

Schlussbericht: Teil I (Kurzbericht)

ZE: GEOMAR Helmholtz Zentrum für Ozeanforschung Kiel	Förderkennzeichen: 03F0849B
Projektleiter Prof. Dr. Anja Engel	
Vorhabenbezeichnung: Verbundprojekt: TRANSPORTRATEN UND VERBLEIB VON MIKROPLASTIK IN NORDEUROPEÄISCHEN GEWÄSSERN (FACTS) Arbeitspakete 3.1 und 3.2	
Laufzeit des Vorhabens: 01.04.2020* – 31.12.2023	
Berichtszeitraum: 01.04.2020-31.12.2023	

*Anmerk.: In Absprache mit dem Koordinator startete das Projekt am 1.9.2020

Gefördert aus Mitteln des Bundesministeriums für Bildung und Forschung (BMBF)



Bundesministerium
für Bildung
und Forschung

1. Aufgabenstellung,

Hauptziel des JPI-OCEANS Projektes FACTS war es, das mechanistische Verständnis der Quellen, des Transports, des Auftretens und des Verbleibs von Mikroplastik (MP) in nordeuropäischen Meeresgewässern zu verbessern. Das Projekt analysierte die Verteilung von MP in der Wassersäule und untersuchte Prozesse, die ein Absinken von MP beeinflussen. Im Rahmen von FACTS beteiligte sich das GEOMAR an der Bestimmung des vertikalen Transportes von MP (WP3) in der Nordsee und entlang der norwegischen Küste. GEOMAR leitete mit WP3.1 die Prozessstudien zum besseren Verständnis des Aggregations- und Absinkverhaltens von MP und Nanoplastik. Ferner untersuchte GEOMAR in Arbeitspaket 3.2 die vertikale Verteilung von MP in der Wassersäule.

2. Voraussetzungen, unter denen das Vorhaben durchgeführt wurde,

Das Konzept des FACTS-Projekts wurde als Antwort auf die JPI Oceans Ausschreibung 2018 „Sources, distribution & impact of microplastics in the marine environment“ erstellt. FACTS liefert hiermit einen Beitrag zur Leitinitiative Green Economy des BMBF-Rahmenprogramms „Forschung für Nachhaltige Entwicklung“ bei dem das BMBF die Umweltauswirkungen von Plastikmüll von der Produktion und den Konsums, über den Transport in den Flusssystemen bis hin zum Verbleib in den Weltmeeren untersucht. Im Speziellen wird FACTS dazu beitragen

die Transportwegen und Senken von Mikroplastik in nordeuropäischen Gewässern besser zu verstehen

3. Planung und Ablauf des Vorhabens,

Im Rahmen von FACTS beteiligt sich GEOMAR an den Untersuchungen in WP 3, leitet die Task (T) T3.1 'Aggregation von Mikro- und Nanokunststoffen' und beteiligt sich an T3.2 'Vertikale Verteilung in der Wassersäule'. Innerhalb von WP 3 wird GEOMAR Grundlagenforschung betreiben, um Prozesse zu untersuchen, die für den Verlust von MP aus dem Oberflächenozean verantwortlich sind. Desweiteren soll die vertikale Verteilung von MP in der Wassersäule untersucht werden und die vertikalen Transportraten an ausgewählten Standorten wie dem Byfjord (Bergen, Norwegen) und an Standorten entlang eines Süd-Nord-Schnittes von der Nordsee bis zur Barentssee bestimmt werden. Zur Verbesserung des mechanistischen Verständnisses der Koagulationsdynamik von NP und MP werden neue experimentelle Ansätze entwickelt. Hierbei werden Wechselwirkungen mit EPS, biogenen und mineralischen Partikeln sowie die Rolle mikrobieller Biofilmen bei der Agglutination und Defragmentierung besondere Berücksichtigung finden.

Die folgenden Ziele von FACTS stehen bei den GEOMAR Untersuchungen im Vordergrund:

- I. Identifizierung, Charakterisierung und Quantifizierung von im Meer sinkendem Mikroplastik
- II. Bewertung der Rolle von biogenen Partikeln und exopolymeren Substanzen bei der Aggregation und dem Export von Mikroplastik
- III. Entwicklung neuer Methoden zur Bestimmung der Koagulationsdynamik von Nano- und Mikroplastiken

4. Wissenschaftlicher und technischer Stand, an den angeknüpft wurde, insbesondere

Die aktuellen wissenschaftlichen Erkenntnisse über Mikroplastik (MP) haben sich dank verbesserter Methoden wie μ -FTIR und Raman-Mikroskopie deutlich weiterentwickelt. Die norwegische Küstenströmung (NCC) spielt eine entscheidende Rolle beim Transport von MP von dicht besiedelten Gebieten Nordeuropas in die Arktis. Verschiedene Wasserquellen, darunter Atlantikwasser und Flüsse, tragen zur MP-Belastung in der NCC bei. In arktischen Regionen wurde eine erhebliche Menge an Kunststoffen nachgewiesen, deren genaue Herkunft und Verteilung weiter untersucht werden müssen. Insbesondere die Vertikalbewegung von MP in der Wassersäule wird durch Aggregations- und Sinkprozesse beeinflusst, deren Mechanismen noch nicht vollständig verstanden sind. Die Forschungen in FACTS bieten Gelegenheit, den Transport und das Schicksal von MP in Nordeuropäischen Gewässern näher zu untersuchen.

5. 5. Zusammenarbeit mit anderen Stellen.

GEOMAR hat das Projekt in enger Zusammenarbeit mit nationalen und internationalen Partnern durchgeführt. Diese umfasste insbesondere eine Kollaboration mit Dr. Gerdt vom AWI und Prof. Dr. Barbara Schulz-Böttcher der Universität Oldenburg für Analysen zur Bestimmung von Mikroplastik. Eine gemeinsame Feldkampagne im Byfjord, geplant für 2021 und 2022, konnte aufgrund der Covid-19 Pandemiebeschränkungen nicht durchgeführt werden.

Schlussbericht: Teil II

ZE: GEOMAR Helmholtz Zentrum für Ozeanforschung Kiel	Förderkennzeichen: 03F0849B
Projektleitung: Prof. Dr. Anja Engel	
Vorhabenbezeichnung: Verbundprojekt: TRANSPORTRATEN UND VERBLEIB VON MIKROPLASTIK IN NORDEUROPÄISCHEN GEWÄSSERN (FACTS) Arbeitspakete 3.1 und 3.2	
Laufzeit des Vorhabens: 01.04.2020* – 31.12.2023	
Berichtszeitraum: 01.04.2020-31.12.2023	

*Anmerk.: In Absprache mit dem Koordinator startete das Projekt am 1.9.2020

Gefördert aus Mitteln des Bundesministeriums für Bildung und Forschung (BMBF)



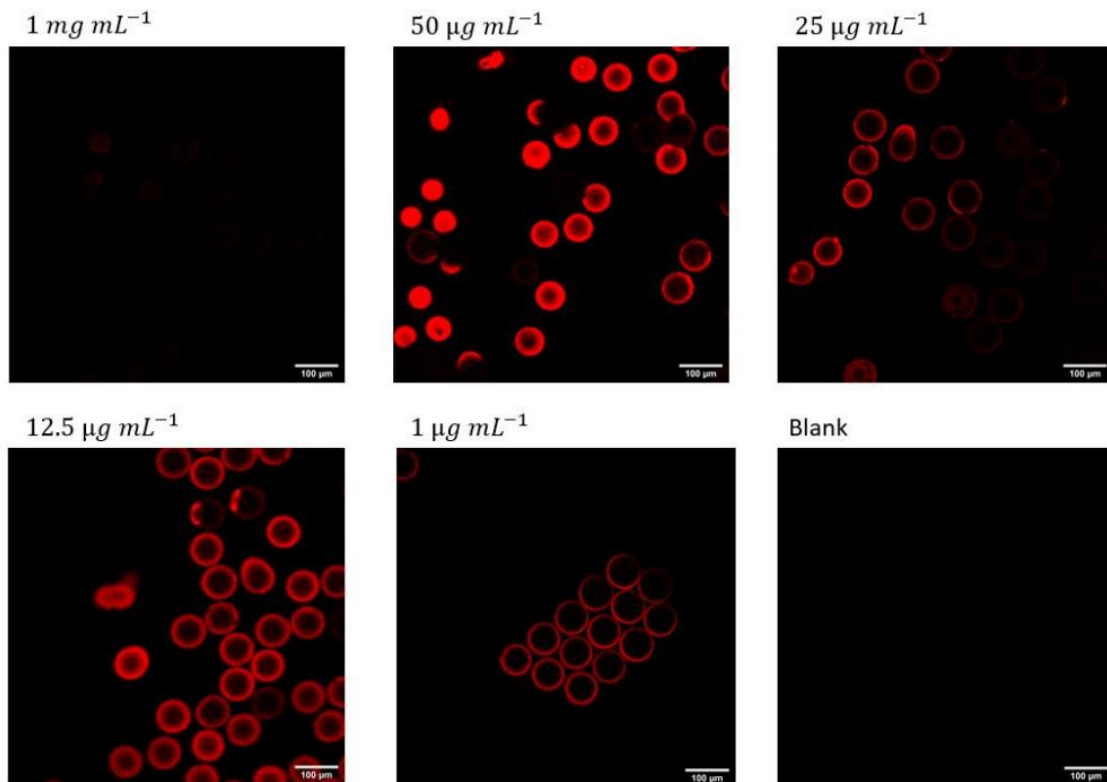
1.2. Eingehende Darstellung der Ergebnisse

1.2.1 Arbeitspaket "Aggregation von Mikro- und Nanokunststoffen"

Vorarbeiten zur Identifizierung von Mikroplastik in Aggregaten mit organischem Material

Im Rahmen einer Masterarbeit (Christine Fink, 2021, ‚Verfolgung von Mikroplastikpartikeln und ihrer Wechselwirkung mit organischem Material im Meerwasser durch Fluoreszenz Färbung‘) wurden analytische Vorarbeiten, für das Projekt durchgeführt. Insbesondere wurden mikroskopische Nachweisverfahren für Mikroplastik getestet. Um Aggregate aus Mikroplastik und Biofilm unter dem konfokalen Laser-Scanning Mikroskop (CLSM) sichtbar zu machen, wurden die Partikel mit dem fluoreszierenden Farbstoff Nile Red angefärbt. Nile Red wird bereits als Analysemethode benutzt, um Mikroplastik in Wasser nachzuweisen. Die Färbung mit dem lipophilen Farbstoff Nile Red ist eine günstige und schnellere Alternative des Mikroplastiknachweises im Vergleich zu den herkömmlich verwendeten chemischen Identifizierungsmethoden, wie der Fourier Transform Infrarot (FT-IR) oder Raman Spektroskopie, kann jedoch keine Plastikkomponenten unterscheiden.

