

Sind Silikon-Fouling-Beschichtungen eine praktikable und umweltverträgliche Alternative zu bioziden Antifouling-Beschichtungen im Ostseeraum?

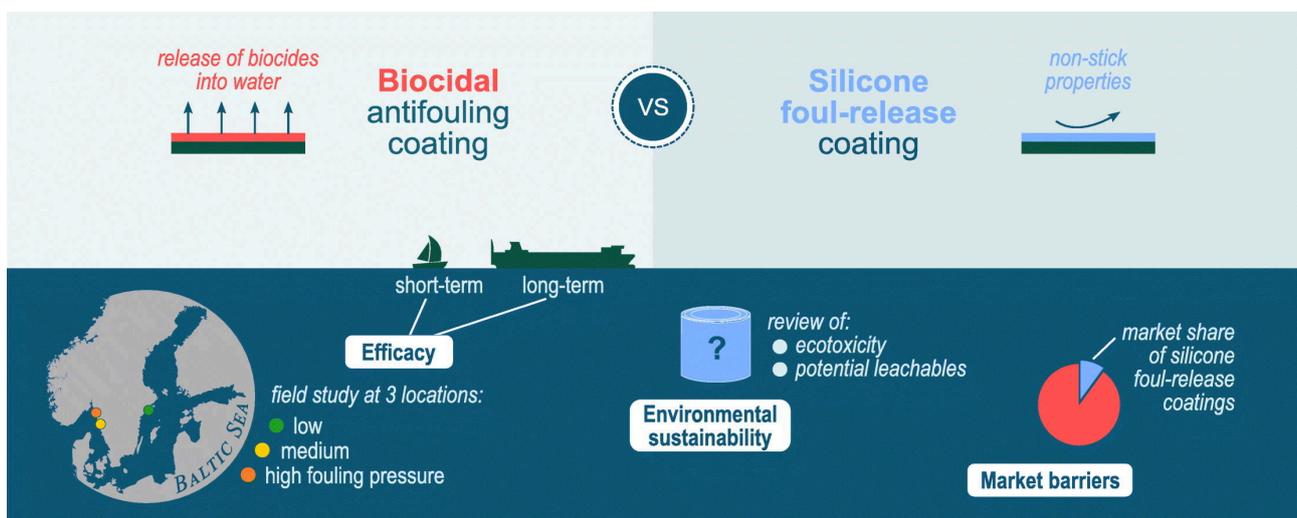
Höhepunkte

- Ganzheitliche Bewertung von Silikon-Fouling-Release-Beschichtungen für den Ostseeraum
- Bewertung von Wirksamkeit, Umweltverträglichkeit und Marktbarrieren
- Foul-Release-Beschichtungsleistung gleich oder besser als Kupferbeschichtungen
- Die Überprüfung zeigt, dass Fouling-Release-Beschichtungen eine wesentlich geringere Toxizität aufweisen.
- Foul-Release-Beschichtungen sind eine praktikable Alternative für Schiffe und Freizeitboote.

Abstrakt:

Um unerwünschten Bewuchs auf dem Unterwasserschiff zu bekämpfen, werden auf Schiffen, die in der Ostsee unterwegs sind, üblicherweise biozide Antifouling-Beschichtungen aufgetragen.

Hier wurden die Wirksamkeit, Umweltverträglichkeit und Marktbarrieren von Silikon-Fouling-Release-Beschichtungen (FRCs) für diese Region bewertet, um ihre Lebensfähigkeit als Ersatz für biozide Beschichtungen zu bewerten. Beschichtete Platten wurden über einen Zeitraum von 1 Jahr an drei Standorten im Ostseeraum statisch exponiert, um die Langzeitleistung eines biozidfreien FRC und zweier Kupferbeschichtungen zu bewerten. Es wurde festgestellt, dass der FRC gleich gut oder deutlich besser als die Kupferbeschichtungen abschneidet. Auch wenn die meisten Silikon-FRCs auf dem Markt biozidfrei sind, zeigt eine Durchsicht der Literatur zu toxischen Wirkungen und der Identität und dem Verbleib von auslaugbaren Stoffen in der Umwelt, dass sie möglicherweise nicht vollständig umweltverträglich sind, nur aufgrund des Fehlens von Bioziden. Nichtsdestotrotz sind FRCs im Vergleich zu bioziden Antifouling-Beschichtungen wesentlich weniger toxisch und ihre Verwendung sollte gefördert werden.



