

Aufnahme marinen Kunststoffmülls durch Seevögel und ihre Folgen Eine kritische Übersicht

Ulrich Schwantes

Ingestion of marine plastic debris by seabirds and its impacts – a critical review

The pollution of our planet's marine environment with plastic waste is an increasingly problematic global issue. Photochemical and mechanical processes break down these plastic particles to the levels of micro- and nanoplastic. They contain various toxic additives that can either be leached from the synthetic matrix or be adsorbed from the seawater and accumulated, similar to persistent organic pollutants (POPs) and heavy metals. Seabirds typically ingest plastic particles in two ways: either passively through their food (micro- and nanoparticles) or actively (larger pieces). The latter may be caused by olfactory or visual stimulations, though a comprehensive scientific explanation of this behaviour does not yet exist.

The pathological and toxicological consequences of an active ingestion of plastic likely increase the longer the particle remains in the seabird's body. Some seabird species can actively dispose of such fragments through regurgitation, while other species are unable to do so. Insofar as the seabirds are not able to regurgitate the particles, the plastic will remain in the bird's stomach. Whether the gizzard of seabirds is actually capable of crushing plastic particles – and, if so, how quickly they will be disposed of via the intestine – is still unknown and will require further research.

Transmission of plastic particles and connected substances to other seabirds can either occur within the same species, by feeding their chicks, or from one species to another through predator-prey relationships.

The accumulation of plastic particles in a seabird's stomach may lead to a reduced food intake, generally weakening the organism, as well as obstructions in or injuries to the upper gastrointestinal tract. In some cases these effects can be lethal. Furthermore, the ingestion of plastic may lead to endocrine disruptions, neurotoxic or carcinogenic effects, and may negatively impact the immune system of seabirds. These effects can be caused by the particles' inherent toxicological potential, additives contained in the plastic, or by the POPs adsorbed from the seawater.

The increasing concentration of heavy metals in the marine environment, and their proven interaction with plastic particles, raises the question of whether ingested plastic particles also lead to an increased concentration of toxic heavy metals in seabirds. Mercury, for example, accumulates in the endocrine glands of seabirds and leads to disruptions of the hypothalamic-pituitary-axis, resulting in impaired prolactin and luteinizing hormone secretion. While observations have been made that seabirds inhabiting areas with higher concentrations of lead and mercury generally exhibit higher concentrations of these metals in their tissues, no controlled studies exist looking at whether and to what extent that is caused by heavy metals leached from plastic particles.

Dr. Ulrich Schwantes, Windbühl 6b, 96129 Strullendorf, Deutschland
E-Mail: ulrich.schwantes@jordsand.de

Einleitung

Die Belastung der Meere durch Kunststoffabfälle ist ein heute viel diskutiertes globales Problem, denn Kunststoffabfälle finden sich flottierend im

Meerwasser, auf dem Meeresgrund und an Stränden. Kunststoffe stellen den wichtigsten Anteil der durch menschliche Aktivitäten in die Meere gelangten Abfälle dar (Galgani et al. 2015). In einigen Meeresbereichen bestehen nahezu 100 %

Tab. 1. Anzahl der Seevogelarten, bei denen die Aufnahme von marinen Abfällen dokumentiert ist, und ihre systematische Zuordnung. – *Number of seabird species for which marine debris ingestion has been documented and their systematic assignment.* (extrahiert aus Kühn und van Franeker 2020)

Ordnung	Familie	Anzahl der Arten
Röhrennasen (Procellariiformes)	Sturmschwalben (Oceanitidae)	5
	Wellenläufer (Hydrobatidae)	6
	Albatrosse (Diomedidae)	16
	Sturmvögel (Procellariidae)	64
Gänsevögel (Anseriformes)	Entenverwandte (Anatidae)	2
Pinguine (Sphenisciformes)	Pinguine (Spheniscidae)	5
Tropikvögel (Phaethontiformes)	Tropikvögel (Phaethontidae)	2
Regenpfeifervögel (Charadriiformes)	Scheidenschnäbel (Chionidae)	1
	Schnepfenverwandte	2
	Möwenverwandte (Laridae)	35
	Raubmöwen (Stercorariidae)	6
	Alke (Alcidae)	14
Ruderfüßer (Suliformes)	Fregattvögel (Fregatidae)	1
	Tölpel (Sulidae)	7
	Scharben (Phalacrocoracidae)	7

der schwimmenden Abfälle aus Kunststoffen unterschiedlichster Qualitäten (Galgani et al. 2015). Bedingt durch die Dynamiken globaler Meeresströmungen und Wind entstehen in den Ozeanen wirbelartige Akkumulationszonen schwimmenden Abfalls (Moore et al. 2001, Galgani et al. 2015). Diese befinden sich häufig in der Nähe von marinen Schutzgebieten (MPAs), sodass dort brütende Seevögel bei Nestbau und Nahrungssuche verstärkt mit solchen Abfällen konfrontiert werden (Luna-Jorquera et al. 2019).

Auch in den Mägen vieler Seevögel finden sich Kunststoffteile, die aktiv aufgenommen wurden. Kühn und van Franeker (2020) listen global 173 Seevogelarten aus 6 unterschiedlichen Ordnungen auf (Tab. 1), bei denen die Aufnahme von Abfällen unterschiedlicher Größe dokumentiert ist.

Hieraus wird deutlich, dass die Aufnahme von Kunststoffabfällen durch Seevögel weit verbreitet und nicht nur das Problem einer Ordnung oder weniger Arten ist. Besondere Relevanz erhält

die Thematik auf Grund der Tatsache, dass es sich bei Seevögeln um langlebige Vogelarten handelt, die ganz überwiegend nur ein Junges pro Jahr aufziehen. Schädliche Wirkungen, die aus der Aufnahme von Plastik für Seevögel resultieren, könnten einer der Faktoren sein, die hinter den negativen Trends der Populationsentwicklungen zahlreicher Seevogelarten stehen.

Die vorliegende Übersicht diskutiert anhand aktueller Literaturdaten, warum verschiedene Seevogelarten aktiv Plastikteile aufnehmen und welche Folgen hiermit sowie mit der passiven Aufnahme von Mikro- und Nanoplastik für diese Tiere verbunden sind.

Methodik

Als Seevögel werden in diesem Review langlebige Vögel aus verschiedenen Ordnungen definiert, die mit ihrer Lebensweise ganz überwiegend an das Meer gebunden sind, d. h. Vögel, die lediglich für das Brutgeschäft Küstenareale aufsu-

chen. Hierzu zählen unter anderem Procellariiformes (z. B. Albatrosse, Sturmvögel, Sturmschwalben), Pinguine (Sphenisciformes), Tölpel (Sulidae) und Alken (Alcidae).

Zur Identifizierung des aktuellen Kenntnisstandes wurden Datenbank-Recherchen in PubMed, MEDLINE und GOOGLE Scholar zu folgenden Aspekten durchgeführt: olfaktorische Fähigkeiten verschiedener mariner Vogelordnungen, Orientierung mittels olfaktorischer Reize, Anatomie des olfaktorischen Systems, Plastikabfall in den Meeren, Besiedlung von Plastikabfall, Ingestion von Plastik, Adsorption von persistierenden organischen Stoffen und Schwermetallen an marinem Plastikabfall, toxikologische Effekte von persistierenden organischen Stoffen, Kunststoffen und in Kunststoffen enthaltenen Additiven sowie Schwermetallen auf Seevögel.

Weitere Recherchen ergaben sich auf Grund spezifischer Fragestellungen. Artikel, die sich mit Auswirkungen von Kunststoffabfall auf den äußeren Vogelkörper befassen (z. B. Verstrickungen in Netzen und Seilen), wurden von der Bewertung ausgeschlossen.

Die wissenschaftlichen Bezeichnungen der Vogelarten folgen der von del Hoyo und Collar (2014) verwendeten Nomenklatur. Die deutschsprachige Benennung der Vogelarten entspricht der von Barthel et al. (2020) publizierten Liste der offiziellen deutschen Vogelnamen.

Ergebnisse und Diskussion

Wie finden Seevögel ihre Nahrung?

Visuelle Wahrnehmung. Seevögel im Sinne der in diesem Artikel benutzten Definition leben über Monate ausschließlich auf dem Meer und suchen dabei gezielt Areale auf, die durch hohen Nahrungsreichtum gekennzeichnet sind. Um solche Gebiete auf der aus menschlicher Sicht einheitlich wirkenden Oberfläche der Ozeane zu identifizieren, nutzen sie visuelle Informationen. Diese sind z. B. flächige grüne Verfärbungen des Meerwassers, die in Arealen mit stark ausgeprägten Gradienten von Temperatur und Nährstoffen auftreten, wie sie an strömungsbedingten ozeanischen Fronten, d. h. Arealen mit aufsteigenden Wassermassen und Schelfkanten, zu finden sind. Durch die lokale Mischung kalter, nährstoffreicher Wassermassen mit warmen, nährstoffarmen Wassermassen entsteht an diesen Grenzbereichen eine

hohe Planktonproduktivität und eine deutlich erhöhte Biodiversität, welche die Basis für eine reiche tierische Nahrungskette darstellt (Ramadayan 2017, Weimerskirch 2007, Baduini und Hyrenbach 2003, Bost et al. 2009). So nutzen Atlantiksturmtaucher *Puffinus puffinus* die grüne Verfärbung des Meerwassers offensichtlich als Hinweis auf eine hohe Dichte kleiner Fische als Beutetiere, denn bei mit GPS-Loggern versehenen Vögeln lösten lokal erhöhte Chlorophyll-Konzentrationen des Meerwassers das Nahrungssuchverhalten bei diesen Tieren aus (Kane et al. 2020).

Als visuelle Informationsträger werden auch Ansammlungen beutefangender Vögel der gleichen Art oder anderer Arten, oder die Aktivitäten anderer Prädatoren, wie z. B. von Walen, Robben oder Thunfischen, genutzt (Bost et al. 2009, Fort et al. 2012, Veit und Harrison 2017, Brooke 2018). Anhand von Daten, die von mit GPS-Loggern versehenen Seevögeln stammten und die mit den von Fischereifahrzeugen ausgesandten Radarimpulsen bzw. GPS-Daten abgeglichen wurden, konnte für Albatrosse und Basstölpel belegt werden, dass auch die Anwesenheit von Fischereibooten zu einem verstärkten Beutesuchverhalten der Seevögel in diesen Regionen führte (Corbeau et al. 2019, Patrick et al. 2015).

Bei zahlreichen Seevogelarten, insbesondere aus der Ordnung der Röhrennasen (Procellariiformes), spielt neben der visuellen Wahrnehmung aber auch der Geruchssinn eine oftmals sehr wichtige Rolle bei der Nahrungssuche und Orientierung.