Zur Verfolgung von MP und ihrer Interaktion mit organischem Material im Meerwasser wurde die Fluoreszenzmarkierung von Polystyrol und von Polystyrol und Reifenabrieb mittels Nile Red durchgeführt. Zu diesem Zweck wurde eine neue Färbemethode entwickelt. Nile Red wurde auch auf Reifenabrieb angewendet, der ebenfalls aggregiert werden sollte. Die Nile Red Färbungen wurden überwiegend nach der Methode von Hengstmann et al. (2019) durchgeführt. Zunächst wurden verschiedene Konzentrationen (1 mg mL^{-1} , $50 \text{ } \mu\text{g mL}^{-1}$, $25 \text{ } \mu\text{g mL}^{-1}$, $12,5 \text{ } \mu\text{g mL}^{-1}$ und $1 \text{ } \mu\text{g mL}^{-1}$) der Nile Red-Lösung wurden mit 50%igem Aceton hergestellt. Nach dem Färbvorgang, nach dem Färbeprotokoll in wässriger Lösung wurden



die gefärbten Partikel auf einen Objektträger gelegt. Die Laserintensität wurde mit dem 488-Laser auf 15 % eingestellt.

Abbildung 1: PS-MP, gefärbt mit verschiedenen Konzentrationen von Nile Red/50%iger Acetonlösung nach der wässrigen Färbemethode. Maßstabsleiste: 100 µm.

Tabelle 1: Fluoreszenzintensität von PS-MP, die mit verschiedenen Konzentrationen von Nile Red / 50 % Aceton gefärbt wurden, ++ gut, + schwach, - keine

1 mg mL ⁻¹	50 µg mL ⁻¹	25 µg mL ⁻¹	12.5 µg mL ⁻¹	1 µg mL ⁻¹	Blank
-	++	++	++	++	-

Die schlechteste Fluoreszenz-Darstellung wurde bei der höchsten Nile Red Konzentration (1 mg mL⁻¹) beobachtet. Die hohe Konzentration kann ein starkes Hintergrundrauschen verursachen, das zu einem unscharfen Bild führte. Die Fluoreszenz wurde mit abnehmender Konzentration intensiver, was zeigt, dass die Partikel gleichmäßig mit dem Farbstoff bedeckt waren. Außerdem war erkennbar, dass bei dieser Färbemethode keine Agglomerate gebildet werden, sondern jedes Partikel vereinzelt und einzeln angefärbt wurde. Unter der niedrigsten Konzentration (1 µg mL⁻¹) war auf dem mikroskopischen Bild eine Akkumulation von Partikeln zu sehen, die jedoch nicht miteinander verbunden waren; sie ließen sich in Flüssigkeit leicht isolieren. Wahrscheinlich wurde die Anordnung in einer gepackten Form durch statische Kräfte beim Aufsetzen auf den Objektträger verursacht. In Abwägung einer möglichst niedrigen Konzentration bei gleichzeitig guter Fluoreszenzwirkung wurde in folgenden Experimenten für die Färbung von Kunststoffteilchen eine Nile Red Konzentration von 10 µg mL⁻¹ als Standard festgelegt.

Ferner wurden Aggregate vom MP untersucht, und die Kombination von Färbemethoden mit Nile Red, FITC und Con A bewertet. Als Kontrollen wurden mit Nile Red gefärbte, unbehandelte PS-Kügelchen mit FITC und Con A gefärbt (Abbildung 2).

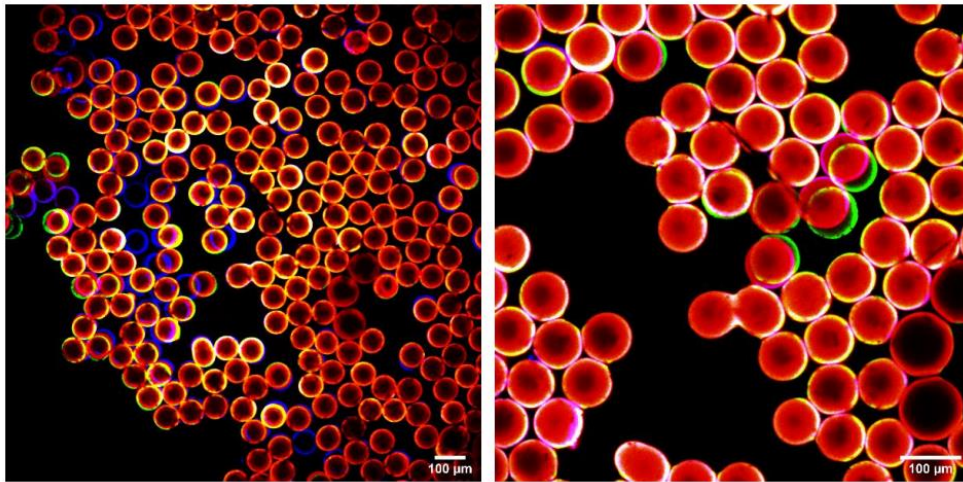


Abbildung 2: Mit Nile Red (rot), Con A (blau) und FITC (grün) gefärbte unbehandelte PS-Kügelchen, links: 10x-Objektiv, rechts: 20x Objektiv. Maßstabsleiste: 100 µm

Neben der Fluoreszenzmarkierung mit Nile Red (rot) reagierten die Partikel auch in geringem Maße mit FITC (grün) und Con A (blau). Die Überschneidungen von Nile Red und FITC sind in gelb und die mit Con A in lila. Eine Überlappung aller drei Farbstoffe ergab Weiß. Die Färbung durch Nile Red entsteht in erster Linie durch Bindung über van-der-Waals-Wechselwirkungen mit zusätzlichen Dipol-Wechselwirkungen auf den Polymeroberflächen (Maes et al. 2017; Tikhomirov et al. 2011). Die Reaktion mit FITC und Con A kann auf leichte organische Verunreinigungen zurückzuführen sein.

Meeresschnee wurde aus ungefiltertem Meerwasser der Kieler Förde und gefärbte Polymere in einem Roll-Tank im Labor hergestellt. Protein- und polysaccharidhaltige Bestandteile der erzeugten Aggregate wurden dann mit FITC bzw. Con A fluoreszenzmarkiert. Der Einfluss der MP Koagulation in Abhängigkeit von der TEP- und CSP-Konzentration, und von Phytoplankton (*T. weissflogii*, *E. huxleyi* und *S. Bacillaris*) wurde ebenfalls in Roll-Tank Experimenten untersucht. Das Wasser für diesen Aggregationsversuch wurde aus der Kieler Förde entnommen. Im Roll-Tank erzeugte Meeresschneepartikel mit eingearbeiteten und fluoreszenzmarkierten PS-MP wurden anschließend mit FITC (grün) und Con A (blau) markiert (Abbildung 3).

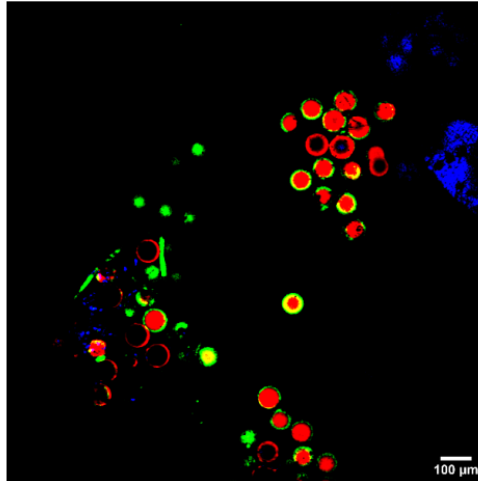


Abbildung 3: Meeresschnee-Aggregat aus ungefiltertem Meerwasser mit Nile Red gefärbten PS-MP (rot), Con A (blau) und FITC (grün). Maßstabsleiste: 100 μm

Die drei verwendeten Farbstoffe sind mit Konfokalmikroskopie deutlich voneinander zu unterscheiden. Die mit FITC (grün) gefärbten Substanzen stellen proteinartiges Material, einschließlich CSP, dar. Bei den mit Con A (blau) gefärbten Substanzen handelt es sich um polysaccharidhaltige Strukturen, wie TEP. Es ist auch zu erkennen, dass die mit Nile Red gefärbten Kunststoffpartikel in organischen Aggregaten mit dem CLSM visuell nachweisbar sind. Die Integration von fluoreszenzmarkiertem Mikroplastik in Meeresschnee war somit erfolgreich. Protein- und polysaccharidhaltige Komponenten in Meeresschnee wurden erfolgreich markiert, nachgewiesen und mittels CLSM unterschieden. Erste Hinweise auf den Einfluss von TEP auf die Integration von Mikroplastik wurden gefunden. Die Aggregate, einschließlich *T. weissflogii*, enthielten mehr Mikroplastik als die Partikel, die durch die Zugabe von *S. bacillaris* entstanden.

Darüber hinaus wurde auch der Einfluss abiotischer Behandlungen, wie UV-Licht-Bestrahlung, Lagerung in ASW und Sandabrieb auf Polystyrol, die Effizienz der Nile Red-Färbung und die Einbindung in Meeresschnee untersucht. Diese Untersuchungen zeigten, dass abiotisch angegriffenes Polystyrol ebenfalls erfolgreich angefärbt und in Meeresschnee eingebettet wurde.

Diese vorbereitenden Studien zeigten, dass die fluoreszenzbasierte Färbemethode von MP sehr gut geeignet ist, um Mikroplastik im Meeresschnee nachzuweisen und die Zusammensetzung des organischen Materials in der Umgebung von MP in Bezug auf Proteine und Polysaccharide räumlich zu lokalisieren. Diese Methode könnte für Studien eingesetzt werden, die Mechanismen untersuchen, warum Mikroplastik von der Meeresoberfläche in die Tiefen des Ozeans getragen wird. Außerdem könnte sie zeigen, welche chemischen Komponenten bei diesem Prozess eine Rolle spielen.