Schlüsselwörter - Keywords:

Foul-Release-Beschichtung, Antifouling-Beschichtung,
Antifouling-Leistung, Ökotoxikologie, Nachhaltige Produkte

Einleitung

Biofouling ist die unerwünschte Besiedlung künstlicher Strukturen durch Meeresorganismen und stellt eine besondere Herausforderung für Schiffe und Freizeitboote dar, da ein beschmutzter Rumpf den hydrodynamischen Widerstand von Schiffen erhöht und sowohl Geschwindigkeit, Kraftstoffverbrauch als auch Manövrierfähigkeit beeinträchtigt (Yebra et al., 2004; Jin et al., 2022). Der erhöhte Kraftstoffverbrauch führt nicht nur zu einem wirtschaftlichen Verlust für den Betreiber, sondern auch zu erhöhten gasförmigen (Treibhausgasen, Schwefel- und Stickoxiden) und partikelförmigen Luftemissionen in die Umwelt (Cullinane und Cullinane, 2013). Darüber hinaus können verschmutzte Schiffs- und Freizeitbootrümpfe als Vektoren für die unbeabsichtigte Einschleppung und Ausbreitung invasiver Arten dienen, da Schiffskörperbewuchsgemeinschaften nicht heimische Arten beherbergen können (Hewitt et al., 2009; Fernandes et al., 2016). Obwohl es sowohl finanziell als auch ökologisch vorteilhaft ist, Rumpfbewuchs zu verhindern, schadet diese gebräuchlichste Antifouling-Technik heute leider der Meeresumwelt.

Heutige Schiffs- und Freizeitbootrümpfe werden typischerweise mit biozidhaltigen (giftigen) Antifoulingfarben beschichtet, die so erschaffen sind, dass sie eine oder mehrere aktive (toxische) Substanzen freisetzen, um ansiedelnde Organismen abzuwehren oder zu vergiften (Finnie und Williams, 2010). Die meisten Beschichtungen enthalten ein anorganisches primäres Biozid auf Kupferbasis (z. B. Kupfer(I)-oxid oder Kupfer(I)-thiocyanat) zusammen mit einem oder mehreren organischen Booster-Bioziden (z. B. Kupferpyrithion, Zineb, DCOIT) (Paz-Villarga et al., 2022). Da diese Verbindungen biologisch aktiv sind, kann ihre direkte Freisetzung und Ausbreitung in die Meeresumwelt zu nachteiligen Auswirkungen auf Nichtzielorganismen führen (Dafforn et al., 2011; Amara et al., 2018). Da Kupfer in der Umwelt nicht abgebaut wird, werden außerdem die Wasser-, Sediment- und/oder Bodenkompimente in und um Bereiche und Einrichtungen, in denen Antifouling-Farben entweder aufgetragen, gewartet oder verwendet werden (z. B. Recyclinganlagen usw.) sind tendenziell Kupferansammlungen und -verschmutzungen ausgesetzt (Dafforn et al., 2011; Thomas und Brooks, 2010; Turner, 2010; Eklund und Eklund, 2014; Costa et al., 2016; Boyle et al., 2016; Daehne et al., 2017; Lagerström, 2019; Soon et al., 2021).

Für die Ostsee ist die Verwendung von bioziden Antifouling-Farben von besonderer Bedeutung, da es sich um eine stark befahrene Meeresregion handelt, sowohl von Schiffen als auch von Freizeitbooten. Es wurde geschätzt, dass zu jedem Zeitpunkt mindestens 2000 Schiffe innerhalb seiner Grenzen fahren, und die Schifffahrt wird voraussichtlich zunehmen als Folge der Verkehrsverlagerung von der Straße auf das Meer, die in Europa stattfinden wird (Matzcak et al., 2018). Freizeitboote sind auch in den an seine Küsten angrenzenden Ländern allgegenwärtig, mit fast zwei Millionen Schiffen allein in den schwedischen und finnischen Bootsparks (ICOMIA, 2018). Eine aktuelle Studie zu den Kupferfrachten in der Ostsee zeigt, dass die Verwendung von Antifouling-Farben auf Schiffen und Freizeitbooten die größte anthropogene Kupferquelle ist und ein Drittel der Gesamtfracht ausmacht (Ytreberg et al., 2021). Die Ostsee ist ein sensibles Meer mit Brackwasser, geringer Biodiversität und hoher anthropogener Belastung. Die große Anzahl von Schiffen in Kombination mit einer langsamen Wasserwechselrate von etwa 30 Jahren macht es umweltrelevant, den Einsatz von bioziden Antifouling-Farben sowohl auf Freizeit- als auch auf Handelsschiffen in diesem halbumschlossenen Meer zu minimieren (Korpinen et al., 2012).