Der Geruchssinn als Orientierungshilfe. Auf einen bei Röhrennasen wie Albatrossen, Sturmvögeln und Sturmschwalben sehr gut ausgebildeten Geruchssinn lassen der stark ausgebildete Riechkolben (*Bulbus olfactorius*) und die Histologie der neuroanatomischen Gegebenheiten bei den wenigen untersuchten Spezies schließen (Nevitt 2008). So beträgt zum Beispiel beim Eissturmvogel *Fulmarus glacialis* die Anzahl von Mitralzellen im *Bulbus olfactorius*, also den neuronalen Zellen, die die Aktionspotentiale der olfaktorischen sensorischen Neurone von den Geruchsrezeptoren an höhere Hirnregionen weiterleiten, das 6-Fache der von Mäusen und das 2-Fache der von Ratten (Wenzel und Meisami 1987). Auch die Riechschleimhaut von Wellenläufern *Hydrobates leucorhous* weist eine sehr hohe Anzahl olfaktorischer Rezeptor-Gene auf (Sin et al. 2022). Dass diese außergewöhnlichen neuroanatomischen Gege-

benheiten tatsächlich mit hohen Riechleistungen der Seevögel korrelieren, zeigten kontrollierte Experimente an verschiedenen Vertretern der Procellariiformes. So fanden sich Kapsturmvögel *Daption capense* und Riesensturmvögel *Macronectes giganteus* innerhalb weniger Minuten an solchen Stellen der Meeresoberfläche ein, an denen zuvor mit Krill-Extrakt angereichertes Pflanzenöl ausgebracht worden war. Pflanzenöl ohne Krill-Extrakt war für diese Vögel hingegen nicht attraktiv (Nevitt 1999). Vergleichbare Reaktionen beobachtete man auch bei der oberflächlichen Ausbringung von Pyrazin, einem stark riechenden Stoff, der bei der Zersetzung von Krill entsteht: Kapsturmvögel, Riesensturmvögel, Weißkinnsturmvögel *Procellaria aequinoctialis* und Schwarzbrauenalbatrosse *Thalassarche melanophris* präferierten Pyrazin eindeutig vor dem als Kontrolle ausgebrachten Pflanzenöl ohne zugesetztem Duftstoff (Nevitt et al. 2004). Fischöl aus Heringen war bei den gleichen Röhrennasenarten und zudem bei Wanderalbatrossen *Diomedea exulans*, Schwarzbauch-Sturmschwalben *Fregatta tropica* und unterschiedlichen Sturmvögeln deutlich attraktiver als reines Pflanzenöl als Kontrolle (Nevitt et al. 2004). Andere Arten von Röhrennasen reagierten hingegen ebenso wenig wie Pinguine und Raubmöwen auf mit Duftstoffen versetzte Ölflecken auf der Meeresoberfläche (Nevitt et al. 2004).

Als olfaktorische Signale wirkten auch das bei Zersetzungsprozessen von Aminosäuren entstehende Ammoniak bei Küken des Blausturmvogels *Halobaena caerulea* und bei Eissturmvögeln sowie der Geruch von Trimethylamin bei Wellenläufern (Nevitt et al. 2006, Clark und Shah 1992, Nevitt und Hunt 1996). In Experimenten lockte Fischgeruch alle Röhrennasenarten an (Nevitt 2008).

Als weitere attraktive Geruchsstoffe für Seevögel erwiesen sich das Dimethylsulfoniumpropionat (DMSP) und dessen Abbauprodukt, das Dimethylsulfid (DMS). DMSP wird von vielen Phytoplankton-Arten gebildet und dient physiologisch als Osmoregulator und Antioxidans. Freigesetztes DMSP wirkt als Chemo-Attraktant und leitet Bakterien und Prädatoren zum Plankton hin (Übersicht bei Cirri und Pohnert 2019). Wenn planktonische Algen absterben oder wenn Zooplankton Algen des Phytoplanktons frisst, wird DMSP enzymatisch in DMS abgebaut und in das Seewasser und die Atmosphäre freigesetzt (Simó et al. 2018). Dabei besteht eine Korrelation zwischen der Biomasse des Zooplanktons und den

Konzentrationen von DMS im Meerwasser sowie in der darüber liegenden Luft, sodass auftretende DMS-Gradienten von Prädatoren als Hinweis auf einen lokalen Nahrungsreichtum gewertet werden könnten (Owen et al. 2021). Der Geruch von DMS wirkt in der Tat attraktiv auf Prädatoren, wie Invertebraten (z. B. Krebstiere), Meeresschildkröten, Wale und Seevögel (Breckels et al. 2013, Endres und Lohmann 2012, Bouchard et al. 2019, Nevitt und Bonadonna 2005). Die Ergebnisse der zahlreichen experimentellen Untersuchungen mit unterschiedlichen Duftstoffen zeigen, dass einige Röhrennasenarten, aber auch Brillenpinguine *Spheniscus demersus* DMS als attraktiv empfinden (Cunningham et al. 2008), während andere auf andere Duftstoffe reagieren. Bei den Arten, bei denen DMS kein Nahrungssuchverhalten auslöst, z. B. dem Eissturmvogel der Nordhalbkugel, wirken Pyrazin, Dorsch-Leberöl oder Ammoniak attraktiv (Mitkus et al. 2016, Agler et al. 2000, Nevitt und Hunt 1996).

Diese Präferenzen korrelieren dabei nicht immer mit dem Duft, der für die bevorzugte Beute typisch ist (Nevitt 2008). Auffällig ist, dass Krebstiere bei den auf DMS reagierenden Röhrennasen einen überwiegenden Anteil an der Nahrung ausmachen, während sich die Nahrung der nicht auf DMS reagierenden Röhrennasen-Arten gleichmäßig auf Tintenfische, Fische und Krebstiere verteilen (Savoca und Nevitt 2014).

Veränderungen des marinen Kunststoffabfalls

Der Abbau von Kunststoffteilen erfolgt im Meerwasser nur oberflächennah durch UV-Strahlung oder mechanisch durch Wellen. Biologische Abbauprozesse sind in der marinen Umwelt zu vernachlässigen (Andrady 2015). Durch die photochemischen und physikalischen Zerfallsprozesse entstehen aus größeren Teilen kleinere und letztlich sekundäres Mikro- (0,1–5000 µm) sowie Nanoplastik (<0,1 µm) (Caputo et al. 2021, Gruber et al. 2022, Abb. 1). Zusammen mit dem in die Meere eingetragenen primären Mikroplastik, z. B. aus Produkten der chemischen und kosmetischen Industrie, treiben diese Kleinpartikel, bedingt durch ihre im Vergleich zu Meerwasser geringere Dichte, überwiegend an der Wasseroberfläche (Galgani et al. 2015). Die geringe Partikelgröße führt dazu, dass Mikro- und Nanoplastik von Zooplankton aufgenommen werden kann und so in die Nahrungskette gelangt (Andrady 2015).

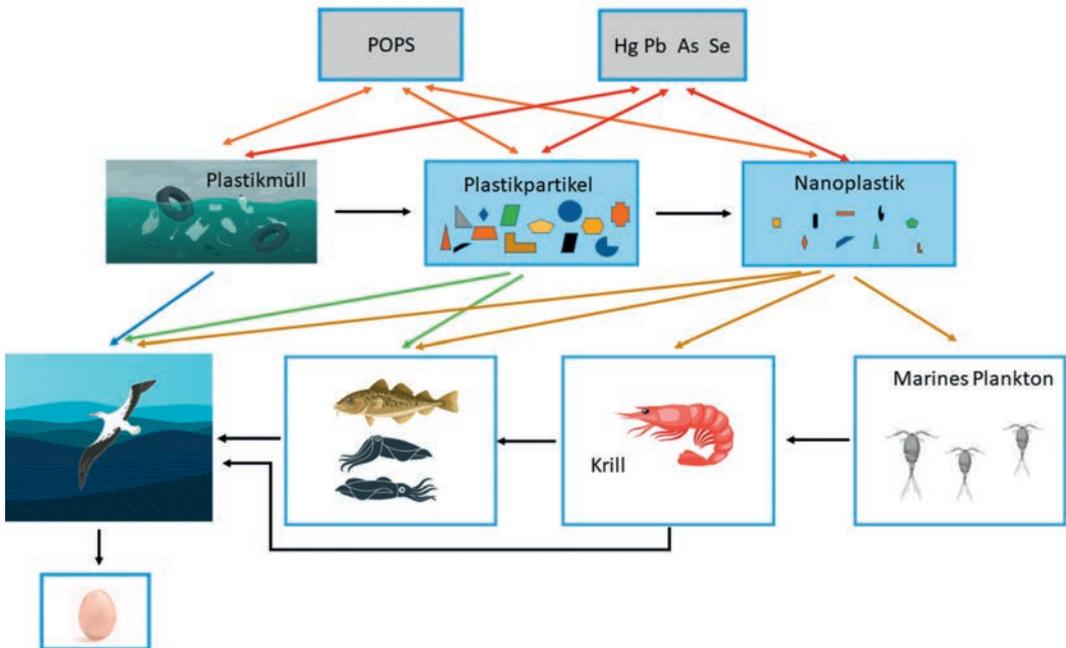


Abb. 1. Schematische Darstellung der Veränderung marinen Plastikmülls, der Interaktionen von POPs und Schwermetallen mit Plastikpartikeln sowie der drei Kontaminanten in der marinen Nahrungskette mit Seevögeln als Spitzen-Prädatoren. – *Schematic representation of changes in marine plastic debris, interactions of POPs and heavy metals with plastic particles, and the three contaminants in the marine food chain with seabirds as top predators* (einzelne Teile der Grafik lizenziert von iStockphoto.com).

Auf der nächsten Stufe der Nahrungskette sind hier in erster Linie Tiere zu finden, die ihre Nahrung über Filterprozesse gewinnen, wie z. B. Muscheln, Krill, Fische, einige Entenarten, aber auch Bartenwale (Andrady 2015, Zantis et al. 2022, Gonçalves et al. 2019, English et al. 2015).

Neben diesen photochemischen und mechanischen Veränderungen lassen sich im Meerwasser an flottierendem Kunststoffmüll zwei weitere Prozesse beobachten. Zum einen bildet sich in marinen Gewässern auf der Oberfläche von Kunststoffteilen schnell ein Biofilm (Lobelle und Cunliffe 2010); d. h. innerhalb weniger Wochen besiedeln bakterielle Zellen die Kunststoffpartikel, die mittels extrazellulärer Polymere strukturierte und komplexe Matrices bilden (Costerton et al. 1995) und so die nachfolgende Besiedlung mit eukaryotischen Einzellern ermöglichen (Wright et al. 2020). Als Energie- und Kohlenstoffquelle nutzen die Bakterien organische Substanzen, die

sich auf der Kunststoffoberfläche anlagern oder die als Additive aus den Kunststoffen herausgelöst werden (Wright et al. 2020).

Wie man experimentell an Nylon-Mikrofaseren zeigen konnte, können Kunststoffe flüchtige Substanzen aus der Umgebung adsorbieren und auch wieder abgeben. Zu diesen flüchtigen Stoffen gehört auch das von Algen freigesetzte DMS. Ruderfußkrebse steigerten ihr Fressverhalten und damit die Aufnahme von Mikroplastik deutlich, wenn man Mikrofasern mit DMS anreicherte. Mikrofasern ohne DMS-Zusatz hingegen änderten das Fressverhalten nicht (Procter et al. 2019). Die Adsorption von DMS an Polypropylen und zwei verschiedene Polyethylene bei Exposition über einen Monat in natürlichem Meerwasser konnten Savoca et al. (2016) belegen. Bei Fischen löste von Kunststoffen abgegebenes DMS die gleichen Fittersuch-Reaktionen aus wie die Verabreichung von natürlichem Futter (Savoca et al. 2017).

