisse mit den anderen Tieren ergab.

4.4 Herzmuschelschalen (*Cerastoderma edule*)

Betrachtet man nun die mathematische Auswertung der Wiegeergebnisse der Herzmuschel (Abb.4.1), ist wie bei den Seepocken eine relativ hohe prozentuale Abnahme der Schalenmasse erkennbar. Außerdem fällt erneut der pH-Wert 7,6 aus der Reihe. Die Abweichung in diesem Bereich ist allerdings nicht annähernd so hoch wie sie bei den Seepocken verzeichnet

wurde. Abgesehen davon ist jedoch eine, wie zu Anfang vermutete, stufenweise Steigerung der prozentualen Abnahme der Schalenmasse zu sehen, wirklich deutliche Veränderungen sind jedoch erst ab pH 4 zu erkennen. Auch die berechneten Standardabweichungen spiegeln dies wider. Die Kalkschale der Herzmuschel scheint jedoch von einem erniedrigtem pH-Wert relativ stark beeinflusst zu werden, so beträgt die Spanne der Schalenmassenabnahme in etwa vier bis vierzehn Prozent.

4.5 Plattmuschelschalen (*Macoma baltica*)

Die Plattmuschel scheint wie die Miesmuschel nicht ganz so stark von einem erniedrigtem pH-Wert betroffen zu sein (Abb.4.1), die Abnahme der untersuchten Schalen liegt bei *Macoma baltica* bei nur etwa zwei bis vier Prozent. Auch wenn das Ausmaß der Beeinflussung gering ist, ist deutlich zu erkennen, dass mit sinkendem pH-Wert die prozentuale Abnahme der Schalenmasse steigt. Auch die Standardabweichungen belegen dies sehr deutlich.

4.6 Gesamtergebnis

Die Eingangshypothese, dass mit sinkendem pH-Wert die prozentuale Abnahme der Kalkschalenmasse steigt, wird durch die mathematische Auswertung (Abb. 4.1) bestätigt. Bis auf einige erklärbare Abweichungen werden die einzelnen Arten der Schalen von niedrigerem pH-Wert stärker beeinflusst als die Kontrollen.

5. Diskussion

Die vorliegende Facharbeit beschäftigt sich mit den Auswirkungen einer Versauerung der Ozeane auf das Ökosystem Wattenmeer

5.1 Kritische Auswertung der Ergebnisse

Da die gewonnenen Ergebnisse mit denen der vorangegangenen Versuchsreihe (Hahn², 2013) verglichen werden sollten, ergeben sich nun einige Faktoren, die kritisch zu betrachten sind. Da die Versuche, die im Rahmen des Meereswettbewerb geplant wurden, im Alfred-Wegener-Institut (AWI) in einem Temperatur-Konstantraum durchgeführt werden konnten, diese Versuchsreihe jedoch nur in der Schule, waren Differenzen aus organisatorischen Gründen unvermeidbar. So konnte die Temperatur im

Forschungsinstitut konstant auf etwa 10 °C eingestellt werden, und so eine Temperatur mit nur sehr geringen Schwankungen gewährleistet werden. Dies war in einem schulischen Rahmen nicht möglich, und so schwankte der Temperaturbereich stärker.

Außerdem sind die Seepockenschalen beim Abkratzen von ihrem Untergrund zerbrochen, und konnten also nicht wie im AWI vollständig untersucht werden. Dadurch entstand eine höhere Verlustgefahr einzelner Bruchstücke. Auch der pH-Wert wurde auf andere Art und Weise verändert. So wurde der pH-Wert in der vorherigen Versuchsreihe einerseits durch CO₂-Düngetabletten (Sera, Heinsberg, Deutschland) aus dem Aquarianer-Bedarf und andererseits durch Salzsäure verändert. In diesem Versuch wurden die pH-Werte nur durch Salzsäure verändert. Dies ist kritisch zu bewerten, da durch die CO₂-Tabletten die Anzahl der Karbonat-Ionen gesunken ist, die Tiere also weniger Karbonat-Ionen zur Verfügung hatten, um ihre Kalkschale auszubilden. Da in dieser Versuchsreihe kein CO₂ hinzugeführt wurde, war also die Anzahl der von Kalkschalentieren benötigten Karbonat-Ionen höher. Zu erwähnen ist noch, dass in dieser Versuchsreihe nur eine geringe Stichprobenanzahl von n=1 - 3 vorhanden war. Es wurde zwar darauf geachtet, in jedem pH-Wert eine gleichmäßige Größenverteilung vorzunehmen, doch natürlich war dies nicht zu hundert Prozent möglich, da individuelle Abweichungen jedes Exemplars eine exakte Größenverteilung erschwerten. Trotzdem wurde darauf geachtet, dass die Versuchsbedingungen möglichst ähnlich waren.