Die führende Marktalternative zu herkömmlichen bioziden Beschichtungen sind sogenannte Foul-Release-Beschichtungen (FRCs), die das Anhaften von Fouling-Organismen durch physikalische und nicht durch chemische Einwirkung verhindern. Diese Beschichtungen können entweder silikon- oder fluorpolymerbasierte Bindemittel haben, aber alle kommerziell erhältlichen Systeme sind silikonbasiert (Lejars et al., 2012). Heute vermarkten alle großen Beschichtungsunternehmen mit Lackprodukten für die Schifffahrt mindestens ein Produkt auf Silikonbasis (Kim, 2021). Während FRCs im Jahr 2009 <1 % des Schiffsmarktes ausmachten, war dieser Anteil im Jahr 2014 auf fast 10 % gestiegen (Ciriminna et al., 2015). Silikon-FRCs bestehen aus vernetzten Silikonelastomeren, am häufigsten Poly(dimethylsiloxan) (PDMS), und verhindern durch ihre Antihafteigenschaften das Anhaften von Biofouling. Ihre niedrigen Oberflächenenergien und ihr Elastizitätsmodul verringern die Haftfestigkeit von Fouling-Organismen, die dann leicht durch die Wasserscherkraft während der Reinigung oder Navigation entfernt werden können, wodurch letztere die „Selbstreinigung“ der Beschichtung ermöglichen (Brady und Singer, 2000). . Darüber hinaus haben Silikon-FRCs eine geringe Oberflächenrauheit und sind hydrodynamisch glatter als herkömmliche biozide Beschichtungen, was zu einem geringeren Luftwiderstand führt, wenn sie nicht verschmutzt sind (Townsin und Anderson, 2009). Die Optimierung von Silikon-FRCs ist ein Bereich der laufenden und aktiven Forschung, wobei untersuchte Modifikationen auf die Hauptnachteile dieses Beschichtungssystems abzielen, nämlich Verschmutzung in Leerlaufzeiten und schlechte mechanische Festigkeit (Hu et al., 2020). Infolgedessen hat sich die Zusammensetzung kommerzieller Silikon-FRCs in den letzten Jahrzehnten erheblich verändert. Es gibt eine große Anzahl veröffentlichter Studien, die verschiedene chemische Veränderungen und Zusätze zu silikonbasierten Matrizen und deren Auswirkung auf Beschichtungseigenschaften beschreiben. Allerdings wurden nur wenige dieser Strategien in kommerziell erhältlichen Produkten implementiert (Barletta et al., 2018) und werden im Folgenden beschrieben.

Während die FRCs der ersten Generation, die in den 1990er und frühen 2000er Jahren auf den Markt kamen, hauptsächlich aus hydrophoben Formulierungen auf PDMS-Basis bestanden, weisen die meisten Produkte der zweiten und dritten Generation amphiphile Oberflächeneigenschaften auf (Camós Noguera, 2016; Gevaux, 2019) (Abb. 1). Beschichtungen der ersten Generation hatten Schwierigkeiten, die Anhaftung von Schleim zu verhindern, da Kieselalgen stärker an ihren hydrophoben Oberflächen haften konnten, was ihre Freisetzung von PDMS-beschichteten Oberflächen sogar bei hohen Geschwindigkeiten (> 30 Knoten) behinderte (Holland et al., 2004). Solche Kieselalgenschlämme können den Reibungswiderstand des Rumpfes deutlich erhöhen und auch die nachfolgende Ansiedlung von Makrofouling-Organismen beeinflussen (Lejars et al., 2012; Schultz, 2007). Die neueren Produkte sind daher amphiphil mit Beschichtungsoberflächen, die Bereiche mit hydrophilem und hydrophobem Charakter kombinieren, um Organismen während der Ansiedlung und Adhäsion zu verwirren (Galli und Martinelli, 2017). Als solche sind diese Beschichtungen nicht nur fäulnisabweisend, sondern auch fäulnisbeständig, insbesondere unter statischen Bedingungen (Hu et al., 2020). Zur Herstellung dieser oberflächenaktiven Beschichtungen werden amphiphile Additive unterschiedlicher chemischer Zusammensetzung eingesetzt. Diese Substanzen, am häufigsten amphiphile Blockcopolymere, segregieren an der Beschichtungsoberfläche, wo der hydrophobe Block (z. B. auf PDMS-Basis) als Anker an der Oberfläche fungiert, während der hydrophile Block (z. B. auf Polyethylenglykol(PEG)-Basis) am Meerwasser normalerweise verlängert wird und bieten die Antifouling-Eigenschaften (Camós Noguera et al., 2017). In den biozidfreien Beschichtungen von Hempel für Schiffe (Hempasil X3+) und Freizeitboote (Silic One) bestehen diese Additive aus hydrophil modifizierten Silikonölen, die an die Oberfläche der Beschichtung migrieren, um die Bildung eines Hydrogels, also eines komplexen Polymernetzwerks, zu ermöglichen mit der Fähigkeit, große Mengen Wasser zu binden. An der wässrigen Grenzfläche dient die Siloxankette der Substanz dazu, sie in der Beschichtung zu verankern, während die hydrophilen Einheiten bei Kontakt mit Wasser hydratisiert werden, um die Hydrogelschicht über dem Rumpf zu bilden (Ciriminna et al., 2015; Camós Noguera, 2016; Noguera, 2021). Es hat sich gezeigt, dass das Hydrogel die zweiatomige Setzung im Vergleich zu einer herkömmlichen Foul-Release-