Die aktive Aufnahme von Kunststoffpartikeln durch Seevögel

Aus dem Nahrungssuchverhalten, mit der einige Röhrennasen auf DMS in der Atmosphäre reagieren, postulierten Savoca et al. (2016), dass der DMS-Geruch von marinen Plastikteilen diese Vögel verleitet, Kunststoffteile als vermeintliche Beute aus dem Meer aufzunehmen und zu verschlucken. Diese Hypothese ist bis heute Gegenstand einer wissenschaftlichen Diskussion (Dell’Ariccia et al. 2017). Denn die Annahme von Savoca et al. (2016) erklärt nicht hinreichend, warum Plastikteile verschluckt werden, die in Form und Farbe oftmals nicht den natürlichen Beutetieren entsprechen. Das wäre nur dann der Fall, wenn die Vögel den olfaktorischen Reiz stärker als den visuellen bewerten würden. Bereits früher konnte jedoch nachgewiesen werden, dass bei verschiedenen Sturmvogel-Arten gerade die visuelle Farbauswahl bei den aufgenommenen Plastikpartikeln eine wichtige Rolle zu spielen scheint und zwar unabhängig davon, ob diese Vögel auf DMS reagieren oder nicht (Ryan 1987, Dell’Ariccia et al. 2016). Spezifische Farbpräferenzen konnten auch experimentell bei zwei

Alkenarten aufgezeigt werden (Kharitonov 2018). Sowohl die im Nordpazifik lebenden Schopffalken *Aethia cristatella* als auch Krabbentaucher *Alle alle* zeigten Interesse an in den Kolonien ausgebrachten Farbringen oder -scheibchen, wobei weiße oder gelbe Gegenstände präferiert wurden, ganz gleich, ob diese zuvor in Ammoniak getränkt worden waren oder nicht (Kharitonov 2018). Unterstützt wird die These von Savoca et al. (2016) allerdings durch Untersuchungen von Potier et al. (2019) an neuweltlichen Truthahngiern *Cathartes aura* und Schopfkarakaras *Caracara plancus*. Hier konnte gezeigt werden, dass olfaktorische Reize bei beiden Vogelarten gegenüber visuellen Informationen präferiert werden. Dies war unabhängig davon, ob riechende Aas-Stücke oder geruchlose Plastikstücke in farblich identischen perforierten Stahlkugeln präsentiert wurden, oder ob sich die Vögel zuvor an Aas-Stücke in farblich markierten Stahlkugeln gewöhnt hatten und die Aas-Stücke dann in andersfarbigen Kugeln präsentiert wurden (Potier et al. 2019).

Die Frage, ob olfaktorische oder visuelle Reize ausschlaggebend für die Aufnahme von größeren Plastikteilen durch Seevögel sind, bleibt somit offen.

Die Schlussfolgerung von Savoca et al. (2016) erklärt ebenfalls nicht, warum Seevögel, die nicht auf DMS, sondern auf Pyrazin oder andere flüchtige Stoffe reagieren, ebenfalls Plastikteile von der Meeresoberfläche aufnehmen und verschlucken. Es gibt durchaus marine Bakterien, die Pyrazine und Trimethylamin produzieren und diese Substanzen in die Umgebung abgeben (Dickschat et al. 2005, Jameson et al. 2016). Zur Frage, ob diese Bakterien allerdings Kunststoffabfall in der marinen Umwelt besiedeln oder ob Kunststoffpartikel Pyrazine oder Trimethylamin aufnehmen und in signifikanter Konzentration in die Atmosphäre abgeben, konnten keinerlei Literaturhinweise gefunden werden.



Abb. 2. Plastikpartikel aus dem Magen eines erwachsenen, männlichen Eissturmvogels, der tot an der deutschen Küste gestrandet war. Links: sieben verschiedene Fäden und ein Fadenball, oben: sieben Folienstücke, unten: 33 harte Bruchstücke (Fragmente). – *Plastic particles from the stomach of an adult male Fulmar that was beached dead on the German coast. Left: seven different threads and one thread ball, top: seven pieces of foil, bottom: 33 hard fragments* (Aufn.: Jan van Franeker, Wageningen Marine Research).

Dynamische Kräfte und Verweildauer im Gastrointestinaltrakt

Die analysierten Mageninhalte von im Bereich der Nordsee zwischen 2014 und 2018 verstorbener und angespülter Eissturmvögel zeigten, dass in diesem 5-Jahreszeitraum 92 % aller untersuchten Vögel Plastikteile unterschiedlicher Art, Größe und Farbe aufgenommen hatten. Die Anzahl der Plastikteile pro Eissturmvogelmagen lag bei durchschnittlich 21,4 Stück und die durchschnittliche Gesamtmasse pro Magen bei 0,26 g (van

Franecker et al. 2021). Bei den von Seevögeln aufgenommenen Kunststoffteilen handelte es sich um harte Bruchstücke, Kunststofffasern, Stücke aus Kunststoffschäumen und Folienstücke (Jiménez et al. 2015, Cartraud et al. 2019, van Franecker et al. 2021, Roman et al. 2020, Abb. 2).

Die von Seevögeln aufgenommenen Kunststoffstücke unterliegen im Verdauungstrakt Dynamiken, die zu unterschiedlichen Verweildauern der Teile im Vogelkörper führen (Ryan und Jackson 1987, Ryan 1988a, Provencher et al. 2010, van Franecker und Law 2015). Einige Seevögel, wie Kormorane, Möwen, Seeschwalben und Raubmöwen, geben unverdauliche Nahrungsbestandteile und damit auch Kunststoffpartikel in Form von Speiballen von sich, sodass die Dauer der Akkumulation im Gastrointestinaltrakt beschränkt ist (Hays und Cormons 1974, Ryan 1988a, Acampora et al. 2017, Provencher et al. 2019, Yorio et al. 2020). Zwar wird auch bei Eissturmvögeln über das Hervorwürgen von Plastikteilen berichtet (Terepocki et al. 2017), dabei dürfte es sich jedoch eher um das bei dieser Art übliche Speien handeln, mit dem Feinde angespuckt werden und bei dem der ölige Inhalt des Drüsenmagens (Proventriculus) inklusive eventuell enthaltener Plastikstücke entleert wird (van Franecker und Law 2015).

Vom Drüsenmagen gelangen Kunststoffteile in den kleineren Muskelmagen (Ventriculus) der Vögel und sammeln sich dort an (Moser und Lee 1992, van Franecker und Law 2015, Cousin et al. 2015, Floren und Shugart 2017, Jiménez et al. 2015, Abb. 3

und 4). Furness (1985) berichtet, dass bei den am meisten belasteten Seevögeln das Volumen der Plastikteile 59% des Volumens des entspannten Muskelmagens ausmachte. Der Muskelmagen ist auch bei Seevögeln mit einer harten Koilin-Membran ausgekleidet, die die Magenwand gegenüber Magensäure und mechanischen Schäden schützt und die gleichzeitig als Reibplatte zum Zerkleinern fester Nahrungsbestandteile dient (Kim et al. 2016,



Abb. 3. Eröffneter Muskelmagen eines Eissturmvogels, der verschiedene aufgenommene Kunststoffteile enthält. – *Opened gizzard of a Fulmar containing various ingested plastic pieces* (Aufn.: Susanne Kühn, Wageningen Marine Research).

Abb. 4. Aufgeschnittener Magen eines 2020 in den Niederlanden tot aufgefundenen Eissturmvogels. Oben der Proventriculus und darunter der Muskelmagen. Der Magen dieses Vogels wies eine extrem große Menge aufgenommener Kunststoffteile auf. – *Opened stomach of a Fulmar found dead in the Netherlands in 2020. Above: the proventriculus, below: the gizzard. The stomach of this bird contained an extremely large amount of ingested plastic pieces* (Aufn.: Jan van Franecker, Wageningen Marine Research).



den Hartog und Clarke 1996, Zaher et al. 2012, Langlois 2003). Im Muskelmagen werden harte Partikel vermutlich auch bei Seevögeln zerkleinert, wie man aus isolierten Fragmenten von aus Chitin bestehenden Tintenfisch-Schnäbeln und von Fisch-Otolithen schließen kann (Jackson 1988, Colabuono und Vooren 2007, van Franeker und Law 2015). Hinweise auf diese Funktion des Muskelmagens bei Seevögeln erhielt man auch aus Untersuchungen von Kapsturmvögeln, die den Winter in mit Kunststoffen stärker belasteten Meeresbereichen verbringen, deren Nistplätze jedoch in weniger belasteten antarktischen Gewässern liegen (Ryan 1987). Aus der bei diesen Vögeln nach ca. 1,5 Monaten zum Ende des Brutgeschäftes um 80–90 % reduzierten Anzahl von Plastikpartikeln in den Mägen im Vergleich zur Situation bei Beginn der Brutsaison, schließen van Franeker und Law (2015), dass die Plastikteile im Muskelmagen zerkleinert und über den Darm ausgeschieden werden. Ähnliches vermutete Mallory (2008), der zum Ende der Brutsaison tendenziell kleinere Plastikteile im Muskelmagen von Eissturmvögeln vorfand, verglichen mit der Größe der Partikel, die sich zu Beginn der Brutsaison im Drüsenmagen der Tiere befanden. Ryan und Jackson (1987) leiteten aus ihren kontrollierten Untersuchungen an Weißkinn-Sturmvögeln allerdings eine Halbwertszeit für aufgenommene Polyethylen-Kügelchen von einem Jahr ab. Aus den wenigen vorliegenden Untersuchungen wird deutlich, dass die Art, Größe und Form der aufgenommenen Plastikteile sowie die Anwesenheit natürlicher harter Nahrungsbestandteile Faktoren sind, welche die Verweildauer der Plastikteile im Seevogelmagen beeinflussen (Provencher et al. 2017, Nania und Shugart 2021). Bislang liegen aber keine Untersuchungen vor, die exakte Daten zur Zerkleinerung der Plastikteile und deren Verweildauer im Seevogelmagen liefern (Provencher et al. 2017, Nania und Shugart 2021, Ryan 2015).

Zerkleinerte Plastikteile und Mikroplastik passieren den Pylorus und werden letztlich mit dem Kot ausgeschieden, wie es für Eissturmvögel, Dickschnabellummen *Uria lomvia* und zwei See-schwalben-Arten belegt werden konnte (Bourdages et al. 2021, Caldwell et al. 2022).

Eine Folge der Akkumulation von Plastikteilen im Magen ist eine Reduktion des Speichervolumens dieses Organs, was sich negativ auf die Nahrungsaufnahme und daraus resultierend negativ auf die Anlage von Fettreserven im Vogelkörper auswirkt (Ryan 1988b) und somit zu einer anhaltenden Schwächung der Vögel führt.

Kunststoffteile (Hartplastik, Ballons und Schäume) können in seltenen Fällen auch direkt den Tod der Vögel verursachen, indem sie den Isthmus zwischen Drüsenmagen und Muskelmagen blockieren, durch Verengung des Verdauungstraktes zu Infektionen oder Entzündungen führen, oder Perforationen des Verdauungstraktes zur Folge haben (Langlois 2003, Roman et al. 2019).

Bei Seevögeln, die ihre Jungen mit ausgewürgter Nahrung füttern, wie dies zum Beispiel bei Laysanalbatrossen *Phoebastria immutabilis*, Kurzschwanz-Sturmtauchern *Ardena tenuirostris* und anderen Röhrennasen der Fall ist, findet ein Transfer der Plastikpartikel auf die nachfolgende Generation statt (Ryan 1988a, Ryan 2015, Carey 2011, Fry et al. 1987). Ein Transfer von Plastikteilen zwischen Arten findet bei Räuber-Beute-Beziehungen statt. Die Analysen der Speiballen von Skuas *Catharacta skua* zeigten deutlich mehr Plastikteile, wenn diese Eissturmvögel gefressen hatten, als wenn deren Beute aus anderen Seevögeln bestanden hatte (Hammer et al. 2016).