Bestimmung der Koagulationseffizienz nach der Couette-Kammer Methode

Dieses Arbeitspaket untersuchte die potenzielle Kontrolle der Aggregationsdynamik von Nano- und Mikroplastik, wie z.B. die Quantität und Qualität der Partikel in Meerwasser, die mikrobielle Biofilmbildung auf Kunststoffoberflächen und die Rolle von extrazellulären Biopolymeren. Zu diesem Zweck wurden unter anderem Experimente mit Polystyrol (PS)-MP (80 μm) durchgeführt. Der Vorteil an PS ist der geringe Dichteunterschied zu Wasser, welcher das

Absinken der Partikel in der experimentellen Apparatur verlangsamt und eine gleichmäßige Suspension ermöglicht. In diesem Arbeitspaket sollten auch potenziellen Einflussfaktoren auf die Aggregationsdynamik von Nano- und Mikroplastik, wie z. B. die Menge und Qualität der Partikel im Meerwasser, die Bildung mikrobieller Biofilme auf Kunststoffoberflächen und die Rolle extrazellulärer Biopolymere betrachtet werden. In umfangreichen Studien wurde zunächst die Wirksamkeit der angepassten Methodik der Couette-Kammer (basierend auf Engel 2000) evaluiert (Abbildung 4).

Die Couette-Kammer besteht aus einer horizontal montierten Kammer mit spezifischen Merkmalen: einer Einfüll-Öffnung, einer Probenahme-Öffnung und einer beweglichen Endkappe, die durch eine Kurbel gesteuert wird, sowie einem Motor und einer Antriebswelle am anderen Ende. Diese Anordnung ermöglicht die Erzeugung einer Couette-Strömung, die durch einen festen inneren Zylinder und einen äußeren rotierenden Zylinder innerhalb der Kammer gekennzeichnet ist und eine zweidimensionale Strömung erzeugt, die für die Förderung der Koagulation entscheidend ist (Donnelly, 1991).

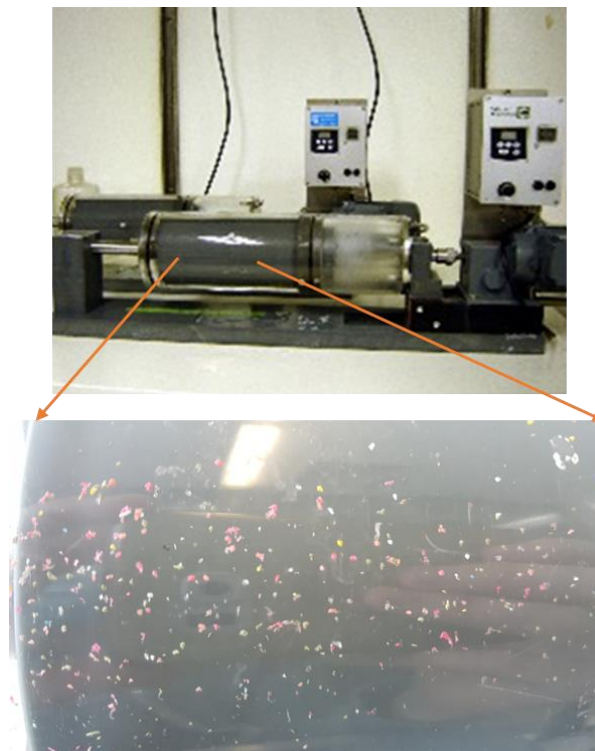


Abbildung 4: Couette-Kammer und vergrößerter Teilausschnitt mit geschreddertem MP.

Die mittlere Scherrate, bezeichnet als G , in dieser laminaren Strömung wird von Faktoren wie der Winkelgeschwindigkeit und den inneren und äußeren Radien der Zylinder bestimmt (van Duuren, 1968). Der ringförmige Raum zwischen diesen Zylindern fasst etwa 1,2 Liter Medium. Bei jedem Experiment mit der Couette-Strömungsvorrichtung wurde die mittlere Scherrate G mit $0,86 \text{ s}^{-1}$ gemessen. Diese Scherrate fällt in den typischen Bereich, der an der Meeresoberfläche beobachtet wird (10^{-2} bis 10 s^{-1}), wie von Grant et al. (1962) und Soloviev et al. (1988) dokumentiert, und wurde auch in früheren Arbeiten von Engel (2000) verwendet. Nach den Grundsätzen der Koagulationstheorie wird erwartet, dass die frühen Phasen der Koagulation zu einer Verringerung der numerischen Häufigkeit von Partikeln innerhalb der

Couette-Kammer im Laufe des 4-stündigen Experiments führen. Diese Verringerung kann mit der folgenden Gleichung quantifiziert werden:

$$(1) \text{ Reduktionsrate} = \Delta C / \Delta t$$

wobei ΔC die Veränderung der Partikelanzahl und Δt das Zeitintervall der Messung darstellt. Wenn die Verringerung der Partikelzahl durch Koagulation hervorgerufen wird, kann sie wie folgt beschrieben werden:

$$(2) \quad C_t = C_0 \exp\left(-\frac{8\alpha\Phi G}{\pi} t\right)$$

Dabei ist Φ der anfängliche Volumenanteil der Partikel (in ppm) und C_t und C_0 sind die Partikelkonzentrationen (mL^{-1}) zum Zeitpunkt t bzw. 0 (Kjørboe et al., 1990). Der Wert α ist der Klebrigkeitsparameter, der die scheinbare Koagulationseffizienz beschreibt, d. h. die Wahrscheinlichkeit, dass zwei Partikel beim Zusammenprall aneinanderhaften, wobei die Werte von 0 bis 1 reichen.

Um zu untersuchen, ob die Couette-Kammer-Methode die Koagulationseffizienz wirksam quantifizieren kann, wurde eine Reihe von Experimenten durchgeführt, beginnend mit ersten Versuchen mit geschreddertem Mikroplastik (MP), wie in Abbildung 4 dargestellt.

Es wurden dabei einige Maßnahmen unternommen, um elektrostatische Wechselwirkungen zwischen den MP und der Versuchskammer zu minimieren und die Dispersion der Partikel im Wasser zu ermöglichen. Zunächst wurden die PS-MP mehrere Tage vor Experimentbeginn in Wasser der gleichen Salinität (ultrareines Wasser mit meersalzähnlicher Ionenmischung aus NaCl, MgSO₄, KCl und CaCl), wie das Experiment angesetzt. Getestet wurden die Salinität von 34 (Ozean) und 12 (Kieler Förde), sowie 0 (nur ultrareines Wasser). Hintergrund ist, dass die Salinität des Wassers Einfluss auf die Stärke von elektrostatischen und hydrophoben Wechselwirkungen hat (Hu et al., 2013). Weiterhin war es wichtig, eine repräsentative Salzmischung zu nehmen, da zweiwertige Kationen (Ca²⁺, Mg²⁺) stärkeren Einfluss auf das Zeta-Potential von PS haben als einwertige Kationen (Na⁺, K⁺) (Lu et al., 2018). Zudem sind insbesondere Ca²⁺-Ionen relevant für die Aggregation von Gelpartikeln (Transparente Exopolymere Partikel (TEP) und Coomassie-Färbbare-Partikel (CSP)) (Meng & Liu, 2021), und somit für Untersuchungen mit TEP und CSP für eine Vergleichbarkeit mit der Umwelt notwendig. Um zu vermeiden, dass die Partikel direkt zu Beginn des Experimentes Kontakt mit der Kammerwand aufnehmen, da sich die Wandbindungen schwer lösen lassen (persönliche Beobachtung), wurden die PS-MP vor dem Experiment gewaschen (um Additiva aus dem Experiment fernzuhalten) und anschließend in definiertem Volumen der Experimentlösung gegeben, um eine PS-MP-Lösung bekannter Konzentration zu erhalten. Ein kleines Aliquot dieser wurde dann nach dem Füllen der Couette-Kammer hinzugegeben und das Experiment mit einer kurzen Phase hoher Scherraten gestartet, welches eine homogene Verteilung der Partikel im Wasser ermöglichen soll. Unsere ersten Versuche mit der Couette-Kammer zeigten, dass die MP-Flockengröße in der Kammer mit der Zeit zunimmt (Abbildung 5). Dieser Effekt war im Kieler Förde-Wasser stärker ausgeprägt als im künstlichen Kieler Förde-Wasser für Partikel, die 1 Woche in ihrem Medium gealtert sind.

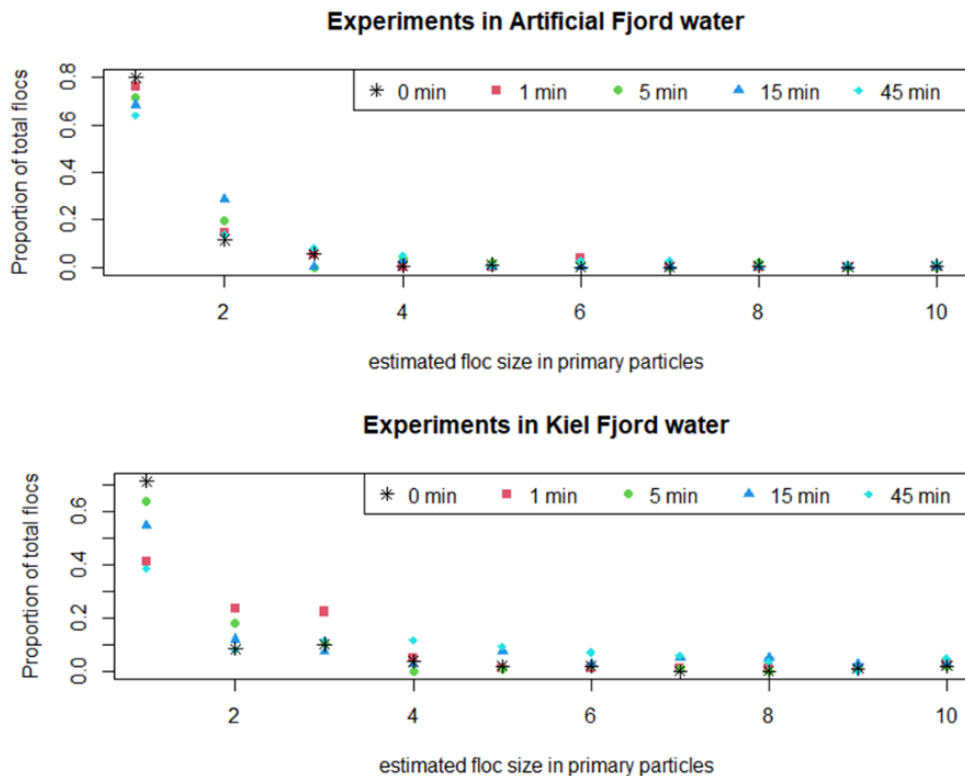


Abbildung 5: Veränderungen der Flockengröße (Anzahl der Primärpartikel in der Flockenschicht) über die Dauer der Couette-Kammer-Inkubation mit natürlichem Kieler Förde-Wasser und künstlichem Meerwasser.