Silikonbeschichtung verzögert (Thorlaksen et al., 2010). Die Einarbeitung von Fluoropolymeren ist ein weiterer Ansatz, der für einige Produkte (z. B. Intersleek 900 und sein Nachfolger Intersleek 1100SR) gewählt wurde, um eine Beschichtungsoberfläche mit amphiphilen Eigenschaften zu erzeugen (Hu et al., 2020).

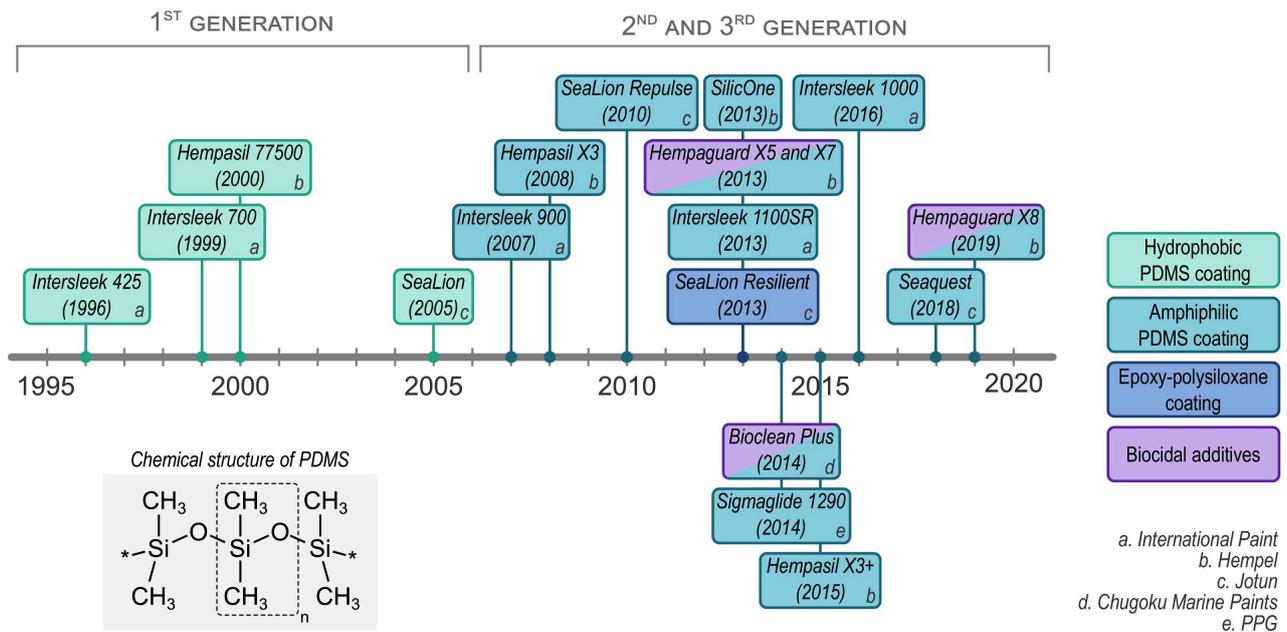


Abb. 1. Beispiele kommerzieller Silikon-Fouling-Release-Beschichtungen (Einführungsjahr in Klammern) und ihre Veränderung der Eigenschaften im Laufe der Zeit (Lejars et al., 2012; Fathom, 2013; Ciriminna et al., 2015; Camós Noguer, 2016; Gevaux , 2019). Beachten Sie, dass alle hier aufgeführten Produkte für den Einsatz auf Schiffen bestimmt sind, mit Ausnahme von SilicOne, das für Freizeitschiffe bestimmt ist. Ebenfalls gezeigt ist die typische chemische Struktur des PDMS-Elastomerrückgrats in Foul-Release-Beschichtungen mit Methylseitengruppen und Kettenenden (*), die Hydroxy-, Amino- oder Alkoxy-terminiert sein können.

Andere Arten von Additiven für Silikon-FRCs umfassen hydrophobe Öle und Biozide. Die Zugabe von Silikonölen, die aus unterschiedlich substituierten, nicht vernetzten PDMS bestehen, wurde für einige kommerzielle Beschichtungen der ersten Generation berichtet, wobei Bedenken hinsichtlich der Umweltauswirkungen der Freisetzung dieser persistenten Verbindungen in die Meeresumwelt geäußert wurden (Nendza, 2007). Es wurde auch über Zusätze anderer Ölartern wie Paraffin und Mineralöle berichtet, und das neueste Produkt von International Paints (Intersleek 1000) enthält Lanolinöl (Gevaux, 2019; Watermann et al., 1997). Obwohl die erste Generation von FRCs biozidfrei war, finden sich biozide Zusatzstoffe jetzt auch in einigen Marktprodukten (z. B. Hempaguard und Bioclean Plus). Schließlich wurde die Modifizierung von FRCs auf Silikonbasis mit Epoxidsegmenten zur Verbesserung der mechanischen Festigkeit beispielsweise in SeaLion Resilient von Jotun übernommen. Das Epoxid-Polysiloxan-Harz soll mechanische Schäden reduzieren und gleichzeitig eine glänzende, glatte Oberfläche bieten, um sowohl den Luftwiderstand als auch die Ansiedlung von Fouling-Organismen zu verhindern (Jotun, 2013).