5.2 Diskussion der Ergebnisse

Schaut man sich die Auswertung des Diagramms (Abb. 4.1) an, dann lässt sich ganz klar sagen, dass die verschiedenen Kalkschalen der unterschiedlichen Meeresorganismen zwar unterschiedlich betroffen sind, jedoch alle eine Schalenabnahme erkennen lassen. Diese Abnahme der Schalenmasse nimmt in diesem Falle mit sinkendem pH-Wert zu. Das würde übertragen auf das Beispiel der Ozeanversauerung bedeuten, dass mit voranschreitender Ozeanversauerung Meeresorganismen wie die Untersuchten in ihrer Kalkschalenmasse beeinflusst werden. In diesem Falle würde *Macoma baltica* am wenigsten an Kalkschalenmasse verlieren.

Trotzdem wird sie in ihrer natürlichen Entwicklung extrem gestört, wie Vorversuche mit der Plattmuschel ergaben (Hahn¹, 2013). Hier starben die Muscheln durch den gesenkten pH-Wert. Dies würde also bedeuten, dass andere Stoffwechselvorgänge der Plattmuschel durch die Ozeanversauerung beeinflusst werden würden. Die Seepocke wurde ebenfalls in Vorversuchen untersucht (Hahn², 2013). Die Ergebnisse aus der vorangegangenen Versuchsreihe wurden erneut bestätigt, da sich eine starke Abnahme der Schalenmasse bemerkbar machte. Auch die Herzmuschel verlor viel an ihrer Kalkschalenmasse, was bedeuten würde, dass auch *Cerastoderma edule* von einer voranschreitenden Ozeanversauerung stark betroffen sein würde. Da die Miesmuschel nur mit jeweils einem Exemplar vertreten war, ist dieses Ergebnis ein wenig ungenau und müsste in weiteren Versuchsreihen untersucht werden. Trotzdem kann man sagen, dass mit sinkendem pH die Miesmuschel in ihrer Kalkschale beeinflusst wurde, was sich mit einer höheren Abnahme der Schalenmasse bei sinkendem pH-Wert widerspiegelt. Alles in allem kann man also sagen, dass die Versuchsreihe die zuvor gewonnenen Ergebnisse (Hahn¹⁺², 2013) unterstützen. Durch die CO₂-bedingte, stetig voranschreitende Ozeanversauerung und damit einem niedrigerem pH-Wert des Ozeanwassers werden die Meeresorganismen zunehmend in verschiedenen Entwicklungs- und Stoffwechselvorgängen beeinflusst.