Nachdem wir gezeigt haben, dass die MP-Koagulation unter laminarer Scherung im Couette-Kammer-System stattfindet, haben wir die MP-Koagulationseffizienz in einer Reihe von Experimenten bewertet. Leider zeigte sich bei längerer Beobachtung durch verschiedene bildgebende Verfahren trotz der verschiedenen Vorbehandlungen eine erhebliche und zufällige Absorption der PS-MP durch die Wände der Couette-Kammer. Dies ist wahrscheinlich auf die hohe Oberflächenspannung von PS-MP und Kunststoffen im Allgemeinen in polaren Lösungsmitteln wie Wasser zurückzuführen, was zu einer verringerten Kontaktfläche durch Adhäsion an Plexiglaswänden oder Luftblasen, falls vorhanden, führt.

Eine mögliche Lösung, um dieses Verhalten zu verhindern, wäre eine Oberflächenbeschichtung, ähnlich wie beim Auftragen von Farbe. Da Plexiglas (PMMA) jedoch ein empfindliches Material ist, neigt es dazu, Risse zu bilden, wenn es den meisten Beschichtungen ausgesetzt wird, was eine Herausforderung darstellt. Alternativ könnten weniger aggressive Beschichtungen wie wasserlösliche Seifen in Betracht gezogen werden, die sich jedoch schnell in Wasser auflösen würden, was sich auf die Wechselwirkungen zwischen den Kunststofffragmenten auswirken und Aggregationsstudien erschweren würde. Folglich ist die Untersuchung der Mikroplastikaggregation in einer Plexiglas-Couette-Kammer nicht durchführbar. Es könnte erforderlich sein, kunststofffreie Versuchsaufbauten wie ein oszillierendes Gitter in einem Glasgefäß zu verwenden. Leider war die Untersuchung alternativer Methoden zur Bestimmung der Koagulationseffizienz aufgrund der zeitlichen Beschränkungen durch die Covid-19-Pandemie im Rahmen dieses Projekts nicht möglich.

Zusammenfassend lässt sich sagen, dass die herkömmliche PMMA-Couette-Kammer zwar nachweislich die Aggregation von MP auslöst, eine zuverlässige und genaue Bewertung der Koagulationsseffizienz von MP jedoch nicht erfolgreich reproduziert werden konnte.

Untersuchung der Koagulationseffizienz von MP mit organischem Material in Roll-Tank Experimenten

Um die Aggregation von MP und organischem Material dennoch weiter zu untersuchen wurden eine Reihe von Roll-Tank Experimenten im Rahmen einer Bachelorarbeit durchgeführt (Celine Schargott, 2023, 'Aggregatbildung von Mikroplastikpartikeln und Konsequenzen für deren Export in die marine Wassersäule: Eine experimentelle Studie.').

Der Aggregation von Mikroplastik wurde anhand von künstlich hergestellten Aggregaten untersucht, die nach dem Roll-Tank (RT) Ansatz von Shanks & Edmondson (1989) gebildet wurden (Abbildung 6). Die Messungen erfolgten durch Videoaufzeichnungen zu festgelegten Zeitpunkten, Mikroskopie der Aggregate sowie durch Spektralphotometer-Messungen zur Bestimmung der TEP-Konzentrationen. Die Untersuchung konzentrierte sich auf das Aggregationspotenzial von MP unter verschiedenen Bedingungen: Zugabe von Alginsäure-Lösung unterschiedlicher Konzentration (Exp. I; Abbildung7), von *Phaeocystis spp.*-Kulturen (Exp. II; Abbildung 8) und von MP mit Biofilm (Exp. III; Abbildung 9). Als Kontrollen wurde bei jedem Experiment MP ohne weitere Zugaben eingesetzt. Die Wasserproben für jedes Experiment wurden aus der Ostsee entnommen. In allen drei Ansätzen wurde eine Erhöhung des Aggregationspotenzials von MP durch Zusatz von organischem Material gefunden. Zusätzlich wurde beobachtet, dass höhere TEP-Konzentrationen zu einer erhöhten Menge an Mikroplastikpartikeln in den jeweiligen Aggregaten führten. Die Bildungszeiten der Aggregate waren unter den Bedingungen mit Biofilm am schnellsten und langsamsten unter dem Einfluss von Alginsäure.

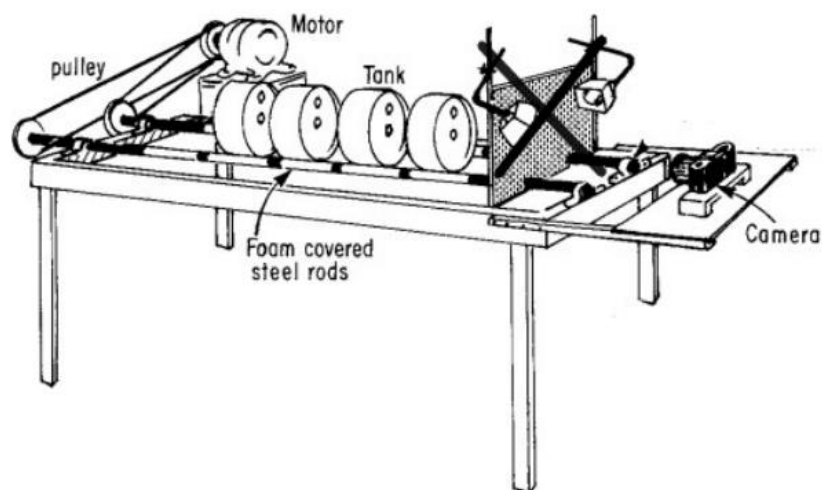


Abbildung 6: Schematische Darstellung des Versuchsaufbaus der Roll-Tank Experimente (nach Shanks & Edmondson, 1989).

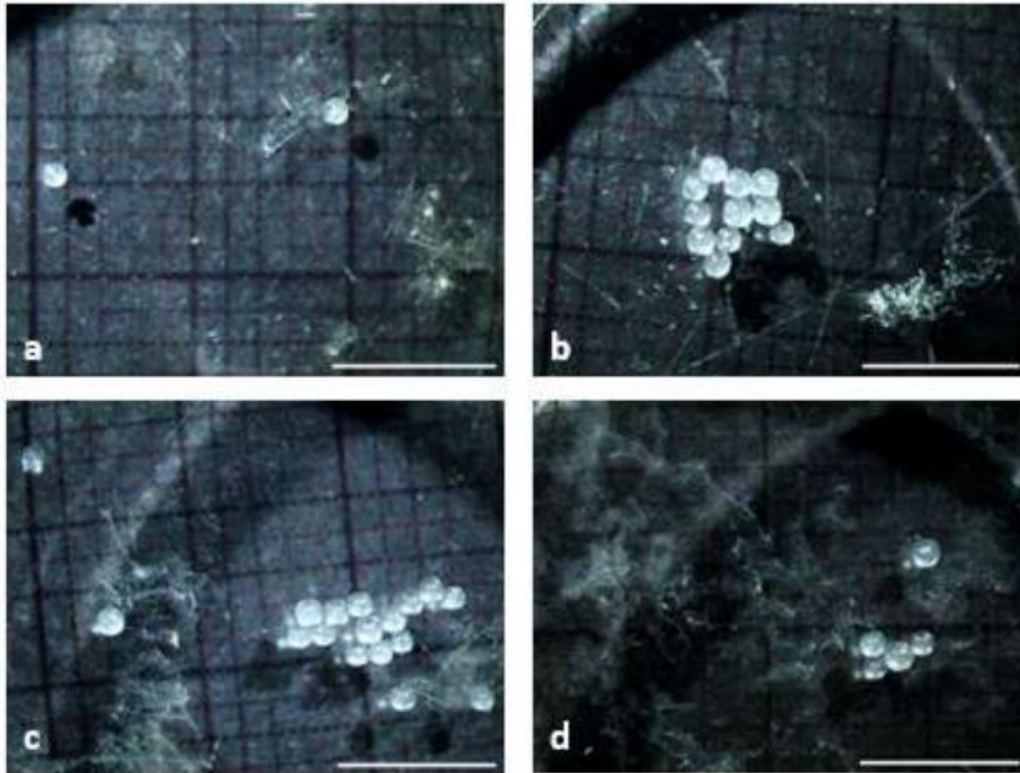


Abbildung 7: Experiment I (PS-MP und Algininsäure). Kamerabilder von Aggregaten, die im Roll-Tank gebildet wurden.

Im Experiment I war der Anteil der PS-MP pro Aggregat am geringsten, mit einer Anzahl zwischen 0 und 17. Im Gegensatz dazu wurden im Experiment II 0 bis über 200 PS-MP pro Aggregat gefunden. Mit zunehmender Anzahl von PS-MP stieg auch die Menge an organischem Material, wodurch die Größe der Aggregate zunahm. Im dritten Experiment wurden Aggregate mit größerer Größe gebildet, wobei eines der Aggregate einen Spitzenwert von über 600 PS-MPs aufwies. Die anderen Aggregate variierten zwischen 0 und über 300 MPs und waren damit die größten Aggregate im Vergleich zu den Experimenten I und II.