Toxikologische Auswirkungen

Genauere Kenntnisse über die Verweildauer von Plastikpartikeln im Gastrointestinaltrakt sind insbesondere unter toxikologischen Aspekten von Relevanz. Kunststoffe aus Polyethylen, Polypropylen, Polystyrol oder Polyvinylchlorid besitzen selbst ein toxisches Potential und enthalten zudem üblicherweise Additive, wie Füllstoffe, Antioxidantien, Stabilisatoren, Weichmacher, Flammenschutz- und Färbemittel, die vielfach nicht abgebaut werden und die ihrerseits toxische Wirkungen besitzen (Liu et al. 2020, Gruber et al. 2022). Darüber hinaus neigen kleine Plastikpartikel auf Grund ihrer hydrophoben Eigenschaft dazu, Stoffe aus der Umgebung zu adsorbieren. Langlebige hydrophobe organische Schadstoffe (POPs), wie polyzyklische aromatische Kohlenwasserstoffe und polychlorierte Biphenyle sowie Schwermetalle aus der marinen Umwelt, können auf diese Weise in Plastikpartikeln akkumulieren. Aufgenommene Plastikpartikel können so als Vehikel toxische Substanzen in den Gastrointestinaltrakt transportieren, die dort freigesetzt, über das Blut systemisch aufgenommen und in Geweben angereichert werden (Fackelmann und Sommer 2019).

Kunststoffe, Additive und POPs. Nanoplastik passiert bei Seevögeln nicht nur den Gastrointestinaltrakt sondern gelangt offensichtlich

auch in verschiedene Gewebe der Vögel. Chemische Analysen im Darmgewebe zeigten bei Mittelsägern *Mergus serrator* deutliche Konzentrationen von Polyvinylchlorid (PVC) und Polystyrol (PS); bei einer Trottellumme wurde Polyvinylchlorid im Magengewebe und Polyethylenterephthalat (PET) im Lebergewebe gefunden (Haave et al. 2021). Die Aufnahme derartiger Nanopartikel finden ihre Entsprechung in Befunden aus dem Humanbereich (Gruber et al. 2022). Aus aktuellen experimentellen Studien weiß man, dass Nanopartikel aus PVC, PS und PET mit den darin enthaltenen Additiven bei den untersuchten Tierspezies verschiedene negative Wirkungen, wie Reproduktions- und Wachstumsstörungen sowie Verhaltensänderungen und cytotoxische Effekte, auslösen können (Heindler et al. 2017, Zimmermann et al. 2020, Salimi et al. 2022, Dhaka et al. 2022, Ahmed et al. 2022). Mikro- und Nanoplastik werden auch mit karzinogenen, entzündlichen und immunologischen Wirkungen in Zusammenhang gebracht (Gruber et al. 2022).

Als Beispiel für die toxischen Effekte von Additiven, aber auch von POPs sollen hier die bei Seevögeln relativ gut untersuchten polybromierten Diphenylether (PBDE) dargestellt werden, die als Flammschutzmittel in Kunststoffen eingesetzt werden bzw. wurden und die bei Labortieren und Menschen kanzerogene und neurotoxische Effekte sowie endokrine Störungen auslösen (Akortia et al. 2016). PBDEs sind persistierende, schwer abbaubare Stoffe, die unabhängig von ihrer Quelle stabil bleiben, über Wasser und in der Luft über weite Strecken transportiert werden können, stark an Mikroplastik binden und nahezu global nachweisbar sind (Avellan et al. 2022, Ohoro et al. 2021, Turner 2022). Sie können per Inhalation oder über die Nahrungskette in den Vogelkörper gelangen (Ohoro et al. 2021) und vom Elterntier über die Eier an die nächste Generation weitergegeben werden. Sowohl in Eiern von Seevögeln der Arktis als auch der Antarktis sind PBDEs nachgewiesen worden (Helgason et al. 2009, Yogui und Sericano 2009, Morales et al. 2022). Tanaka et al. (2013) fanden PBDEs in abdominalem Fettgewebe von Kurzschwanz-Sturmtauchern des Nordpazifiks. Da die gleichen Substanzen in Plastikteilen enthalten waren, die sich in den Mägen derselben Vögel befanden, nicht jedoch in Hochseefischen, ihrer natürlichen Beute, kann auf einen Transfer dieser Chemikalien aus aufgenomme-

nem Plastik in das Gewebe der Vögel geschlossen werden (Tanaka et al. 2013). Bestätigt wurde diese Vermutung durch Fütterungsversuche an jungen Weißgesicht-Sturmtauchern *Calonectris leucomelas*, bei denen spezifisch mit einem PBDE und vier anderen Additiven versetzte Plastikteile an die Testtiere verfüttert wurden. Im Vergleich zu den Kontrolltieren wurden bei den Testtieren erhöhte Konzentrationen des PBDE und der vier anderen Kunststoff-Additive im abdominalen Fettgewebe, der Leber und im Öl der Bürzeldrüse gemessen (Tanaka et al. 2020). Auch bei Eissturmvögeln wurden PBDEs im Lebergewebe nachgewiesen, wobei die Konzentrationen bei den Vögeln extrem hoch waren, die mit schlechter physischer Verfassung und mit Plastikteilen im Magen angeschwemmt worden waren. Bei Vögeln, die kein Plastik im Magen hatten und/oder die mit Plastik im Magen als Beifang der Langleinen-Fischerei verstorben waren, lagen die PBDE-Konzentrationen im Lebergewebe deutlich niedriger (Neumann et al. 2021). Dies legt den Schluss nahe, dass bei Vögeln mit schlechter physischer Verfassung Hunger oder Krankheiten zum Einschmelzen von Fettreserven und damit verbunden zur Freisetzung von PBDEs geführt haben könnten, was sich in den erhöhten PBDE-Konzentrationen in der Leber widerspiegelt (Neumann et al. 2021).

Wie Ex-vivo-Experimente zeigten, können Additive bzw. POPs zeitabhängig aus Kunststoffen in das Magenöl von Eissturmvögeln übertreten (Kühn et al. 2020). Da Eissturmvögel häufig Plastikteile aufnehmen und im Muskelmagen akkumulieren, besteht somit die Möglichkeit, dass diese Chemikalien aus dem Magenöl in den Blutkreislauf absorbiert und damit systemisch verfügbar werden (Kühn et al. 2020). Untermauert wird dies durch Additive von Kunststoffen, insbesondere PBDEs, die sich in Leber- und Muskelgewebe und Eiern von Eissturmvögeln der kanadischen Arktis fanden (Sühring et al. 2022).

POPs hat man auch in verschiedenen Geweben und/oder Eiern bei einer Vielzahl anderer Seevögel, wie Dreizehenmöwen *Rissa tridactyla*, Heringsmöwen *Larus fuscus*, Silbermöwen (*Larus argentatus*), Mantelmöwen *Larus marinus*, Eismöwen *Larus hyperboreus*, Flusseeeschwalben *Sterna hirundo* und Eiderenten gemessen (Letcher et al. 2010, Becker et al. 1993). Sowohl bei Seevögeln in ihrem natürlichen Lebensraum als auch bestätigt durch Fütterungsversuche an Falken fand man Hinweise, dass POPs, z. B. organische haloge-

nierte Schadstoffe, das Immunsystem der Vögel schädigen (Love et al. 2003, Smits et al. 2002, Bustnes et al. 2004, Jara-Carrasco et al. 2015).

Schwermetalle. In den letzten Jahrzehnten hat der Eintrag von Schwermetallen aus menschlichen Quellen in die marine Umwelt stark zugenommen (Ansari et al. 2004). Einige Schwermetalle sind für den Organismus essentiell, einige sind nur vorteilhaft und andere, wie Arsen, Cadmium, Quecksilber und Blei, sind hochtoxisch (Ansari et al. 2004, Ali et al. 2019). Schwermetalle wurden lange Jahre in Additiven bei der Kunststoffherstellung verwendet und sind in älterem Plastikmüll immer noch enthalten (Turner und Filella 2021). Mikro- und Nanoplastik können aber auch mit anorganischen Schadstoffen aus der Umwelt, z. B. mit Schwermetallen, interagieren (Bradney et al. 2019). Als Faktoren, die bei diesen Reaktionen von Plastik und Metallen eine Rolle spielen können, werden physikochemische Effekte, wie der pH-Wert des Meerwassers, dessen Salinität und Temperatur, darin gelöste organische Stoffe sowie Interaktionen der Schwermetalle mit an Kunststoffen anhaftenden organischen Schadstoffen und/oder der Biofilm-Schicht, diskutiert (Binda et al. 2021, Bradney et al. 2019). Unter In-vitro-Bedingungen, die den nahrungsadaptierten physiologischen Bedingungen des Verdauungstraktes von Seevögeln entsprachen, ließen sich Schwermetalle wie Cadmium und Blei aus Mikroplastikpartikeln mobilisieren (Smith und Turner 2020), sodass diese Schwermetalle theoretisch für eine systemische Absorption verfügbar wären.

Seevögel als Top-Prädatoren akkumulieren tatsächlich hohe Schwermetallkonzentrationen in ihren Geweben. Hohe Bleikonzentrationen in Geweben bzw. Blut hat man beispielsweise bei Eissturmvögeln, Dickschnabellummen in der Behring See (Ishii et al. 2017) sowie bei Wellenläufern, Gryllsteisten *Cephus grylle*, Ohrenscharben *Phalacrocorax auritus* und Eiderenten im Gulf of Maine gemessen (Pollet et al. 2017, Stenhouse 2018), wobei es im Nordpolarbereich offensichtlich Schwerpunkte bei brütenden Seevögeln im Westatlantik und im Pazifischen Ozean gibt (Chastel et al. 2022). Ähnliche regionale Unterschiede bestehen offensichtlich auch für die Akkumulation von Quecksilber bei Vögeln auf der Südhalbkugel, wo man bei Nestlingen des Amsterdamalbatrosses *Diomedea amsterdamensis* im Vergleich zu Küken des Felsenpinguins extrem

hohe Quecksilberkonzentrationen festgestellt hat (Carravieri et al. 2020).

Zur Frage, ob solche erhöhten Schwermetallkonzentrationen, insbesondere die des Quecksilbers, mit einer niedrigeren Bruterfolgsrate und/oder erhöhten Mortalität in Verbindung stehen, gibt es widersprüchliche Befunde (Ishii et al. 2017, Pollet et al. 2017, Chastel et al. 2022). Belegt ist allerdings, dass Quecksilber insbesondere in den endokrinen Drüsen von Seevögeln akkumuliert (Niizuma et al. 2021) und sowohl die Prolaktin-Produktion der Hypophyse (Tartu et al. 2016) als auch die des luteinisierenden Hormons (LH) stört (Tartu et al. 2014). Quecksilber könnte so durchaus negativ in die Fortpflanzungsleistung der Seevögel eingreifen (Tartu et al. 2013, Tartu et al. 2014).

Die Frage, ob die Belastung der Vögel mit Schwermetallen direkt mit einer Aufnahme von Plastikpartikeln aus der Umwelt in Verbindung steht, lässt sich nicht beantworten. Die Arbeitsgruppe von Puskic et al. (2020) konnte in einer relativ kleinen Studie keinen Zusammenhang zwischen der Menge aufgenommenen Kunststoffes und der Schwermetallbelastung im Brustmuskel von Kurzschwanz-Sturmtauchern feststellen. Auch Roman et al. (2020) fanden keine signifikante Relation zwischen dem aufgenommenen Plastik und der Konzentration von nicht-essentiellen Schwermetallen, wie Blei, in Lebergewebe von Feensturmvögeln *Pachyptila turtur* und Dünnschnabel-Sturmvögeln *Pachyptila belcheri*. Es scheint jedoch fraglich, ob in Tieren, die man dem marinen Ökosystem entnimmt und deren Grundbelastung mit Schwermetallen uneinheitlich bzw. unbekannt ist, eine signifikante Zunahme der Gewebekonzentrationen von Schwermetallen durch Freisetzung aus aufgenommenen Plastikpartikeln überhaupt messbar sein kann. Dies vor dem Hintergrund, dass a) die Konzentration von Blei – im Gegensatz zum Quecksilber (Seco et al. 2021) – in einigen Fällen mit den Stufen der Nahrungskette zum Spitzen-Prädatoren hin abnimmt (Sydeman und Jarman 1998, Campbell et al. 2005) und b) die Belastung von Seevögeln z. B. mit Quecksilber offensichtlich regionalen und saisonalen Schwankungen unterliegt. Im letzteren Fall könnten Veränderungen der saisonal verfügbaren Hauptbeutetiere auf den verschiedenen Stufen der Nahrungskette maßgebend sein (Ferriss und Essington 2014, Seco et al. 2021). Um das Ausmaß der Aufnahme von Schwermetallen aus Plastikpartikeln transparent machen zu können, sind kontrollierte Unter-

suchungen an homogenen Gruppen erforderlich, wie sie beispielsweise Tanaka et al. (2020) zur Aufnahme von PBDE und anderen Additiven aus Kunststoffen durchgeführt haben.