5. Nahrungsnetze

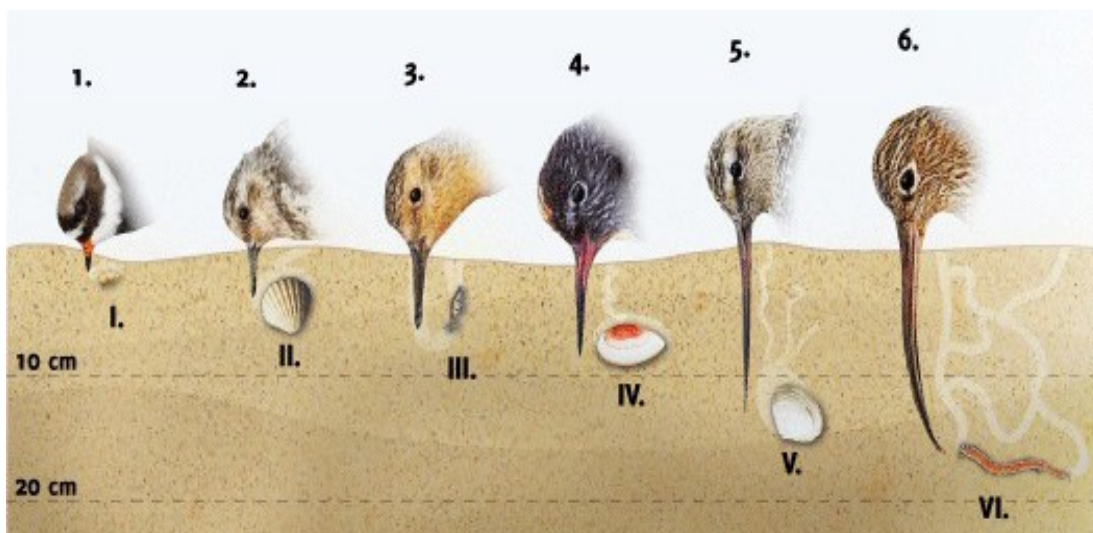


Abb. 5.1 Vermeidung der Nahrungskonkurrenz durch Ausbildung biologischer Nischen (o.V.¹, 2011) (Wattvögel: 1. Sandregenpfeifer (*Charadrius hiaticula*), 2. Sanderling (*Calidris alba*), 3. Knutt (*Calidris canutus*), 4. Rotschenkel (*Tringa totanus*), 5. Pfuhschnepfe (*Limosa lapponica*), 6. Großer Brachvogel (*Numenius arquata*); Weichbodentiere: I. Wattschnecke (*Hydrobia ulvae*), II. Herzmuschel (*Cerastoderma edule*), III. Schlickkrebs (*Corophium volutator*), IV. Baltische Plattmuschel (*Macoma baltica*), V. Große Pfeffermuschel (*Scobicularia plana*), VI. Schillernder Seeringelwurm (*Nereis diversicolor*)

Abbildung 5.1 zeigt eine sehr vereinfachte Modellvorstellung verschiedener Wattvögel und einigen bodenlebenden Tieren. Auffallend ist, wie abhängig der Wattvogel von seiner Schnabellänge ist. Im Laufe der Evolution ist es zu einer besonderen Anpasstheit und zu einer Ausbildung biologischer Nischen gekommen (Kasper, 2007). Dadurch wurde ein Konkurrenzausschluss-Prinzip gebildet. Das bedeutet, dass es zu einer Konkurrenzvermeidung kommt, da sonst zwei konkurrierende Arten auf Dauer nicht nebeneinander leben können. Eine der beiden Arten würde sich durchsetzen, während es zu einem Aussterben oder Abwandern der benachteiligten Art kommen würde. Da die Ergebnisse nun deutlich zeigten, dass die Kalkschale einiger Meereslebewesen durch einen erniedrigten pH-Wert beeinflusst würde, kann man vermuten, dass bei voranschreitender Ozeanversauerung ein Nahrungsnetz und somit die biologischen Nischen verschoben werden würden. Um dies zu untersuchen, wurde folgendes vereinfachtes Nahrungsnetz zwischen Wattvögeln, bodenlebenden Wirbellosen und Plankton erstellt.