Unterschiede zwischen den Experimenten bzgl. der Anzahl der PS-MP, die am Aggregationsprozess beteiligt waren (Abbildung 10), konnten darauf zurückgeführt werden, dass PS-MP ohne Biofilmbewuchs leicht mit dem PMMA Material des Roll-Tanks interagierten und daher nicht mehr frei suspendiert waren. Dieser Effekt wurde auch schon in den Couette-Kammer Experimenten beobachtet. In Experiment I lag der Anteil der aggregierten PS-MP bei nur 5.7% und damit deutlich unter dem von Experiment II (29%) und Experiment III (30%). Reine Algininsäure scheint somit in geringerem Maße Aggregatbildung mit PS-MP zu verursachen, was auch damit zu erklären ist, dass Algininsäure in Wasser löslich ist und daher vermutlich nur teilweise an Partikelinteraktionen teilnehmen kann. Die Ergebnisse der Experimente II und II, zeigten deutlich, dass sowohl Phytoplankton als auch Biofilm auf MP die Aggregatbildung von PS-MP untereinander und mit organischem Material erhöht.

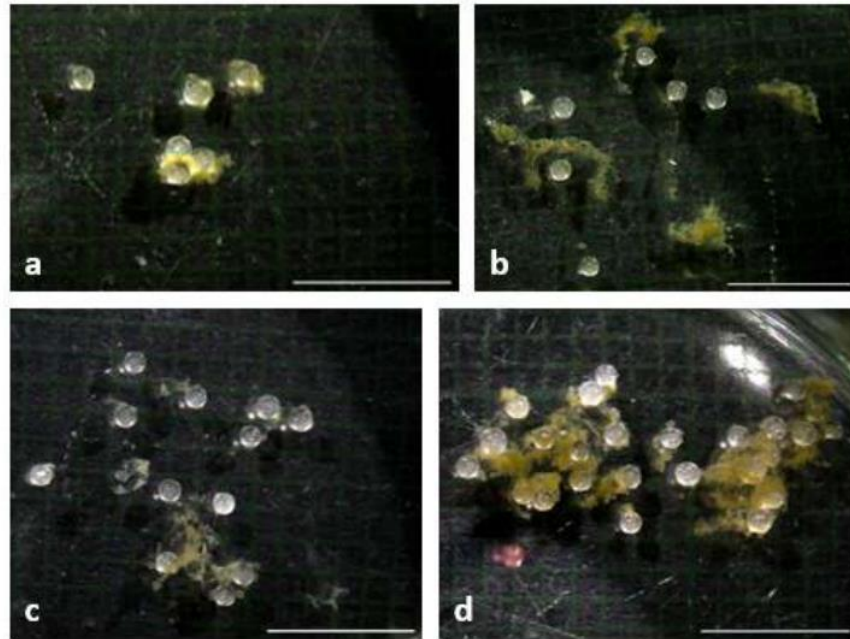


Abbildung 8: Experiment II (PS-MP und *Phaeocystis pouchetii*). Kamerabilder von Aggregaten, die im Roll-Tank gebildet wurden.

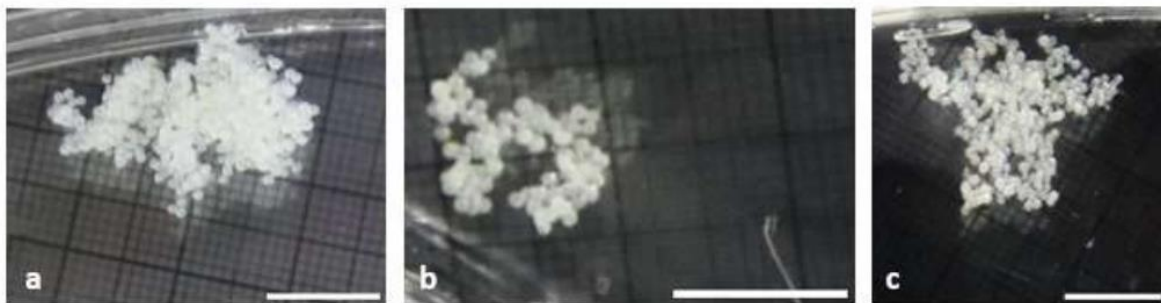


Abbildung 9: Experiment III (PS-MP mit Biofilmbewuchs). Kamerabilder von Aggregaten, die im Roll-Tank gebildet wurden.

Diese Studie verdeutlicht, dass Mikroplastik zusammen mit verschiedenen Komponenten organischen Materials Aggregate bilden kann. Dies legt nahe, dass MP an der natürlichen Partikeldynamik der pelagischen Ökosystem teilnimmt, aggregiert und absinkt oder auch von Meeresorganismen als Nahrung aufgenommen werden könnte.

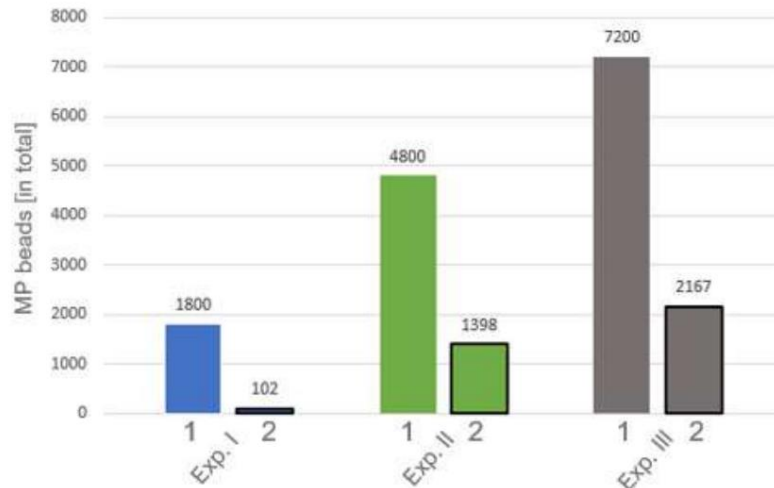


Abbildung 10: Verhältnis zwischen zugesetzten PS-MP und aggregierten PS-MP in allen drei Experimenten (1 = zugesetzte PS-MP zu Beginn; 2 = aggregierte PS-MP-Perlen).

1.2.2. Arbeitspaket "Vertikale Verteilung: Wassersäule"- Beprobung von Meeresschnee

Beprobung und Analyse von Meeresschnee in der Nordsee/Nordatlantik (He578 Ausfahrt)

Die vertikale Verteilung von MP und ihre Assoziation mit natürlichen Partikeln wurde untersucht, um die Mechanismen, die für den MP-Transport und Verbleib im Ozean verantwortlich sind, besser zu verstehen. Zu diesem Zweck wurde die FS Heincke Expedition (He578; 5.6.-7.7.2021) in der Nordsee bzw. im Nordatlantik durchgeführt. Auf der Fahrt wurden Marine Snow Catcher (MSC) mit einem Fassungsvermögen von 100 Litern eingesetzt, um große Mengen an Meerwasser auf Aggregate zu beproben (Abbildung 11). Die Beprobung mit dem Snow Catcher wurde an 23 Stationen in zwei Tiefen, dem tiefen Chlorophyll a -Maximum (DCM) und der Pycnokline durchgeführt. Die Analyse der Proben hinsichtlich des organischen Materials wurde in 2022 weitgehend abgeschlossen. Die Mikroskopie der Proben ergab dabei, dass nur wenige MP in den Aggregaten vorkamen. Zur weiteren Analytik des MNP wurden Proben mit dem AWI (G. Gerdt's) ausgetauscht.

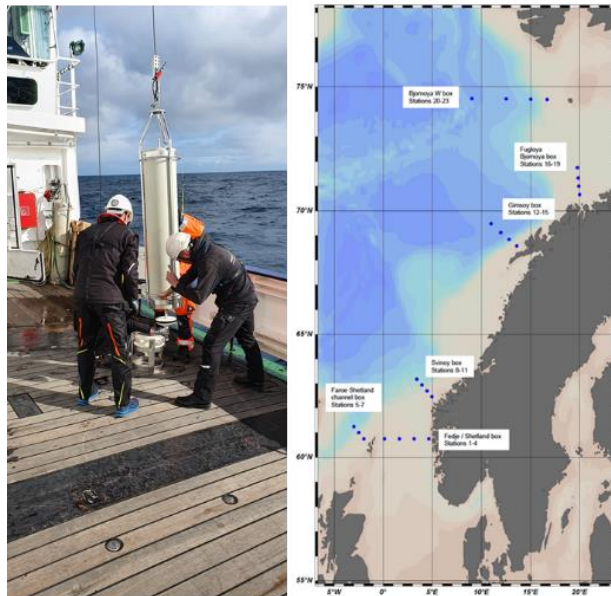


Abbildung 11: Einsatz des Marine Snow Catcher während der FS He578.

Die Analyse des organischen Materials der Aggregate wurde abgeschlossen und zeigte, dass im Vergleich zu suspendierten Partikeln organisches Material einen geringeren Beitrag zur Masse von Aggregaten einnahm (Abbildung 12). Welchen Anteil Mikroplastik an der Masse der Aggregate hatte, kann erst nach Auswertung der Plastikanalysen abgeschätzt werden. Weitere Proben befinden sich derzeit beim Alfred-Wegener-Institut Helmholtz Zentrum für Polar und Meeresforschung (G. Gerdts) zur Analyse des Plastikvorkommens in Aggregaten.

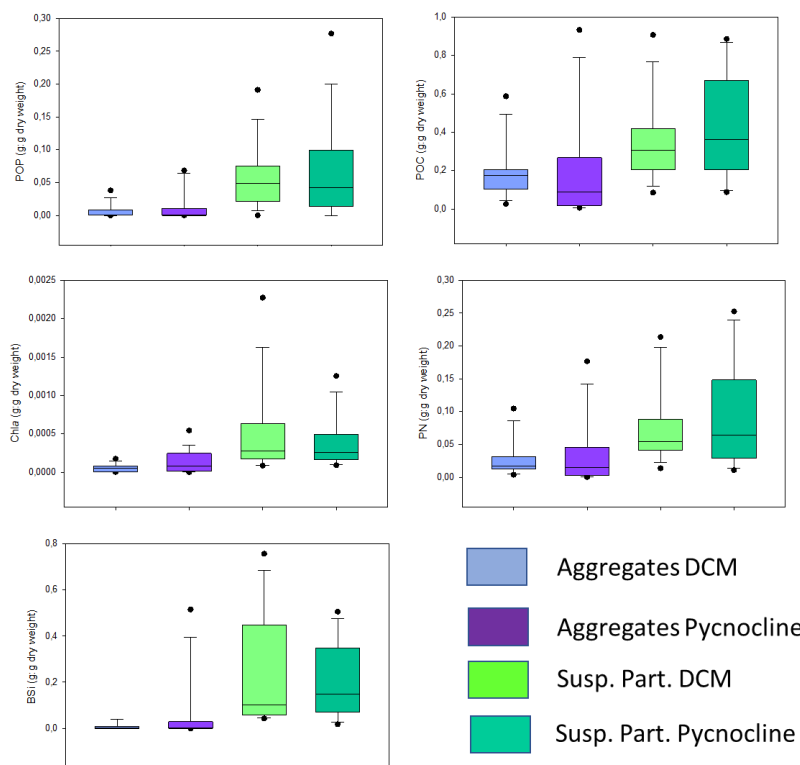


Abbildung 12: Biogeochemische Komponenten des organischen Materials von Marine Snow Aggregaten und suspendierten Partikeln im Umgebungswasser relativ zur partikulären Masse.