Schlussfolgerungen

Die Frage, warum Seevögel aktiv Kunststoffpartikel aufnehmen, ist nicht geklärt. Welche Reize die Aufnahme auslösen und/oder ob Nahrungsmangel hierbei eine Rolle spielt, sollte Gegenstand weiterer Untersuchungen sein. Dieser Review weist an verschiedenen Stellen auf Informationslücken hin, die insbesondere bei den toxikologischen Auswirkungen von aktiv und/oder passiv aufgenommenen Kunststoffpartikeln, deren Additiven sowie anhaftender POPs und Schwermetalle, einer gesicherten Darstellung der Zusammenhänge entgegenstehen.

Sicher ist, die aktive und passive Aufnahme von Plastikpartikeln wirkt sich auf verschiedenen Ebenen negativ auf die Vitalität der Seevögel aus. Effekte auf Seevogelpopulationen auf Grund der Plastikaufnahme konnten aber bisher nicht direkt nachgewiesen werden. Vergleichbare negative Auswirkungen sind auch für die Tiere möglich, die sich in der Nahrungskette unterhalb der Seevögel befinden (Pannetier et al. 2020, Hantoro et al. 2019). Eine nachhaltige Verminderung des Eintrags von Plastikmüll, Mikroplastik und Nano- plastik in die Meere muss deshalb das vorrangige Ziel globaler Bemühungen sein. Dies nicht zuletzt auf Grund der Tatsache, dass auch der Mensch Spitzen-Prädator dieser Nahrungskette ist.

Zusammenfassung

Mariner Kunststoffabfall ist ein zunehmendes globales Problem. Plastikmüll unterliegt photochemischen und mechanischen Abbauprozessen, die zu einer Verkleinerung der Stücke bis hin zur Größe von Mikro- und Nano- plastik führen. Kunststoffe beinhalten verschiedene toxische Additive, die aus der Kunststoffmatrix herausgelöst, aber auch wie langbleibige hydrophobe organische Schadstoffe (POPs) und Schwermetalle vom Kunststoff aus dem Meerwasser adsorbiert und akkumuliert werden können. Während Mikro- und Nano- plastik passiv über die Nahrungskette und das Meerwasser in den Körper der Seevögel gelangen, werden größere Kunststoffteile von zahlreichen Seevogelarten aktiv aufgenommen. Als Auslöser für diese aktive Aufnahme werden olfak-

torische und visuelle Reize diskutiert. Eine wirklich schlüssige und durch Belege untermauerte Erklärung, warum Seevögel Plastikteile aufnehmen, liegt aber bis heute nicht vor.

Die pathologischen und toxikologischen Folgen einer aktiven Aufnahme von Kunststoffen durch Seevögel dürften mit der Verweildauer der Kunststoffpartikel im Vogelkörper zunehmen. Spezies, die unverdauliche Nahrungsbestandteile als Speiballen regurgitieren können, stehen hier Seevogelarten gegenüber, die diese Fähigkeit nicht besitzen und bei denen die Kunststoffteile erst im Magen zerkleinert werden müssen, bevor sie über den Darm ausgeschieden werden können. Die Frage, ob und wenn ja, wie schnell Kunststoffteile im Muskelmagen der verschiedenen Seevogelarten zerkleinert und ausgeschieden werden, bedarf ebenfalls der weiteren Abklärung.

Aktiv aufgenommene Kunststoffpartikel und die damit verbundenen Substanzen können innerartlich an die Jungen oder über Räuber-Beute-Beziehungen auf andere Seevogelarten übertragen werden.

Als direkte Folgen der Akkumulation von Plastikteilen im Magen der Vögel können eine verminderte Nahrungsaufnahme und damit eine Schwächung des Organismus sowie Blockaden und/oder Verletzungen im Bereich des oberen Gastrointestinaltraktes mit zum Teil letalen Auswirkungen resultieren.

Von Seevögeln aufgenommene Plastikpartikel können über ihr eigenes toxisches Potential oder über in ihnen enthaltene Additive bzw. über adsorbierte und aus dem Meerwasser stammende langbleibige hydrophobe organische Schadstoffe neurotoxische und kanzerogene Effekte sowie endokrine Störungen und negative Auswirkungen auf das Immunsystem auslösen.

Vor dem Hintergrund des zunehmenden Eintrags von Schwermetallen in die marine Umwelt und dem Befund, dass Schwermetalle mit Kunststoffteilen interagieren und wieder freigesetzt werden können, interessiert die Frage, ob aufgenommene Kunststoffpartikel zu einer erhöhten Konzentration von toxischen Schwermetallen in Seevögeln beitragen. Sowohl auf der Nord- als auch auf der Südhalbkugel sind einige Gebiete auffällig, in denen hohe Blei- bzw. Quecksilberkonzentrationen in den Geweben von Seevögeln gemessen werden. Quecksilber beispielsweise akkumuliert in endokrinen Drüsen von Seevögeln und führt zu Störungen der Hypothalamus-Hypophysen-Achse im laktotropen und

im gonadotropen Regelkreis. Hier sind kontrollierte Untersuchungsansätze erforderlich, um abzuschätzen ob, und wenn ja, in welchem Ausmaß mit Schwermetallen beladene Kunststoffpartikel zur Schwermetallbelastung von Seevögeln beitragen.

Dank. Für die spontane Bereitschaft, Fotos von Plastikpartikeln aus den Mägen verendeter Eissturmvoegel für diese Übersicht zur Verfügung zu stellen, bedanke ich mich herzlich bei Susanne Kühn und Jan A. van Franeker, Wageningen Marine Research, Den Helder, Niederlande. Susanne Kühn danke ich darüber hinaus sehr herzlich für die kritische Durchsicht des Manuskriptes und die überaus konstruktiven Anregungen zur Optimierung der Übersichtsarbeit.

Literatur

- Acampora H, Berrow S, Newton S, O'Connor I (2017) Presence of plastic litter in pellets from Great Cormorant (*Phalacrocorax carbo*) in Ireland. *Marine Pollution Bulletin* 117: 512–514 <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2017.02.015>
- Agler BA, Nevitt GA, Hunt GL (2000) Olfactory sensitivity of foraging procellariid seabirds in Unimak Pass, Alaska. *Annual Meeting of the Pacific Seabird Group, Napa California* 23–25.02.2000
- Ahmed YH, El-Naggar M, Rashad MM, Youssef AM, Galal MK, Bashir DW (2022) Screening for polystyrene nanoparticle toxicity on kidneys of adult male albino rats using histopathological, biochemical, and molecular examination results. *Cell and Tissue Research* 388: 149–165 <https://doi.org/10.1007/s00441-022-03581-5>
- Akortia E, Okongwo JO, Lupankwa M, Osae SD, Daso AP, Olukunle OI, Chaudhary A (2016) A review of sources, levels, and toxicity of polybrominated diphenyl ethers (PBDEs) and their transformation and transport in various environmental compartments. *Environmental Reviews* 24(3) <https://doi.org/10.1139/er-2015-0081>
- Ali H, Khan E, Ilahi I (2019) Environmental chemistry and ecotoxicology of hazardous heavy metals: Environmental persistence, toxicity, and Bioaccumulation. *Journal of Chemistry* 2019: 6730305 <https://doi.org/10.1155/2019/6730305>
- Andrady AL (2015) Persistence of plastic litter in the Oceans. In: Bergmann M, Gutow L, Klages M (eds.) *Marine anthropogenic litter*. Springer open, Heidelberg, pp 57–72
- Ansari TM, Marr IL, Tariq N (2004) Heavy metals in marine pollution perspective – A mini review. *Journal of Applied Sciences* 4: 1–20, <https://scialert.net/abstract/?doi=jas.2004.1.20>
- Avellan A, Duarte A, Rocha-Santos T (2022) Organic contaminants in marine sediments and seawater: A review for drawing environmental diagnostics and searching for informative predictors. *Science of the Total Environment* 808: 152012 <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.152012>
- Baduini CL, Hyrenbach KD (2003) Biogeography of procellariiform foraging strategies: does ocean productivity influence provisioning? *Marine Ornithology* 31: 101–112
- Barthel PH, Barthel C, Bezzel E, Eckhoff P, van den Elzen R, Hinkelmann C, Steinheimer FD (2020) *Deutsche Namen der Vögel der Erde. Vogelwarte* 58: 1–214
- Becker PH, Schuhmann S, Koepff C (1993) Hatching failure in common terns (*Sterna hirundo*) in relation to environmental chemicals. *Environmental Pollution* 79: 207–213 [https://doi.org/10.1016/0269-7491\(93\)90091-2](https://doi.org/10.1016/0269-7491(93)90091-2)
- Binda G, Spanu D, Monticelli D, Pozzi A, Bellasi A, Bettinetti R, Carnati S, Nizetto L (2021) Unfolding the interaction between microplastics and (trace) elements in water: a critical review. *Water Research* 204: 117637 <https://doi.org/10.1016/j.watres.2021.117637>
- Bost CA, Cotté C, Bailleul F, Cherel Y, Charrassin JB, Guinet C, Ainley DG, Weimerskirch H (2009) The importance of oceanographic fronts to marine birds and mammals of the southern oceans. *Journal of Marine Systems* 78: 363–376 <https://doi.org/10.1016/j.jmarsys.2008.11.022>
- Bouchard B, Barnagaud JY, Poupard M, Glotin H, Gauffier P, Ortiz ST, Lisney TJ, Campagna S, Rasmussen M, Célérier A (2019) Behavioural responses of humpback whales to food-related chemical stimuli *PLoS ONE* 14: e0212515 <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0212515>
- Bourdages MPT, Provencher JF, Baak JE, Mallory ML, Vermaire JC (2021) Breeding seabirds as vectors of microplastics from sea to land: Evidence from colonies in Arctic Canada. *Science of the Total Environment* 764: 142808 <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.142808>
- Bradney L, Wijesekara H, Palasooriya KN, Obadamudalige N, Bolan NS, Ok YS, Rinklebe J, Kim KH, Kirham MB (2019) Particulate plastics as a vector for toxic trace-element uptake by