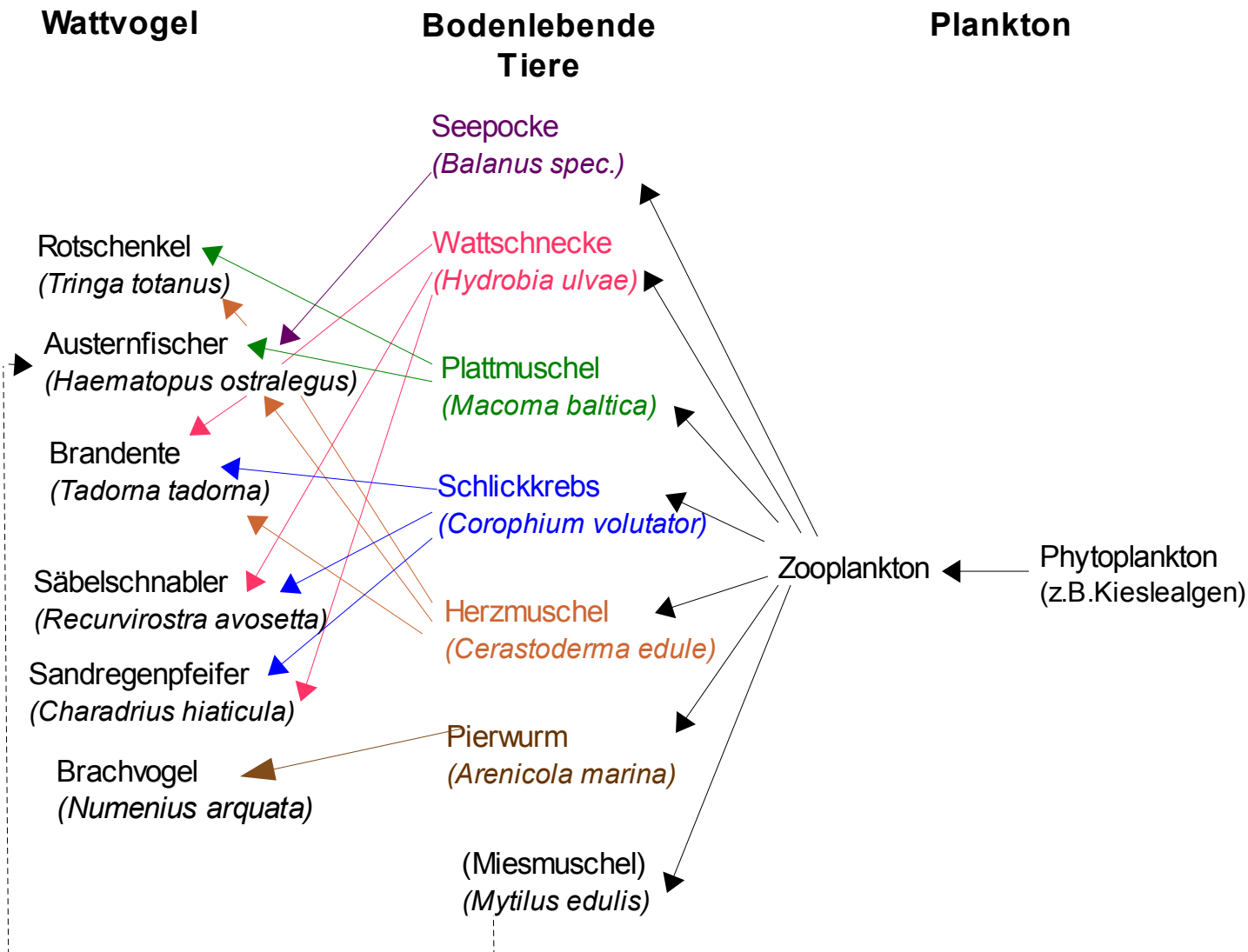


Abb. 5.2: Nach Kasper (2007) erstelltes, vereinfachtes Nahrungsnetz. (normaler Pfeil: „wird gefressen von“; schwarzer gestrichelter Pfeil der Miesmuschel: ist gesondert zu betrachten)

Dieses Nahrungsnetz (Abb. 5.2) zeigt, dass sowohl Phytoplankton als auch Zooplankton eine sehr wichtige Nahrungsgrundlage für das gesamte Ökosystem des Wattenmeeres sind. Als nächstes stehen einige bodenlebende Meerestiere in der Nahrungskette, deren nächster Feind verschiedene Wattvögel sind. Die Miesmuschel kann in diesem Fall nur gesondert betrachtet werden, da diese in Miesmuschelbänken wächst, die in dem Gesamtökosystem ihr eigenes kleines Ökosystem bilden.

Um nun die systemökologischen Auswirkungen der Ozeanversauerung zu betrachten, wurde das erstellte Nahrungsnetz (Ab. 5.2) verändert, wie es eventuell bei vorangeschrittener Ozeanversauerung herrschen könnte (Abb. 5.3). Hierbei handelt es sich jedoch nur um eine Theorie, die vielen

Einflussfaktoren unterliegt. Trotzdem kann man sagen, dass die betrachteten Folgen jedes einzelnen Tieres übertragbar auf das ganze System des Wattenmeeres sind.

Zunächst muss betrachtet werden, dass verschiedene Arten von Zooplankton ein Exoskelett besitzen, was durch einen niedrigeren pH-Wert ebenfalls beeinflusst würde. Somit würde einer der wichtigsten Nahrungsgrundlagen der Nordsee durch die CO₂-bedingte Ozeanversauerung reduziert werden. In folgendem veränderten Nahrungsnetz (Ab. 5.3) wurde angenommen, dass sowohl die Baltische Plattmuschel (*Macoma baltica*) als auch die Herzmuschel (*Cerastoderma edule*) durch die vorangeschrittene Ozeanversauerung so schwer zu Schaden gekommen ist, dass beide Arten ausgestorben sind. Die anderen Kalkschalentiere würden in ihren Vorkommen durch vermehrtes Sterben ebenfalls reduziert werden. Somit kann folgendes verändertes Nahrungsnetz erstellt werden:

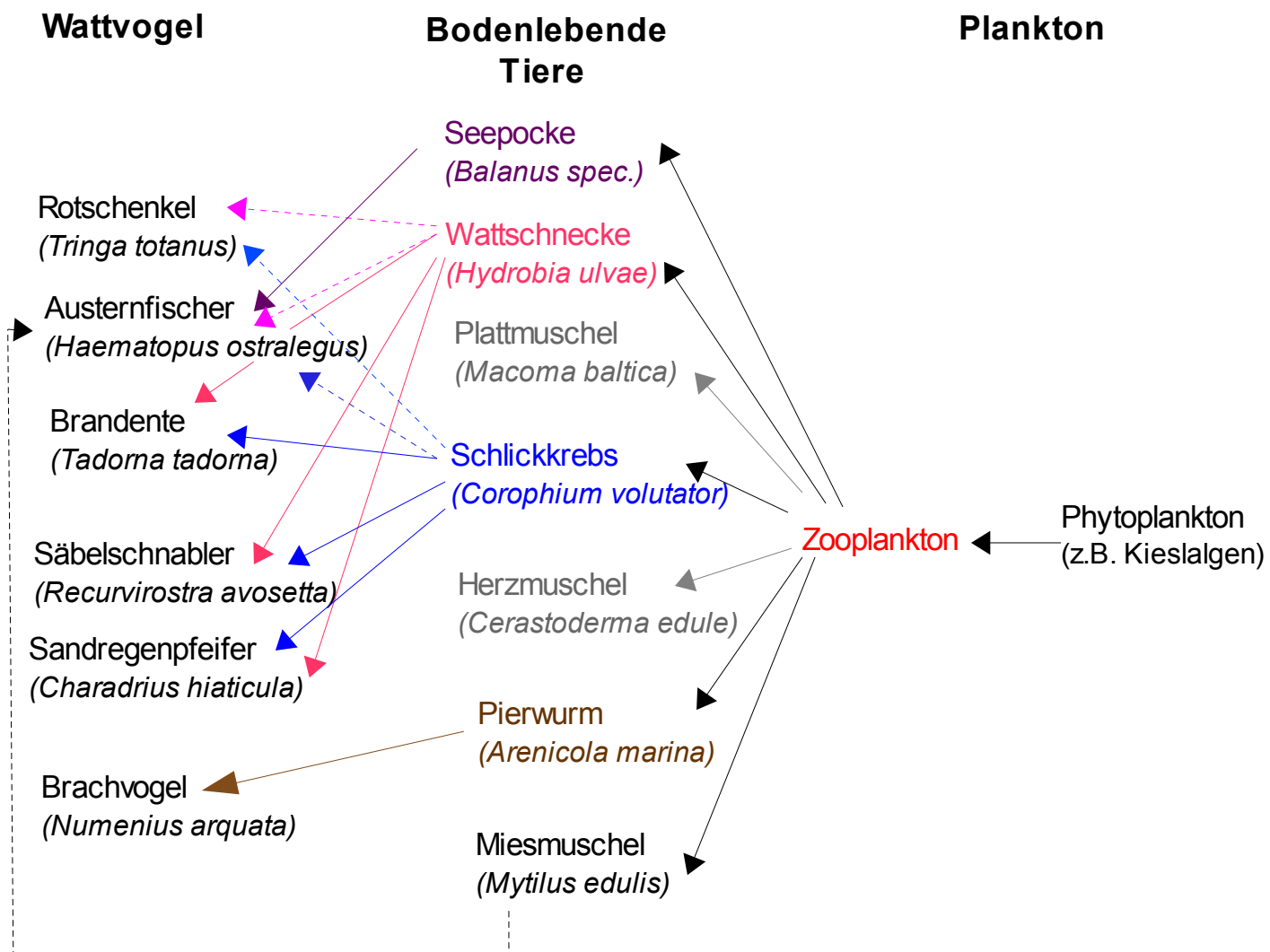


Abb. 5.3: Verändertes Nahrungsnetz (siehe Abb. 5.2), wie es theoretisch im Falle einer verstärkten Versauerung der Ozeane eintreten könnte. (Normaler Pfeil: „wird gefressen von“; Umstellung der Nahrungsgewohnheit durch farbige fein gestrichelte Linie gekennzeichnet; schwarzer gestrichelter Pfeil der Miesmuschel: s. Bildunterschrift Abb. 5.2; Verringerung der Artenvielfalt von Zooplankton in hellrot dargestellt; Aussterben der Platt- und Herzmuschel in hellgrau dargestellt)