"Vertikale Verteilung: Wassersäule"- Beprobung mit Sinkstofffallen

Da die ursprünglich geplanten Untersuchungen zum Vertikaltransport von MP in Norwegen aufgrund der Covid-19 Beschränkungen nicht durchgeführt werden konnten, wurde eine alternative Studie in der Ostsee durchgeführt. Die vertikale Verteilung von sinkendem Mikroplastik (MP) wurde in der Kieler Bucht (54,32174°N, 10,02825°O) über einen Zeitraum von 10 Monaten untersucht. Dazu wurden verankerte Sinkstofffallen in der Ostsee ausgesetzt und monatlich getauscht (Abbildung 13). Die Station in der Eckernförder Bucht ist Teil der marinen Zeitserienstation Boknis Eck (für weitere Informationen unter <https://www.bokniseck.de/>).

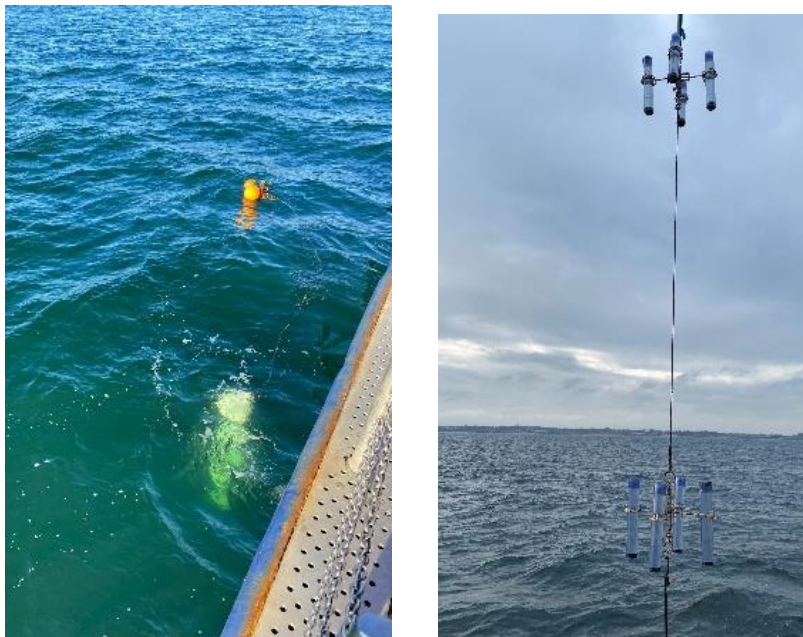


Abbildung 13: Einsetzen der Sedimentfallen in der Kieler Bucht

Die Sinkstofffalle besteht aus 4 Plexiglas Röhren mit einem Volumen von 10 L, welche auf jeweils zwei Tiefen (5m und 9m) sinkende Partikel aus der Wassersäule auffängt (Abbildung 13). Die Zylinder sind an einem beweglichen Kreuz befestigt, um sich frei mit der Strömung um die Achse der Verankerung bewegen zu können. In jeder Tiefe werden drei Proben und eine Kontrolle gesammelt. Gefüllt sind diese mit filtriertem Seewasser und einer Sole (engl. brine) aus Formaldehyd und hoch salinem Seewasser (35 PSU), welche sich am Boden sammelt. Die Aggregate sinken in die Plexiglaszylinder und durch die erhöhte Dichte der Sole findet kein weiterer Austausch mit dem darüber befindlichen Seewasser statt. Das Probenmaterial wird aufgrund des Formaldehyds konserviert. Die Analyse der Proben hinsichtlich des organischen Materials (POC/N, BSI, TEP, CSP) wurde 2022 abgeschlossen. Für die weitere Verarbeitung der Proben von MNP wurde eine organische Verdauung in sieben Schritten anhand des Protokolls von Fischer et al. (unveröffentlicht, basierend auf Cole et al., 2014, und Mintenig et al., 2016) durchgeführt. Zu Beginn wird das Probenmaterial durch ein 10µm Edelstahlfilter filtriert. Das Probengefäß wird mit 10%igem filtriertem Ethanol gründlich gespült und ebenfalls filtriert. Um das organische Material aus den Sedimentfallen zu entfernen wird der Edelstahlfilter in ein Glasgefäß überführt und ein 20%iges Tensid (Natrium dodecyl sulfat) hinzugefügt um das Protein zu denaturieren. Weiter wird das organische Material anhand von Proteasen (AO-1) und Wasserstoffperoxid verdaut, sodass eine abschließende Filtration auf Glasfaserfilter (GFF) stattfinden kann. Analysiert wurden die MNP Proben anhand

der Pyrolyse - GCMS (Gaschromatograph Massenspektrometer). Bei dieser Methode werden die Proben erhitzt und durch die Chromatographie aufgetrennt, sodass die einzelnen Polymere ausgewertet werden konnten (Fischer et al., 2019). Diese Analyse wurde durchgeführt durch Dr. Barbara Scholz-Böttcher und Annika Esther Wenst und 2023 abgeschlossen. Mit dieser Methode werden auch kleine Plastikpartikel <1 µm analysiert, weshalb die Ergebnisse des Materials aus den Fallen Mikro- und Nanoplastik (MNP) umfassen kann. Neben den Proben wurden je Tiefe und Einsatz ein Blindwert aus geschlossenen Fallen analysiert um eine potentielle Kontamination während der Behandlung des Materials im Labor erkennen und quantifizieren zu können (Tabelle 2).

Für die Vergleichbarkeit des Fallenmaterials wurde zudem monatlich das Umgebungswasser beprobt. Hierfür wurde Seewasser aus 1 m Tiefe über einen Siebturm filtriert. Dabei entstand aufgrund der fünf unterschiedlichen Maschenweiten der Siebe (50µm, 125µm, 300µm, 600µm, 1000µm) eine Fraktionierung. Dieses Probenmaterial wurde ebenfalls zur Analyse von MP auch zum ICBM gesendet und wartet derzeit auf die Analyse.

Tabelle 2: Probenprotokoll der Sedimentfallen

Datum	Dauer des Einsatzes (Tage)	Latitude	Longitude	Tiefe [m]	Probentyp
28.02.2022	NaN	54,32174	10,02825	NaN	NaN
14.04.2022	45	54,32174	10,02825	5	Sample
14.04.2022	45	54,32174	10,02825	5	Controll
14.04.2022	45	54,32174	10,02825	9	Sample
14.04.2022	45	54,32174	10,02825	9	Controll
04.05.2022	20	54,32174	10,02825	5	Sample
04.05.2022	20	54,32174	10,02825	5	Controll
04.05.2022	20	54,32174	10,02825	9	Sample
04.05.2022	20	54,32174	10,02825	9	Controll
13.07.2022	70	54,32174	10,02825	5	Sample
13.07.2022	70	54,32174	10,02825	5	Controll
13.07.2022	70	54,32174	10,02825	9	Sample
13.07.2022	70	54,32174	10,02825	9	Controll
01.09.2022	NaN	54,32174	10,02825	NaN	NaN
23.11.2022	83	54,32174	10,02825	5	Sample
23.11.2022	83	54,32174	10,02825	5	Controll
23.11.2022	83	54,32174	10,02825	9	Sample
23.11.2022	83	54,32174	10,02825	9	Controll
20.01.2023	58	54,32174	10,02825	5	Sample
20.01.2023	58	54,32174	10,02825	5	Controll
20.01.2023	58	54,32174	10,02825	9	Sample
20.01.2023	58	54,32174	10,02825	9	Controll
02.02.2023	13	54,32174	10,02825	5	Sample
02.02.2023	13	54,32174	10,02825	5	Controll
02.02.2023	13	54,32174	10,02825	9	Sample
02.02.2023	13	54,32174	10,02825	9	Controll
02.02.2023	NaN	54,32174	10,02825	NaN	MilliQ BLK

Das Probenmaterial der Sinkstofffallen setzte sich aus acht verschiedenen Polymeren zusammen (Abbildung 14). Sichtbar ist, dass in 8 von 10 Fallenproben der größte prozentuale Anteil von MNP durch Polyvinylchloride (PVC) bestimmt wird. Die PVC-Quelle ist uns nicht bekannt. Die Zusammensetzung der Polymere unterscheidet sich in den Tiefen. Während auf 5 m Tiefe die Zusammensetzung sehr variable war, wurde auf 9 m Tiefe größtenteils PVC detektiert. Die unterschiedliche Zusammensetzung von MNP deutet auf eine Segregation durch Dichteunterschiede und den daraus resultierenden Sinkgeschwindigkeiten hin. Im Durchschnitt ist in 9 m Tiefe eine Polymerart mehr detektiert worden als in 5 m.