- aquatic and terrestrial organisms and human health risk. *Environmental International* 131: 104937 <https://doi.org/10.1016/j.envint.2019.104937>
- Breckels MN, Bode NWF, Codling EA, Steinke M (2013) Effect of grazing-mediated dimethyl sulfide (DMS) production on the swimming behaviour of the copepod *Calanus helgolandicus*. *Marine Drugs* 11: 2486–2500 <https://doi.org/10.3390/md11072486>
- Brooke M (2018) Where Seabirds find food. In: Brooke M. Far from land. Princeton University Press 141–162
- Bustnes JO, Hanssen SA, Folstad I, Erikstad KE, Hasselquist D, Skaare JU (2004) Immune function and organochlorine pollutants in arctic breeding glaucous gulls. *Archives of Environmental Contamination and Toxicology* 47:530–541. <https://doi.org/10.1007/s00244-003-3203-6>
- Caldwell A, Brander S, Wiedenmann J, Clucas G, Craig E (2022) Incidence of microplastic ingestion by common Terns (*Sterna hirundo*) and Roseate Terns (*Sterna dougalli*) breeding in the Northwestern atlantic. *Marine Pollution Bulletin* 177: 113560 <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2022.113560>
- Campbell LM, Norstrom RJ, Hobson KA, Muir DCG, Backus S, Fisk AT (2005) Mercury and other trace elements in a pelagic Arctic marine food web (Northern Polynia, Baffin Bay). *Science of the Total Environment* 351–352: 247–263 <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2005.02.043>
- Caputo F, Vogel R, Savage J, Vella G, Law A, Della Camera G, Hannon G, Peacock B, Mehn D, Ponti J, Geiss O, Aubert D, Prina-Mello A, Calzolari L (2021) Measuring particle size distribution and mass concentration of nanoplastics and microplastics: addressing some analytical challenges in the sub-micron size range. *Journal of Colloid and Interface Science* 588: 401–417 <https://doi.org/10.1016/j.jcis.2020.12.039>
- Carravieri A, Bustamante P, Labadie P, Budzinski H, Chastel O, Cherel Y (2020) Trace elements and persistent organic pollutants in chicks of 13 seabird species from Antarctica to the subtropics. *Environment International* 134: 105225 <https://doi.org/10.1016/j.envint.2019.105225>
- Carrey MJ (2011) Intergenerational transfer of plastic debris by Short-tailed Shearwaters (*Ardenna tenuirostris*) *Emu – Austral Ornithology* 111: 229–234 <https://doi.org/10.1071/MU10085>
- Cartraud AE, Le Corre M, Turquet J, Tourmetz J (2019) Plastic ingestion in seabirds of the western Indian Ocean. *Marine Pollution Bulletin* 140: 308–314 <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2019.01.065>
- Chastel O, Fort J, Ackerman J, Albert C, Angelier F, Basu N, Blévin P, Brault-Favrou M, Bustnes JO, Bustamante P, Danielsen J, Descamps S, Dietz R, Erikstad KE, Eulaers I, Ezhov A, Fleishman AB, Gabrielsen GW, Gavrilov M, Gilchrist G, Gilg O, Gíslason S, Golubova E, Goutte A, Grémillet D, Hallgrímsson GT, Hansen ES, Hanssen SA, Hatch S, Huffeldt NP, Jakubas D, Jónsson JE, Kitaysky AS, Kolbeinsson Y, Krasnov Y, Letcher RJ, Linnebjerg JF, Mallory M, Merkel FR, Moe B, Montevecchi WJ, Mosbech A, Olsen B, Orben RA, Provencher JF, Ragnarsdóttir SB, Reiertsen TK, Rojek N, Romano M, Søndergaard J, Strøm H, Takahashi A, Tartu S, Thórarinnsson TL, Thiebot JB, Will AP, Wilson S, Wojczulanis-Jakubas K, Yannic G (2022) Mercury contamination and potential health risks to Arctic seabirds and shorebirds. *Science of the Total Environment* 844: 156944 <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.156944>
- Cirri E, Pohnert G (2019) Algae-bacteria interactions that balance the plankton microbiom. *New Phytologist* 223: 100–106 <https://doi.org/10.1111/nph.15765>
- Clark L, Shah PS (1992) Information content of prey and odor plumes: What do foraging Leach's storm petrels know? *Chemical Signals in Vertebrates* 6: 421–427 https://doi.org/10.1007/978-1-4757-9655-1_65
- Colabuono FI, Vooren CM (2007) Diet of black-browed *Talassarche melanophrys* and Atlantic yellow-nosed *T. chlororhynchos* albatrosses and white-chinned *Procellaria aequinoctialis* and spectacled *P. conspicillata* petrels off southern Brazil. *Marine Ornithology* 35: 9020
- Corbeau A, Collet J, Fontenille M, Weimerskirch H (2019) How do seabirds modify their search behaviour when encountering fishing boats. *PLoS ONE* 14: e0222615 <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0222615>
- Costerton JW, Lewandowski Z, Caldwell DE, Korber D, Lappin-Scott HM (1995) Microbial biofilms. *Annual Review of Microbiology* 49: 711–745
- Cousin HR, Auman HJ, Alderman R, Virutue P (2015) The frequency of ingested plastic debris and its effects on body condition of Short-tailed Shearwater (*Puffinus tenuirostris*) pre-fledging chicks in Tasmania, Australia. *Emu Austral*

- Ornithology 115: 6–11 <https://doi.org/10.1071/MU13086>
- Cunningham GB, Strauss V, Ryan PG (2008) African penguins (*Spheniscus demersus*) can detect dimethyl sulphide, a prey-related odour. *The Journal of Experimental Biology* 211: 3123–3127 <https://doi.org/10.1242/jeb.018325>
- del Hoyo J, Collar NJ (2014) *HBW and BirdLife International illustrated checklist of the birds of the world, Volume 1: Non-passerines*. Lynx Edicions, Barcelona
- Dell’Ariccia G, Phillips RA, van Franeker JA, Gaidet N, Catry P, Granadeiro JP, Ryan PG, Bonadonna F (2017) Comment on “Marine plastic debris emits a keystone infochemical for foraging seabirds” by Savoca et al. *Science Advances* 3: e1700526 <https://doi.org/10.1126/sciadv.1700556>
- den Hartog JC, Clarke MR (1996) A study of stomach contents of Cory’s shearwater, *Calonectris diomedea borealis* (Cory, 1881) (Aves: Procellariidae), from the Macaronesian Islands. *Zoologische Mededelingen* 70(7): 117–133
- Dhaka V, Singh S, Anil AG, Naik TSSK, Garg S, Samuel J, Kumar M, Ramamurthy PC (2022) Occurrence, toxicity and remediation of polyethylene terephthalate plastics. A review. *Environmental Chemistry Letters* 20: 1777–1800 <https://doi.org/10.1007/s10311-021-01384-8>
- Dickschat JS, Reichenbach H, Wagner-Döbler I, Schulz S (2005) Novel pyrazines from the myxobacterium *Chondomyces crocatus* and marine bacteria. *European Journal of Organic Chemistry* 19: 4141–4135 <https://doi.org/10.1002/ejoc.200500280>
- Endres CS, Lohmann KJ (2012) Perception of dimethyl sulphide (DMS) by loggerhead sea turtles: a possible mechanism for locating high-productivity ocean regions for foraging. *Journal of Experimental Biology* 215(20): 3535–3538 <https://doi.org/10.1242/jeb.073221>
- English MD, Robertson GJ, Avery-Gomm S, Pirie-Hay D, Roul S, Ryan PC, Wilhelm SI, Mallory ML (2015) Plastic and metal ingestion in three species of coastal waterfowl wintering in Atlantic Canada. *Marine Pollution Bulletin* 98(1–2): 349–353 <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2015.05.063>
- Fackelmann G, Sommer S (2019) Microplastics and the gut microbiome: How chronically exposed species may suffer from gut dysbiosis. *Marine Pollution Bulletin* 143: 193–203 <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2019.04.030>
- Ferriss BE, Essington TE (2014) Does trophic structure dictate mercury concentrations in top predators? A comparative analysis of pelagic food webs in the Pacific Ocean. *Ecological Modelling* 278: 18–28 <https://doi.org/10.1016/j.ecolmodel.2014.01.029>
- Floren HP, Shugart GW (2017) Plastic in Cassin’s Auklets (*Ptychoramphus aleuticus*) from the 2014 stranding on the Northeast Pacific Coast. *Marine Pollution Bulletin* 117(1–2): 496–498 <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2017.01.076>
- Fort J, Beaugrand G, Grémillet D, Phillips RA (2012) Biologging, Remotely-Sensed Oceanography and the Continuous Plankton Recorder reveal the environmental determinants of a seabird wintering hotspot. *PLoS ONE* 7(7): e41194 <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0041194>
- Furness RW (1985) Plastic particle pollution: Accumulation by procellariiform seabirds at Scottish colonies. *Marine Pollution Bulletin* 16: 103–106 [https://doi.org/10.1016/0025326X\(85\)90531-4](https://doi.org/10.1016/0025326X(85)90531-4)
- Galgani F, Hanke G, Maes T (2015) Global distribution, composition and abundance of marine litter. In: Bergmann M, Gutow L, Klages M (eds.) *Marine anthropogenic litter*. Springer open, Heidelberg: pp 39–56
- Gonçalves C, Martins M, Sobral P, Costa PM, Costa MH (2019) An assessment of the ability to ingest and excrete microplastics by filter-feeders: A case study with the Mediterranean mussel. *Environmental Pollution* 245: 600–606 <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2018.11.038>
- Gruber ES, Stadlbauer V, Pichler V, Resch-Fauster K, Todorovic A, Meisel TC, Trawoeger S, Hollószki O, Turner SD, Wadsak W, Vethaak AD, Kenner L (2022) To waste or not to waste: questioning potential health risks of micro- and nanoplastics with a focus on their ingestion and potential carcinogenicity. *Exposure and Health* <https://doi.org/10.1007/s12403-022-00470-8>
- Haave M, Gomiero A, Schönheit J, Nilsen H, Olsen AB (2021) Documentation of microplastics in tissues of wild coastal animals. *Frontiers in Environmental Science* 9: 575058 <https://doi.org/10.3389/fenvs.2021.575058>
- Hammer S, Nager RG, Johnson PCD, Furness RW, Provencher JF (2016) Plastic debris in great skua (*Stercorarius skua*) pellets corresponds to seabird species. *Marine Pollution Bulletin* 103: 206–210