Dieses theoretische Nahrungsnetz lässt schnell erkennen, dass durch das Aussterben der Plattmuschel und der Herzmuschel einige Wattvögel ihre Nahrungsgewohnheiten umstellen müssen. Da aber wie schon beschrieben normalerweise das Konkurrenzausschluss-Prinzip herrscht, müssen plötzlich mehrere Arten von Wattvögeln mit der selben Nahrung nebeneinander überleben. Dies ist im Ökosystem Wattenmeer bisher nicht möglich, da durch das Ausbilden biologischer Nischen ein Gleichgewicht entstanden ist (Homöostase). Da nun z.B. der Schlickkrebs vermehrt von verschiedenen Arten gefressen wird, kann es zu einem Aussterben seiner Art kommen, die anderen dargestellten Bodentiere könnten unter dem selben Problem leiden. Da die Tiere an Schalenmasse verlieren, wie die Ergebnisse belegten, bedeutet das außerdem, dass diese eventuell brüchiger sind und damit für Vögel einfacher zu zerstören wären, was für das Tier von Nachteil wäre. Zusätzlich hätten die Vögel nun weniger Nahrung, und müssten untereinander darum kämpfen. Es würde zu einem Kampf zwischen verschiedenen Arten kommen, dessen Resultat eine Abwanderung der schwächeren Wattvogelart sein könnte. Außerdem ist es fraglich, ob die neue Nahrung, die sich ein Wattvogel suchen müsste, die optimale Nährstoffzusammensetzung hätte, um so für das Überleben des Vogels und seiner Brut sorgen zu können. Es lässt sich klar herausstellen, wie drastisch sich schon das Aussterben von nur zwei Arten von Kalkschalentieren auf das Ökologische System des Wattenmeeres auswirken könnte. Dabei sind die Tiere aus dem Wattenmeer extreme Bedingungen gewohnt, so müssen sie mit der Tide, verschiedenen Salinitäten und anderen Einflüssen leben. Das zeigt, dass die Veränderung des pH-Wertes in der Nordsee selbst bei Tieren Einfluss zeigt, die sich schon an harte Lebensbedingungen angepasst haben. Da die verschiedenen Einflussfaktoren auf dieses System durch den Menschen so radikal und schnell vorangetrieben werden, ist eine Anpassung seitens der

Meeresbewohner und Zugvögel sehr unwahrscheinlich.

5.4 Vergleich der Ergebnisse mit Literaturwerten

Vergleicht man nun die gewonnenen Ergebnisse mit Erkenntnissen und Theorien bezüglich der Ozeanversauerung aus der Literatur, so sind viele Parallelen zu erkennen. So haben verschiedene Forscher Tiere bei gesenktem pH-Wert untersucht, und eine Beeinflussung in verschiedensten Faktoren herausstellen können. Allerdings ist die systemökologische Auswirkung der Ozeanversauerung auf das Wattenmeer zu diesem Zeitpunkt noch ein unerforschtes Gebiet, weshalb keine Literaturwerte zum Vergleich vorhanden sind. Die Ozeanversauerung ist jedoch nicht nur ein Problem innerhalb der Nordseeküste, auch die Ökologie ganzer Weltmeere und Ozeane könnten durch die voranschreitende Ozeanversauerung im Laufe der Zeit ins Wanken geraten. Beispielhaft für ein angegriffenes Ökosystem sind Korallenriffe. Das gesamte Ökosystem wird auf einem Kalksockel gebildet. Dieser Kalksockel bildet somit die Grundlage eines Lebensraumes von extrem vielen Meereslebewesen, und würde somit von durch die Versauerung der Ozeane betroffen sein (Pörtner und Menzel, o.J.). Hierbei steht das Ökosystem „Wattenmeer“ also nur exemplarisch für verschiedene Großökosysteme der gesamten Erde.

5.5 Weitere Ökofaktoren und anthropogene Einflüsse auf die Bewohner des Wattenmeeres

Da sich die Frage stellte, wie das Wattenmeer von der Ozeanversauerung betroffen sein würde, muss natürlich erwähnt werden, dass weitere Faktoren diesen Prozess beeinflussen. Temperatur und Salinität spielen eine maßgebende Rolle bei Einflüssen in das natürliche Umfeld der Meerestiere im Watt. Allerdings kann man sagen, dass die Tiere sehr tolerant sind, da sie schwerste Bedingungen, wie sie im Wattenmeer teilweise herrschen, aushalten müssen. Im Laufe der Evolution haben sich die verschiedenen Meeresorganismen an die Tide, die Temperatur und an die im Watt vorherrschenden natürlichen Gegebenheiten angepasst (Nationalpark-Zentrum Cuxhaven, 1992). Darüber hinausgehend wird nicht nur die Ozeanversauerung durch menschliches Handeln in Gang gesetzt. Auch Überfischung, Zerstörung des natürlichen Lebensraumes und zum Beispiel