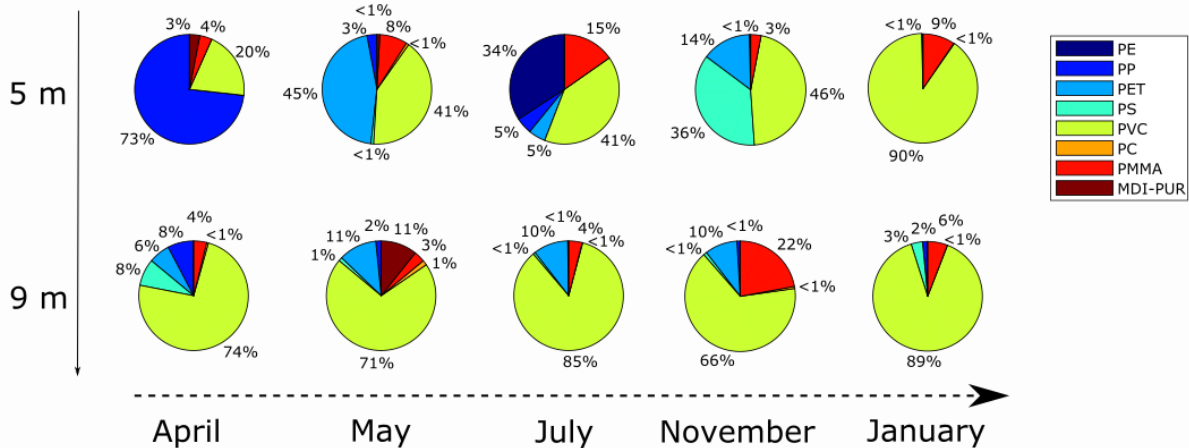


Abbildung 14: Charakterisierung von Kunststoffpolymeren <10µm in den Sedimentfallen

Die Charakterisierung des MNP's über zwei Tiefen wird ergänzt durch die Beschreibung des saisonalen Verlaufs des Export-Flusses.

In Abbildung 15 ist der Fluss von MNP (obere Grafik) in die Tiefe dargestellt. Sie zeigt einen höheren Partikelfluss in 5 m am zweiten Messpunkt (Mai 2022) mit 146,45 µg/m²d. Die restlichen Messpunkte haben in 5 m einen geringeren Partikelfluss als in 9 m. Insgesamt variiert der MNP- Fluss von 3,52 µg/m²d bis 146,45 µg/m²d mit kontinuierlichem Anstieg des MNP Export-Flusses in 9m Tiefe über das Jahr. In Abbildung 15 ist auch der Fluss von partikulärem organischem Kohlenstoff (POC) gezeigt (untere Grafik), der dem saisonalen Verlauf des MNP Export-Flusses grundsätzlich ähnelt. Auch der POC Fluss zeigt ein deutliches Maximum am Messpunkt im Mai (1434 mg/m²d). Hingegen wurde in 9 m eine geringere Variation im saisonalen Verlauf des POC Exportes festgestellt.

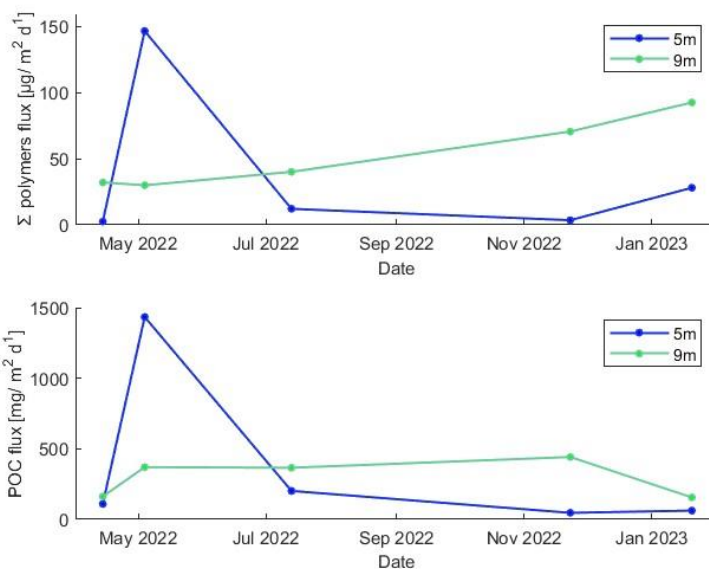


Abbildung 15: Saisonaler Verlauf von Mikroplastik und partikulärem Kohlenstoff in den Sedimentfallen

Werden beide gemessenen Parameter verglichen, wird sichtbar, dass der Fluss von MNP und POC in 5 m Tiefe sich im Winter ähnlich verhält, während sich Frühling und Sommerflüsse sowohl auf 5m als auch 9 m unterscheiden.

Für die Vergleichbarkeit des Fallenmaterials wurde zudem monatlich das Umgebungswasser beprobt, wie in Abbildung 16 dargestellt. POC Konzentrationen verhalten sich über die Wassersäule und im Jahresverlauf ähnlich. Ein erstes, kleines Maximum ist im April zu erkennen, gefolgt von einem großen Maximum im Juli. Die Frühjahrsblüte, welche in Boknis Eck ab Februar bis März initiiert wird, wird von Diatomeen dominiert (Wasmund et al, 2008). Deutlich wird das durch die hohe Konzentration an biologischem Silikat im Frühjahr (5,80 $\mu\text{mol}/\text{L}$). Die hohe Konzentration lässt Rückschlüsse auf den MNP-Fluss der Sedimentfallen zu. Es ist möglich, dass die von Diatomeen produzierte Biomasse zu Aggregatbildung führt und als „Fahrstuhl“ für MNP in die Tiefe dienen kann. Die Sommerblüte wird von Juni bis Juli initiiert und ist charakterisiert durch Dinoflagellaten und Diatomeen (Wasmund et al. 2008). Eine niedrige Produktivität ist in den Wintermonaten zu sehen, welches die geringe Konzentration an BSI und POC zeigt.

Zusammenfassend konnten wir die Sedimentfalle erfolgreich über zehn Monate in der Kieler Bucht aussetzen. Weiter war es möglich zu zeigen, dass wir über den zeitlichen Verlauf einen saisonalen Trend an MNP haben und die Komposition der Fallenproben charakterisieren konnten. Die Daten sollen in 2024 in einer Masterarbeit (Sandra Golde, Vertikaler Fluss von Mikroplastikpartikeln unter dem Einfluss von biotischen Einflüssen in der Eckernförder Bucht) genauer ausgewertet und anschließend publiziert werden.

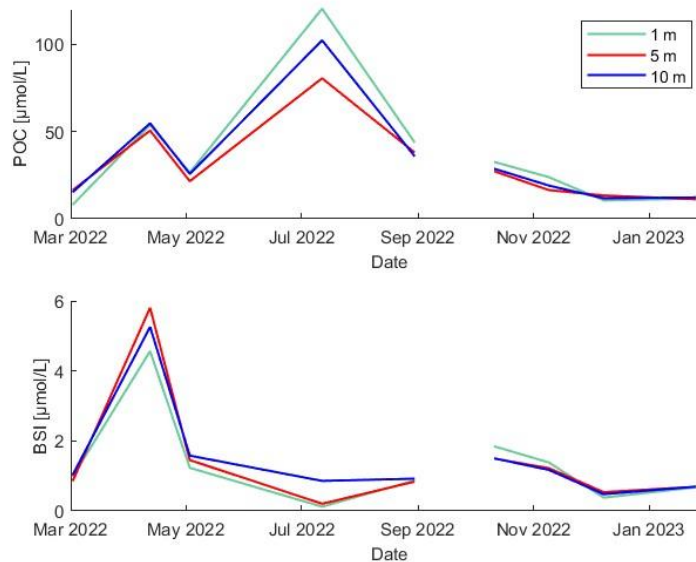


Abbildung 16: Saisonaler Verlauf des Umgebungswasser von POC und BSI in der Kieler Bucht

Zur weiteren Untersuchung des vertikalen Exports von Mikroplastik wurden auch Proben einer früheren Studie im Nordatlantik ausgewertet, die nicht mit verankerten Fallen, sondern mit treibenden Sinkstofffallen genommen wurden). Die Ergebnisse wurden 2022 in der Zeitschrift *Environmental Science & Technology* publiziert und lieferte zum ersten Mal *in situ* gemessene vertikale Flüsse von Mikroplastik in den tiefen Ozean (Galgani et al., 2022). Mit den treibenden Sedimentfallen im Nordatlantikwirbel von 50 m bis in 600 m Tiefe konnten wir zeigen, dass durch biogene Polymere wie TEP Plastik in schnell sinkende Partikel, auch bekannt als Meeresschnee, eingebettet werden. Der Exportfluss einiger Plastikkomponenten konnte mit dem Exportfluss von TEP in Zusammenhang gebracht werden (Abbildung 17). Darüber hinaus zeigten wir, dass der in Kunststoff enthaltene Kohlenstoff bis zu 3,8 % des gesamten vertikalen Exportflusses von partikulärem organischem Kohlenstoff ausmachen kann. Unsere Ergebnisse werfen ein Licht auf wichtige Prozesse, die den Transport von Mikroplastik in marinen Systemen regulieren, und auf mögliche Wechselwirkungen mit dem marinen Kohlenstoffkreislauf. Sie deuten darauf hin, dass Mikroplastik durch die "biologische Plastikpumpe" aus der oberen Wassersäule entfernt wird.

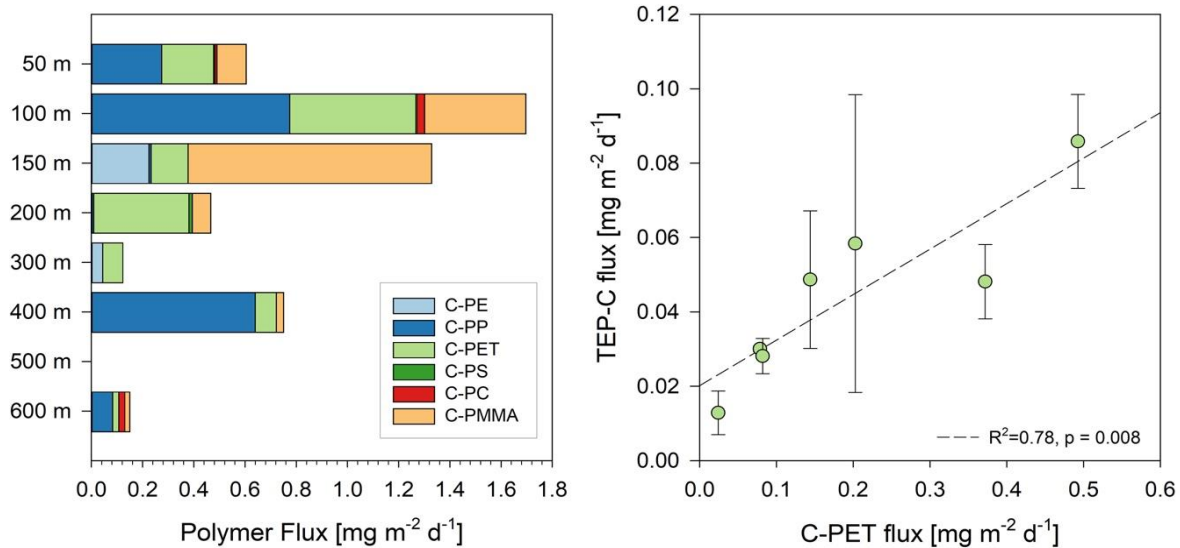


Abbildung 17. Links: Flüsse der verschiedenen Kunststoffpolymertypen, die beim Einsatz von treibenden Sinkstofffallen beobachtet wurden. Die Proben wurden um die PIT-Kontroll-Rohlinge korrigiert und es sind nur Polymercluster mit positiven Werten nach der PIT-Kontroll-Leerwertkorrektur dargestellt. Rechts: Lineare Regression zwischen den TEP-C- und C-PET-Massenströmen (PIT-kontroll-blank-korrigiert)

2. Voraussichtlicher Nutzen und Verwertbarkeit

2.1. Wirtschaftliche Erfolgsaussichten

Das Projekt verfolgt keine wirtschaftlichen Zwecke.