- <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2015.12.018>
- Hantoro I, Löhr AJ, Van Belleghem FGAJ, Widnarko B, Ragas AMJ (2019) Microplastics in coastal areas and seafood: implications for food safety. *Food Additives & Contaminants Part A* 36:5: 674–711 <https://doi.org/10.1080/19440049.2019.1585581>
- Hays H, Cormons G (1974) Plastic particles found in tern pellets, on coastal beaches and at factory site. *Marine Pollution Bulletin* 5: 44–46 [https://doi.org/10.1016/0025-326X\(74\)90234-3](https://doi.org/10.1016/0025-326X(74)90234-3)
- Heindler FM, Alajmi F, Huerlimann R, Zeng C, Newman SJ, Vamvounis G, van Herwerden L (2017) Toxic effects of polyethylene terephthalate microparticels and di(2-ethylhexyl)phthalate on the calanoid copepod, *Parvocalanus crassirostris*. *Ecotoxicology and Environmental Safety* 141: 298–305 <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2017.03.029>
- Helgason LB, Polder A, Føreid S, Bæk K, Lie E, Gabrielsen GW, Barrett RT, Skaare JU (2009) Levels and temporal trends (1983–2003) of polybrominated diphenyl ethers and hexabromocyclododecanes in seabird eggs from north Norway. *Environmental Toxicology and Chemistry* 28(5): 1096–1103 <https://doi.org/10.1897/08-404.1>
- Ishii C, Ikenaka Y, Nakayama SMM, Mizukawa H, Johannes YB, Watanuki Y, Fukuwaka M, Ishizuka M (2017) Contamination status and accumulation characteristics of heavy metals and arsenic in five seabird species from the central Bering Sea. *Journal of Veterinary Medical Science* 79: 807–814 <https://doi.org/10.1292/jvms.16-0441>
- Jackson S (1988) Diets of the white-chinned petrel and sooty shearwater in the southern Benguela Region, South Africa. *The Condor* 90: 20–28 <https://doi.org/10.2307/1368428>
- Jameson E, Doxey AC, Airs R, Purdy KJ, Murrell JC, Chen Y (2016) Metagenomic data-mining reveal contrasting microbial populations responsible for trimethylamine formation in human gut and marine ecosystems. *Microbial Genomics* 2: e000080 <https://doi.org/10.1099/mgen.0.000080>
- Jara-Carrasco S, Gonzáles M, Gonzáles-Acuna D, Chiang G, Cekis J, Espejo W, Mattatall P, Barra R (2015) Potential immunohaematological effects of persistent organic pollutants on chinstrap penguin. *Antarctic Science* 27:1–5. <https://doi.org/10.1017/S0954102015000012>
- Jiménez S, Domingo A, Brazeiro A, Defeo O, Phillips RA (2015) Marine debris ingestion by albatrosses in the southwest Atlantic Ocean. *Marine Pollution Bulletin* 96: 149–154 <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2015.05.034>
- Kane A, Pirota E, Wischnewsky S, Critchley EA, Bennison A, Jessopp M, Quinn JL (2020) Spatio-temporal patterns of foraging behaviour in a wide-ranging seabird reveal the role of primary productivity in locating prey. *Marine Ecology Progress Series* 646: 175–188 <https://doi.org/10.3354/meps13386>
- Kharitonov SP (2018) Manipulation and investigation activity in seabirds: Behavioral response to artificial objects exposed to a colony. *Biology Bulletin* 45: 983–999 <https://doi.org/10.1134/S1062359018090091>
- Kim HK, Choi CY, Jeong MS, Kang HY, Lee WS (2016) Regurgitation of the koilin layer in chinstrap penguins (*Pygoscelis antarcticus*) and its association with gastric parasites. *Polar Research* 35:1, 25966 <https://doi.org/10.3402/polar.v35.25966>
- Kühn S, van Franeker JA (2020) Quantitative overview of marine debris ingested by marine megafauna. *Marine Pollution Bulletin* 151: 110858 <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2019.110858>
- Kühn S, Booth AM, Sørensen L, van Oyen A, van Franeker JA (2020) Transfer of additive chemicals from marine plastic debris to stomach oil of Northern Fulmars. *Frontiers in Environmental Science* 8:138 <https://doi.org/10.3389/fenvs.2020.00138>
- Langlois I (2003) The anatomy, physiology, and diseases of the avian proventriculus and ventriculus. *The Veterinary Clinics Exotic Animal Practice* 6: 85–111 [https://doi.org/10.1016/S1094-9194\(02\)00027-0](https://doi.org/10.1016/S1094-9194(02)00027-0)
- Letcher RJ, Bustnes JO, Dietz R, Jenssen BM, Jørgensen EH, Sonne C, Verrault J, Vijayan MM, Gabrielsen GW (2010) Exposure and effects assessment of persistent organohalogen contaminants in arctic wildlife and fish. *Science of the Total Environment* 408:2995–3043. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2009.10.038>
- Liu W, Zhao Y, Shi Z, Li Z, Liang X (2020) Ecotoxicoproteomic assessment of microplastics and plastic additives in aquatic organisms: A review. *Comparative Biochemistry and Physiology Part D: Genomics and Proteomics* 36: 100713 <https://doi.org/10.1016/j.cbd.2020.100713>

- Lobelle D, Cunliffe M (2010) Early microbial biofilm formation on marine plastic debris. *Marine Pollution Bulletin* 62: 197–200 <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2010.10.013>
- Love OP, Shutt LJ, Silfies JS, Bortolotti GR, Smits JEG, Bird DM (2003) Effects of dietary PCB exposure on adrenocortical function in captive American Kestrels (*Falco sparverius*). *Ecotoxicology* 12:199–208 <https://doi.org/10.1023/A:1022502826800>
- Luna-Jorquera G, Thiel M, Portflitt-Toro M (2019) Marine protected areas invaded by floating anthropogenic litter: An example from the South Pacific. *Aquatic Conservation: Marine and Freshwater Ecosystems* 29(S2): 245–259 <https://doi.org/10.1002/aqc.3095>
- Mallory ML (2008) Marine plastic debris in northern fulmars from the Canadian high Arctic. *Marine Pollution Bulletin* 56: 1501–1504
- Mitkus M, Nevitt GA, Danielsen J, Kelber A (2016) Vision on the high seas: spatial resolution and optical sensitivity in two procellariiform seabirds with different foraging strategies. *Journal of Experimental Biology* 219: 3329–3338 <https://doi.org/10.1242/jeb.140905>
- Moore CJ, Moore SL, Leecaster K, Weisberg SB (2001) A comparison of plastic and plankton in the North Pacific central gyre. *Marine Pollution Bulletin* 42(12): 1279–1300 [https://doi.org/10.1016/S0025-326X\(01\)00114-X](https://doi.org/10.1016/S0025-326X(01)00114-X)
- Morales P, Roscales JL, Muñoz-Arnanz J, Barbosa A, Jiménez B (2022) Evaluation of PCDD/Fs, PCBs and PBDEs in two penguin species from Antarctica. *Chemosphere* 286(3): 131871 <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2021.131871>
- Moser ML, Lee DS (1992) A fourteen-year survey of plastic ingestion by western North Atlantic seabirds. *Colonial Waterbirds* 15: 83–94 <https://doi.org/10.2307/1521357>
- Nania TG, Shugart GW (2021) Are plastic particles reduced in size in seabirds' stomachs? *Marine Pollution Bulletin* 172: 112843 <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2021.112843>
- Neumann S, Harju M, Herzke D, Anker-Nilssen T, Christensen-Dalsgaard S, Langset M, Gabrielsen GW (2021) Ingested plastics in northern fulmars (*Fulmarus glacialis*): A pathway for polybrominated diphenyl ether (PBDE) exposure. *Science of the Total Environment* 778: 146313 <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.146313>
- Nevitt GA, Hunt GL (1996) Olfactory sensitivities of foraging procellariid seabirds in the Aleutian Islands. *Chemical Senses* 21: 649–650
- Nevitt G (1999) Olfactory foraging in Antarctic seabirds: a species-specific attraction to krill odors. *Marine Ecology Progress Series* 177: 235–241 <https://doi.org/10.3354/meps177235>
- Nevitt G, Reid K, Trathan P (2004) Testing olfactory strategies in an Antarctic seabird assemblage. *The Journal of Experimental Biology* 207: 3537–3544 <https://doi.org/10.1242/jeb.01198>
- Nevitt GA, Bonadonna F (2005) Sensitivity to dimethyl sulphide suggests a mechanism for olfactory navigation by seabirds. *Biology Letters* 1: 303–305 <https://doi.org/10.1098/rsbl.2005.0350>
- Nevitt GA, Bergstrom DM, Bonadonna F (2006) The potential role of ammonia as a signal molecule for procellariiform seabirds. *Marine Ecology Progress Series* 315: 271–277 <https://doi.org/10.3354/meps315271>
- Nevitt GA (2008) Sensory ecology on the high seas: the odor world of the procellariiform seabirds. *The Journal of Experimental Biology* 211: 1706–1713 <https://doi.org/10.1242/jeb.015412>
- Niizuma Y, Tani H, Yamashita Y, Ito M, Maeda M (2021) Mercury contamination in the endocrine glands of Black-Tailed Gulls *Larus crassirostris* on Kabushima (Kabu Island), Japan. *Marine Ornithology* 49: 329–333
- Ohoro CR, Adeniji AO, Okoh AI, Okoh OO. (2021) Polybrominated diphenyl ethers in the environmental systems : a review. *Journal of Environmental Health Science & Engineering* 19(1): 1229-1247 <https://doi.org/10.1007/s42021-021-00656-3>
- Owen K, Saeki K, Warren JD, Bocconcelli A, Wiley DN, Ohira SI, Bomboesch A, Toda K, Zitterbart DP (2021) Natural dimethyl sulphide gradients would lead marine predators to higher prey biomass. *Communications Biology* 4: 149 <https://doi.org/10.1038/s42003-021-01668-3>
- Pannetier P, Morin B, Le Bihanic F, Dubreil L, Clérandeau C, Chouvellon F, Van Arkel K, Danion M, Cachot J (2020) Environmental samples of microplastics induce significant toxic effects in fish larvae. *Environmental International* 134: 105047 <https://doi.org/10.1016/j.envint.2019.105047>
- Patrick SC, Bearhop S, Bodey TW, Grecian WJ, Hamer KC, Lee J, Votier SC (2015) Individual seabirds show consistent foraging strategies in response to predictable fisheries discards. *Journal of Avian Biology* 46: 431–440 <https://doi.org/10.1111/jav.00660>

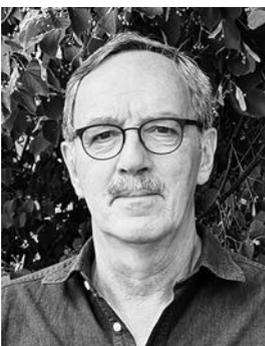
- Pollet IL, Leonard ML, O'Driscoll, Burgess NM, Shutler D (2017) Relationship between blood mercury levels, reproduction, and return rate in a small seabird. *Ecotoxicology* 26: 97–193 <https://doi.org/10.1007/s10646-016-1745-4>
- Potier S, Duriez O, Célérier A, Liegeois JL, Bonadonna F (2019) Sight or smell: which senses do scavenging raptors use to find food. *Animal Cognition* 22: 49–59 <https://doi.org/10.1007/s10071-018-1220-0>
- Procter J, Hopkins FE, Fileman ES, Lindeque PK (2019) Smells good enough to eat: Dimethylsulfide (DMS) enhances copepod ingestion of microplastic. *Marine Pollution Bulletin* 137: 1–6 <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2018.11.014>
- Provencher JF, Gaston AJ, Mallory ML, O'hara PD, Gilchrist HG (2010) Ingested plastic in a diving seabird, the thick-billed murre (*Uria lomvia*), in the eastern Canadian Arctic. *Marine Pollution Bulletin* 60: 1406–1411 <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2010.05.017>
- Provencher JF, Bond AL, Avery-Gomm S, Borelle SB, Bravo Rebolledo EL, Hammer S, Kühn S, Lavers JL, Mallory ML, Trevail A, van Franeker JA (2017) Quantifying ingested debris in marine megafauna: a review and recommendations for standardization. *Analytical Methods* 9: 1454–1469 <https://doi.org/10.1039/c6AY02419j>
- Provencher JF, Borrelle SB, Bond AL, Lavers JL, van Franeker JA, Kühn S, Hammer S, Avery-Gomm S, Mallory ML (2019) Recommended best practices for plastic and litter ingestion studies in marine birds: Collection, processing, and reporting. *FACETS* 4: 111–130 <https://doi.org/10.1139/facets-2018-0043>
- Puskic PS, Lavers JL, Adams LR, Bond AL (2020) Ingested plastic and trace element concentrations in Short-tailed Shearwaters (*Ardenna tenuirostris*). *Marine Pollution Bulletin* 155: 111143 <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2020.111143>
- Ramadhan F (2017) Spatial and temporal variability of phytoplankton productivity in the subtropical front around New Zealand. Master thesis, University of Otago, Dunedin <https://ourarchive.otago.ac.nz/handle/10523/7518>
- Roman L, Hardesty BD, Hindell MA, Wilcox C (2019) A quantitative analysis linking seabirds mortality and marine debris ingestion. *Scientific Reports* 9: 3202 <https://doi.org/10.1038/s41598-018-36585-9>
- Roman L, Kastury F, Petit S, Aleman R, Wilcox C, Hardesty BD, Hindell MA (2020) Plastic, nutrition and pollution; relationships between ingested plastic and metal concentrations in the livers of two *Pachyptila* seabirds. *Scientific Reports* 10: 18023 <https://doi.org/10.1038/s41598-020-75024-6>
- Roman L, Schuyler Q, Wilcox C, Hardesty BD (2021) Plastic pollution is killing marine megafauna, but how do we prioritize policies to reduce mortality. *Conservation Letters* 14: e12781 <https://doi.org/10.1111/conl.12781>
- Ryan PG (1987) The incidence and characteristics of plastic particles ingested by seabirds. *Marine Environmental Research* 23: 175–206 [https://doi.org/10.1016/0141-1136\(87\)90028-6](https://doi.org/10.1016/0141-1136(87)90028-6)
- Ryan PG (1988a) Intraspecific variation in plastic ingestion by seabirds and the flux of plastic through seabirds populations. *The Condor* 90: 446–452 <https://doi.org/10.2307/1368572>
- Ryan PG (1988b) Effects of ingested plastic on seabird feeding: Evidence from chickens. *Marine Pollution Bulletin* 19(3): 125–128 [https://doi.org/10.1016/0025-326X\(88\)90708-4](https://doi.org/10.1016/0025-326X(88)90708-4)
- Ryan PG, Jackson S (1987) The lifespan of ingested plastic particles in seabirds and their effect on digestive efficiency. *Marine Pollution Bulletin* 18(5): 217–219 [https://doi.org/10.1016/0025-326X\(87\)90461-9](https://doi.org/10.1016/0025-326X(87)90461-9)
- Ryan PG (2015) How quickly do albatrosses and petrels digest plastic particles. *Environmental Pollution* 207: 438–440 <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2015.08.005>
- Salimi A, Alavehzadeh A, Ramezani M, Pourahmad J (2022) Differences in sensitivity of human lymphocytes and fish lymphocytes to polyvinyl chloride microplastic toxicity. *Toxicology and Industrial Health* 38(2) <https://doi.org/10.1177/07482337211065832>
- Savoca MS, Nevitt GA (2014) Evidence that dimethyl sulphide facilitates a tritrophic mutualism between marine primary producers and top predators. *PNAS* 111: 4157–4161 <https://doi.org/10.1073/pnas.1317120111>
- Savoca MS, Wohlfeil ME, Ebeler SE, Nevitt GA (2016) Marine plastic debris emits a keystone infochemical for olfactory foraging seabirds. *Science Advances* 2: e1600395 <https://doi.org/10.1126/sciadv.1600395>
- Savoca MS, Tyson CW, McGill M, Slager CJ (2017) Odours from marine plastic debris induce food search behaviours in a forage fish. Pro-