die temperaturbedingte Abwanderung des Kabeljaus aus der Nordsee sorgen dafür, dass das System des Wattenmeeres seit der Industrialisierung ständig in Gefahr ist. Das Beispiel der Kabeljau-Wanderung steht exemplarisch für den Klimawandel, der das System des Wattenmeeres maßgebend beeinflusst. Durch die Klimaerwärmung steigt die Temperatur der Nordsee an, und Fische wie der Kabeljau reagieren sehr empfindlich auf diese Erwärmung (o.V.², 2006). Der Kabeljau wandert also nach Norden, in kältere Regionen. Dadurch fehlt jedoch sowohl ein Fressfeind als auch eine Nahrungsgrundlage. Doch auch Meerestiere aus dem Süden wandern in die Nordsee, da die gesteigerte Temperatur plötzlich einen passenden Lebensraum für diese Tiere darstellen. Heimische Tiere könnten durch diese Zuwanderung verdrängt werden (o.V.², 2006). Durch die Klimaerwärmung steigt aber auch der Meerwasserspiegel (Nationalparkverwaltung Niedersächsisches Wattenmeer, 1999), was rein theoretisch dazu führen könnte, dass einige Teile des Watts nicht mehr trockenfallen, sondern immer überflutet wären. So hätte der gesenkte pH-Wert sozusagen eine größere Angriffsfläche, da einige Kalkschalentiere wie die Miesmuschel auf dem Wattboden leben. Neben der Ozeanversauerung ist die Klimaerwärmung in vielerlei Hinsicht ein weiterer einflussreicher Faktor, der Auswirkungen auf das Ökologische System des Wattenmeeres ausübt.

6. Schlussfolgerung

Die gewonnenen Ergebnisse bestätigten nun die Erkenntnisse der eigenen zuvor aufgestellten Versuchsreihe, und die Literaturwerte. Da bewiesen werden konnte, dass sich die Artenvielfalt in der Nordsee verringern könnte, was eine Verschiebung der Nahrungsnetze auslösen würde, ist das Wattenmeer in der Form, wie es momentan aufzufinden ist, bedroht. Je niedriger der pH-Wert ist, desto stärker wird die Schale der einzelnen Tiere beeinflusst. Die Raststätte vieler Zugvögel ist gefährdet, die Nachkommen dieser könnten zusätzlich bedroht werden. Da der Mensch vom Gleichgewicht dieses Großökosystems in vielerlei Hinsicht abhängig ist, muss der Schutz des Weltnaturerbes gewährleistet werden. Der Mensch

muss außerdem die Folgen seines Handels begreifen und Verantwortung übernehmen. Da Bildung für diesen schwierigen Schritt eine sehr große Rolle spielt, sollten Forschungsarbeiten wie die von Experten, aber auch im kleinen Rahmen weiter ausgearbeitet und untersucht werden. Diese Ergebnisse sollten mit höchster Sensibilität einer breiten Masse interessant gemacht und zur Verfügung gestellt werden. Die Politik könnte sich intensiver mit diesem Thema beschäftigen, sodass „von oben und von unten“ eine möglichst schnelle Reaktion zu erwarten ist. Wenn wir nicht dafür verantwortlich sein wollen, dass ein kompletter Lebensraum zerstört wird, dann sollten wir so schnell wie möglich handeln.

6.1 Weitere Forschungsansätze:

Das Forschungsprojekt könnte nun mit verschiedensten Überlegungen und Verfeinerungen weitergeführt werden. Durch eine Versuchsreihe konnte ein vermehrter Algenbewuchs bei sinkendem pH-Wert festgestellt werden (Hahn², 2013). Man könnte untersuchen, ob dieser Algenbewuchs schädlich für die kalkbildenden Organismen ist, oder eine erweiterte Schutzfunktion übernimmt. Außerdem könnten die Untersuchungen bezüglich der Auswirkungen der voranschreitenden Ozeanversauerung auf das Immunsystem bei Kalkschalentieren optimiert und weitergeführt werden. Interessant wäre es auch, verschiedene Optionen zu untersuchen, wie man die Ozeanversauerung eindämmen oder im besten Falle sogar stoppen könnte. Rein theoretisch wäre durch eine Erhöhung der Hydrogenkarbonat-Ionen die Steigerung der Anzahl der Karbonat-Ionen gesichert, da das chemische Gleichgewicht in Richtung der Edukte verschoben werden würde. Da die Ozeane durch den gesteigerten Kohlenstoffdioxid-Gehalt der Atmosphäre saurer werden, könnte man untersuchen, welche Vor- und Nachteile es haben könnte, diese Versauerung mit einer Lauge zu bekämpfen. Die Ergebnisse aller bisher durchgeführten Versuchsreihen geben also Anlass, weitere Projekte auszuarbeiten und weiter zu forschen.