Unsere Erkenntnisse und Daten werden nach Publikation öffentlich zur Verfügung stehen und können somit Eingang in Modell- und Synthesestudien sowie in Risikoschätzungen finden.

2.2. Wissenschaftliche und/oder technische Erfolgsaussichten

Die Ergebnisse des Projektes wurden und werden in internationalen biologisch, ozeanographischen Fachzeitschriften oder übergreifenden Journalen publiziert. Des Weiteren wurden Ergebnisse auf internationalen Konferenzen (z.B. AGU/ASLO) präsentiert. Die Beobachtungs- und Messdaten des Projektes wurden und werden entsprechend dem Datenmanagementkonzept am GEOMAR sowie in der globalen PANGAEA-Datenbank (www.pangaea.de) archiviert und stehen damit auch anderen interessierten Wissenschaftlern und der Öffentlichkeit zur Verfügung. Die Veröffentlichung von Ergebnissen in der wissenschaftlichen Literatur hat eine Werbewirkung für die deutsche Meeresforschung, aus der Bedarf an Expertise, Techniken und Geräten entstehen kann. Die messtechnischen Anwendungen tragen dazu bei, die Bedeutung dieser Methoden für Untersuchungen von MP und organischen Substanzen im Ozean hervorzuheben und weiter international zu etablieren.

Studenten, Doktoranden und promovierten Wissenschaftler wurden Möglichkeiten zur und Unterstützung bei der internationalen Vernetzung geboten. Entsprechend hat FACTS beigetragen, die Arbeiten/Studien der Nachwuchswissenschaftler/Innen international sichtbar zu machen. Im Rahmen von FACTS wurden eine Bachelor- und eine Masterarbeit bis 2023 abgeschlossen, eine weitere Masterarbeit befindet sich in der Durchführung.

2.3. Wissenschaftliche und wirtschaftliche Anschlussfähigkeit

Die Messdaten wurden und werden nach erfolgter Publikation in Datenbanken archiviert und stehen damit auch anderen interessierten Wissenschaftlern und der Öffentlichkeit zur Verfügung. Das Projekt wird die internationale Meeresforschung voranbringen, weil grundlegende Merkmale wie die räumliche und zeitliche Variabilität von Prozesse, die die

Verteilung von MP im Meer steuert wesentlich umfassender als bisher erforscht und erfasst werden. Eine wissenschaftliche Anschlussfähigkeit besteht hinsichtlich Untersuchungen der Beprobung von Plastik in der Umwelt. Die in FACTS gewonnenen Expertisen haben zur Einwerbung weiterer Projekte mit Zielsetzung Plastik im Meer beigetragen. Explizit sind diese das EU Projekt ‚Land-Based Solutions of Plastics in the Sea (LABPLAS)‘, das Interreg 6a Projekt ‚Technological platform for micro-and nanoplastics tracking (PlastTrack)‘ und das EU Project ‚Innovative Community Engagement for Building Effective Resilience and Arctic Ocean Pollution Control Governance in the Context of Climate Change (ICEBERG)‘

3. Fortschritt auf dem Gebiet des Vorhabens bei anderen Stellen

In Bezug auf die wissenschaftliche Arbeiten, die in diesem TP vorgenommen, sind keine vergleichbaren Arbeiten in anderen Stellen oder Fortschritte auf dem Gebiet der verwendeten Methoden bekannt geworden, die dem Vorgehen und den bisher erzielten Ergebnissen widersprechen.

4. Erfolgte oder geplante Veröffentlichungen

Begutachtete Publikationen:

Galgani, L., Goßmann, I., Scholz-Böttcher, B., Jiang, X., Liu, Z., Scheidemann, L., Schlundt, C. and Engel, A. (2022). Hitchhiking into the Deep: How Microplastic Particles are Exported through the Biological Carbon Pump in the North Atlantic Ocean. *Environmental Science & Technology*, 56. pp. 15638-15649. DOI 10.1021/acs.est.2c04712.

Galgani, L., Hepach, H., Becker, K. W. and Engel, A. (2023) Sediment Traps: A Renowned Tool in Oceanography Applied to New Marine Pollutants. *Oceanography*, 36 (Suppl. 1). pp. 52-54. DOI 10.5670/oceanog.2023.s1.16.

Präsentationen:

Engel, A. (2023). Lost at Sea: Tracing the Fate of Ocean Plastics. Changing Waters Event. 22.11.2023, Consulate General of India, Kohlhöfen 21, Hamburg.

Galgani, L., Mincer, T. and A. Engel (2023). Capturing plastic fluxes with sediment traps: a well-established platform applied to emerging marine pollutants. *ASLO Aquatic Sciences Meeting 2023*. 4–9 June 2023, 2.3 *Palma de Mallorca*, Spain

Engel, A (2023) WP 3.1.: Aggregation of micro- and nanoplastic. FACTS Final Meeting, 02.06.2023, Palma de Mallorca, Spanien.

Engel A., Gerds, G. und Scholz-Böttcher, B. (2022). WP3: Vertical transport in the water column. FACTS, Midterm Meeting, Lerici, Italien.

Abschlussarbeiten:

Golde, Sandra (2024, geplant). Vertical flux of microplastic particles under the influence of biotic forcing in the Eckernförde Bay. Masterarbeit im Fach Umweltwissenschaften, Universität Koblenz

Schargott Celine, (2023). Aggregate formation of microplastic particles and consequences for their export in the marine water column: An experimental study. Bachelorarbeit im Fach Biologie, Universität Osnabrück.

Fink, Christine (2021) ‚Verfolgung von Mikroplastikpartikeln und ihrer Wechselwirkung mit organischem Material im Meerwasser durch Fluoreszenz Färbung. Masterarbeit im Fach Chemie und Biotechnologie, Fachhochschule Aachen.

Literatur

- Cole, M.; Webb, H.; Lindeque, P. K.; Fileman, E. S.; Halsband, C.; Galloway, T. S. Isolation of microplastics in biota-rich seawater samples and marine organisms *Sci. Rep.* 2014, 4, 4528 DOI: 10.1038/srep04528
- Donnelly, R. J. (1991). Taylor-Couette flow: The early days. *Physics Today*, 44(11), 32-39.
- Engel, A. The role of transparent exopolymer particles (TEP) in the increase in apparent particle stickiness (α) during the decline of a diatom bloom. *Journal of Plankton Research* 2000, 22(3), 485-497. DOI: 10.1093/plankt/22.3.485
- Fischer, M., & Scholz-Böttcher, B. M. (2019). Microplastics analysis in environmental samples—recent pyrolysis-gas chromatography-mass spectrometry method improvements to increase the reliability of mass-related data. *Analytical methods*, 11(18), 2489-2497.
- Galgani, L., Hepach, H., Becker, K. W. and Engel, A. (2023) Sediment Traps: A Renowned Tool in Oceanography Applied to New Marine Pollutants. *Oceanography*, 36 (Suppl. 1). pp. 52-54. DOI 10.5670/oceanog.2023.s1.16.
- Hengstmann, E., & Fischer, E. K. (2019). Nile red staining in microplastic analysis—proposal for a reliable and fast identification approach for large microplastics. *Environmental monitoring and assessment*, 191, 1-9.
- Hu, Y.; Guo, T.; Ye X.; Li, Q.; Guo, M.; Liu, H.; Wu, Z. Dye adsorption by resins: Effect of ionic strength on hydrophobic and electrostatic interactions *Chemical Engineering Journal*, 2013 DOI: 10.1016/j.cej.2013.04.116
- Kjørboe, T., Andersen, K. P., & Dam, H. G. (1990). Coagulation efficiency and aggregate formation in marine phytoplankton. *Marine Biology*, 107, 235-245.
- Lu, S., Zhu, K., Song, W., Song, G., Chen, D., Hayat, T., ... & Sun, Y. Impact of water chemistry on surface charge and aggregation of polystyrene microspheres suspensions. *Science of the total environment* 2018, 630, 951-959. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2018.02.296
- Maes, T., Jessop, R., Wellner, N., Haupt, K., & Mayes, A. G. (2017). A rapid-screening approach to detect and quantify microplastics based on fluorescent tagging with Nile Red. *Scientific reports*, 7(1), 44501.
- Meng, S., Liu, Y. New insights into transparent exopolymer particles (TEP) formation from precursor materials at various Na⁺/Ca²⁺ ratios. *Sci Rep*, 19747, 2016. <https://doi.org/10.1038/srep19747>
- Mintenig, S. M.; Int-Veen, I.; Löder, M. G. J.; Primpke, S.; Gerdts, G. Identification of microplastic in effluents of waste water treatment plants using focal plane array-based micro-Fourier-transform infrared imaging *Water Res.* 2016, 108, 365– 372 DOI: 10.1016/j.watres.2016.11.015
- Shanks, A. L., & Edmondson, E. W. (1989). Laboratory-made artificial marine snow: a biological model of the real thing. *Marine Biology*, 101, 463-470.
- van Duuren, F. A. (1968). Defined velocity gradient model flocculator. *Journal of the Sanitary Engineering Division*, 94(4), 671-682.
- Wasmund, N., Göbel, J., & Bodungen, B. V. (2008). 100-years-changes in the phytoplankton community of Kiel Bight (Baltic Sea). *Journal of Marine Systems*, 73(3-4), 300-322.