- ceedings of the Royal Society B 284: 20171000 <https://doi.org/10.1098/rspb.2017.1000>
- Seco J, Aparício S, Brierley AS, Bustamante P, Ceia FR, Coelho JP, Philips RA, Saunders RA, Fielding S, Gregory S, Matias R, Pardal MA, Pereira E, Stowasser G, Tarling GA, Xavier JC (2021) Mercury biomagnification in a Southern Ocean food web. *Environmental Pollution* 275: 116620 <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2021.116620>
- Simó R, Saló V, Almeda R, Movilla J, Trepal I, Saiz E, Calbet A (2018) The quantitative role of microzooplankton grazing in dimethylsulfide (DMS) production in the NW Mediterranean. *Biogeochemistry* 141: 125–142 <https://doi.org/10.1007/s10533-018-0506-2>
- Sin SYW, Cloutier A, Nevitt G, Edwards SV (2022) Olfactory receptor subgenome and expression in a highly olfactory procellariiform seabird. *Genetics* 220: iyab210 <https://doi.org/10.1093/genetics/iyab210>
- Smith EC, Turner A (2020) Mobilisation kinetics of Br, Cd, Cr, Hg, Pb and Sb in microplastic exposed to simulated, dietary-adapted digestive conditions of seabirds. *Science of the Total Environment* 733: 138802 <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.138802>
- Smits JE, Fernie KJ, Bortolotti GR, Marchant TA (2002) Thyroid hormone suppression and cell-mediated immunomodulation in American kestrels (*Falco sparverius*) exposed to PCBs. *Archives of Environmental Contamination and Toxicology* 43:338–344 <https://doi.org/10.1007/s00244-002-1200-9>
- Stenhouse IJ, Adams EM, Goyette JL, Regan KJ, Goodale MW, Evers DC (2018) Changes in mercury exposure of marine birds breeding in the Gulf of Maine, 2008–2013 *Marine Pollution Bulletin* 128: 156–161 <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2018.01.025>
- Süßring R, Baak JE, Letcher RJ, Braune BM, de Silva A, Dey C, Fernie K, Lu Z, Mallory ML, Avery-Gomm S, Provencher JF (2022) Co-contaminants of microplastics in two seabird species from the Canadian Arctic. *Environmental Science and Ecotechnology* 12: 100189 <https://doi.org/10.1016/j.ese.2022.100189>
- Sydemann WJ, Jarman WM (1998) Trace metals in seabirds, Steller Sea Lion, and forage fish and zooplankton from central California. *Marine Pollution Bulletin* 36: 828–832 [https://doi.org/10.1016/S0025-326X\(98\)00076-9](https://doi.org/10.1016/S0025-326X(98)00076-9)
- Tanaka K, Takada H, Yamashita R, Mizukawa K, Fukuwaka MA, Watanuki Y (2013) Accumulation of plastic-derived chemicals in tissues of seabirds ingesting marine plastics. *Marine Pollution Bulletin* 69: 219–222 <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2012.12.010>
- Tanaka K, Watanuki Y, Takada H, Ishizuka M, Yamashita R, Kazama M, Hiki N, Kashiwada F, Mizukawa K, Mizukawa H, Hyrenbag D, Hester M, Ikenaka Y, Nakayama SMM (2020) In vivo accumulation of plastic-derived chemicals into seabird tissues. *Current Biology* 30: 723–728 <https://doi.org/10.1016/j.cub.2019.12.037>
- Tartu S, Goutte A, Bustamante P, Angelier F, Moe B, Clément-Chastel C, Bech C, Gabrielsen GW, Bustnes JO, Chastel O (2013) To breed or not to breed: endocrine response to mercury contamination by an Arctic seabird. *Biology Letters* 9:20130317 <http://dx.doi.org/10.1098/rsbl.2013.0317>
- Tartu S, Bustamante P, Goutte A, Weimerskirch H, Bustnes JO, Chastel O (2014) Age-related mercury contamination and relationship with leuteinizing hormone in a long-lived Antarctic bird. *PLOS One* 9(7): e103642 <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0103642>
- Tartu S, Bustamante P, Angelier F, Lendvai AZ, Moe B, Blévin P, Bech C, Gabrielsen GW, Bustnes JO, Chastel O (2016) Mercure exposure, stress and prolactin secretion in an Arctic seabird: an experimental study. *Functional Ecology* 30(4): 596–604 <https://doi.org/10.1111/1365-2435.12534>
- Fort J, Beaugrand G, Grémillet D, Phillips RA (2012) Biologging, Remotely-Sensed Oceanography and the Continuous Plankton Recorder reveal the environmental determinants of a seabird wintering hotspot. *PLoS ONE* 7(7): e41194 <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0041194>
- Turner A (2022) PBDEs in marine environment: Sources, pathways and the role of microplastics. *Environmental Pollution* 301: 118943 <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2022.118943>
- Turner A, Filella M (2021) Hazardous metal additives in plastics and their environmental impacts. *Environmental International* 156: 106622 <https://doi.org/10.1016/j.envint.2021.106622>
- van Franeker JA, Law KL (2015) Seabirds, gyres and global trends in plastic pollution. *Environmental Pollution* 203: 89–96 <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2015.02.034>
- van Franeker JA, Kühn S, Anker-Nilssen T, Edwards EWJ, Gallien F, Guse N, Kakkonen JE, Mallory ML, Miles W, Olsen KO, Pedersen J, Provencher J, Roos M, Stienen E, Turner DM, van Loon

- WMGM (2021) New tools to evaluate plastic ingestion by northern fulmars applied to North Sea monitoring data 2002–2018. *Marine Pollution Bulletin* 166: 112246 <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2021.112246>
- Veit RR, Harrison NM (2017) Positive interactions among foraging seabirds, marine mammals and fishes and implications for their conservation. *Frontiers in Ecology and Evolution* 5: 121 <https://doi.org/10.3389/fevo.2017.00121>
- Weimerskirch H (2007) Are seabirds foraging for unpredictable resources? *Deep Sea research Part II: Topical Studies in Oceanography* 54: 211–223 <https://doi.org/10.1016/j.dsr2.2006.11.013>
- Wenzel BM, Meisami E (1987) Number, size, and density of mitral cells in the olfactory bulbs of the Northern Fulmar and Rock Dove. *Annals of the New York Academy of Sciences* 510: 700–702 <https://doi.org/10.1111/j.17496632.1987.tb43671.x>
- Wright RJ, Erni-Cassola G, Zadjelovic V, Latva M, Christie-Oleza JA (2020) Marine plastic debris: A new surface for microbial colonization. *Environmental Science & Technology* 54: 11657–11672 <https://doi.org/10.1021/acs.est.0c02305>
- Yogui GT, Sericano JL (2009) Level and pattern of polybrominated diphenyl ethers in eggs of Antarctic seabirds: Endemic versus migratory species. *Environmental Pollution* 157: 975–980 <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2008.10.016>
- Yorio P, Marinao C, Kasinsky T, Ibarra C, Suárez N (2020) Patterns of plastic ingestion in Kelp Gull (*Larus dominicanus*) populations breeding in northern Patagonia, Argentina. *Marine Pollution Bulletin* 156: 111240 <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2020.111240>
- Zaher M El-Ghareeb AW, Hamdi H, AbuAmod F (2012) Anatomical, histological and histochemical adaptation of the avian alimentary canal to their food habits: *I-Coturnix coturnix*. *Life Science Journal* 9: 253–275
- Zantis LJ, Bosker T, Lawler F, Nelms SE, O'Rourke R, Constantine R, Sewell M, Carroll EL (2022) Assessing microplastic exposure of large marine filter-feeders. *Science of the Total Environment* 818: 151815 <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.151815>
- Zimmermann L, Göttlich S, Oehlmann J, Wagner M, Völker C (2020) What are the drivers of microplastic toxicity? Comparing the toxicity of plastic chemicals and particles to *Daphnia magna*. *Environmental Pollution* 267: 115392 <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2020.115392>

Eingegangen am 3. November 2022

Angenommen nach Revision am 15. Februar 2023



Dr. Ulrich Schwantes, Jg. 1954, Diplomstudium der Biologie und Promotion an der Justus-Liebig-Universität Gießen. Nach langjähriger Tätigkeit als Medizinischer Leiter eines pharmazeutischen Unternehmens und fachlicher Verankerung in der Klinischen Pharmakologie seit 2020 wieder Konzentration auf Fragestellungen der Ornithologie und des Naturschutzes. Interessenschwerpunkte: Vogelarten der halboffenen Landschaften und der Meeresküsten, insbesondere Interaktion von Parasiten mit Seevögeln sowie deren Beeinflussung durch Umweltveränderungen.

ZOBODAT - www.zobodat.at

Zoologisch-Botanische Datenbank/Zoological-Botanical Database

Digitale Literatur/Digital Literature

Zeitschrift/Journal: [Ornithologischer Anzeiger](#)

Jahr/Year: 2023

Band/Volume: [61_1](#)

Autor(en)/Author(s): Schwantes Ulrich

Artikel/Article: [Aufnahme marinen Kunststoffmülls durch Seevögel und ihre Folgen
Eine kritische Übersicht 37-55](#)