7. Literaturverzeichnis

1. Literatur

BROSIN H.-J. (1985) Das Weltmeer, *Verlag Harri Deutsch*, 1. Auflage, S.127

HAHN¹ S. (2013) Auswirkungen des CO₂-Gehalts der Atmosphäre auf Meerestiere mit und ohne Kalkschale, *Jugend forscht-Bericht*

HAHN² S. (2013) Auswirkungen des gesteigerten CO₂-Gehalts der Atmosphäre auf Meerestiere am Beispiel der Seepocke (*Balanus spec.*), *Meereswettbewerb-Bericht*

KRAUSS N. / POTT R. (2011) Stille Watten Weites Meer / Das Weltnaturerbe neu entdeckt, *Delius Klasing Verlag*, 1. Auflage, S.13, S.94, S.104

LANDESAMT FÜR DEN NATIONALPARK SCHLESWIG-HOLSTEINISCHES WATTENMEER / UMWELTBUNDESAMT (1998) Umweltatlas Wattenmeer / Band I Nordfriesisches und Dithmarscher Wattenmeer, *Ulmer Verlag*, Auflage unbekannt, S. 76

NATIONALPARKVERWALTUNG NIEDERSÄCHSISCHES WATTENMEER / UMWELTBUNDESAMT (1999) Umweltatlas Wattenmeer / Band 2 Wattenmeer zwischen Elb- und Emsmündung, *Ulmer Verlag*, Auflage unbekannt, S.124

NATIONALPARK-ZENTRUM CUXHAVEN (1992) Nationalpark-Zentrum Cuxhaven, *WEKA Informationszeitschriften- und Werbefachverlage GmbH*, 1. Auflage, S.20

STOCK M. / BERGMANN H.-H. / ZUCCHI H. (2007) Watt Lebensraum zwischen Land und Meer, *Boyens Buchverlag*, Auflage unbekannt, S.11

WILHELMSSEN U. / STOCK M. (2011) Wissen Wattenmeer, *Wachholtz Verlag*, Auflage unbekannt, S.10, S. 27, S. 105

2. Internetquellen

DELVAUX DE FENFFE G. (2013) Wattenmeer, URL: http://www.planet-wissen.denatur_technik/meer/wattenmeer/img/intro_wattenmeer_karte_g.jpg (Eingesehen am: 19.03.2014)

KASPER M. (2007) Lebensraum und Anpassungserscheinungen einiger Wattbewohner, URL: www.stiftikus.de/oekologioekonish.doc (Eingesehen am: 10.03.2014)

- MÜLLER-JUNG J.** (2009) Kollabieren die Meere? Die „Monaco-Deklaration“
URL: <http://blogs.faz.net/plankton/2009/01/30/kollabieren-die-meere-die-monaco-deklarationquot-gegen-versauerung-45/>
(Eingesehen am: 13.09.2013)
- o. **V.**¹ (2011) Nahrungskonkurrenz-Vermeidung durch Einnischung / Vögel im Watt, URL: http://fehertamas.com/wp-content/uploads/2010/03oekologie_einnischung.gif (Eingesehen am: 03.03.2014)
- o. **V.**² (2006) Neue schockierende Umweltstudie, *Archiv Berliner Kurier*,
URL: <http://www.berliner-kurier.de/archiv/unsere-nordsee-heizt-sich-immer-mehr-auf--klimawandel--plattfisch-und-kabeljau-ziehen-in-tiefe--kaelttere-gewaesser-neue-schockierende-umweltstudie,8259702,4020176.html> (Eingesehen am: 14.03.2014)
- o. **V.**³ (2009) Schutzstation Wattenmeer / Ostatlantischer Vogelzug, URL:
<http://www.schutzstation-wattenmeer.de/typo3temp/pics/80d849d653.jpg> (Eingesehen am 14.03.2014)
- PÖRTNER H.O. / MENZEL L.** (o.J.) Versauerung: Wenn Ingenieuren der Baustoff ausgeht, URL: http://www.awi.de/de/aktuelles_und_presse/hintergrund/ipcc/fact_sheet_ozeane/versauerung_wenn_ingenieuren_der_baustoff_ausgeht/ (Eingesehen am: 19.03.2014)
- SEIDEL S.** (2012) Infoblatt Ökosystem Watt / Fauna und Flora des Watt,
URL: <http://www2.klett.de/sixcms/media.php/76/wattwuerfel.jpg>
(Eingesehen am: 27.02.2014)