Obwohl Silikonbeschichtungen seit vielen Jahren auf dem Markt erhältlich sind, fehlen für den Ostseeraum wissenschaftliche Studien, die die Wirksamkeit von Foul-Release- und traditionellen Kupferbeschichtungen vergleichen. Bisher wurde nur eine solche Studie an einem Standort im Kattegat bei Göteborg an der schwedischen Westküste von Oliveira und Granhag (2020) durchgeführt. In ihrer Studie wurde die Wirksamkeit eines biozidfreien FRC (Sigmaglide 1290 von PPG) sowie eines selbstpolierenden kupferhaltigen Schiffsanstrichs über einen Zeitraum von einem Jahr durch statische Paneltests bewertet. Die Ergebnisse zeigten, dass der FRC im Vergleich zur bioziden Beschichtung deutlich weniger verschmutzt war. Das übergeordnete Ziel dieser Studie war es festzustellen, ob biozidfreie FRCs tatsächlich eine praktikable Alternative zu herkömmlichen Kupferbeschichtungen für den gesamten Ostseeraum darstellen, sowohl unter dem Gesichtspunkt der Wirksamkeit als auch der ökologischen Nachhaltigkeit. Diese Arbeit wurde daher in drei Abschnitte gegliedert. Zunächst wurde die Langzeitleistung von zwei handelsüblichen Kupferbeschichtungen und einem Silikon-FRC verglichen. Beschichtete Platten wurden im Feld an drei Standorten in der Ostseeregion bei niedrigen bis hohen Verschmutzungsdrücken über einen Zeitraum von einem Jahr ausgesetzt, um die Wirksamkeit der Beschichtungen unter ungünstigsten (statischen) Bedingungen zu bewerten. Der auf Hydrogel basierende FRC, Silic One von Hempel, wurde verwendet, da er derzeit der einzige FRC ist, der für Freizeitbootfahrer rund um die Ostsee weit verbreitet ist. Diese Beschichtung basiert ebenfalls auf der gleichen Hydrogel-Technologie wie Hempasil X3+, das für Schiffe bestimmt ist. Die Implikationen der erzielten Ergebnisse können daher sowohl in Bezug auf Schiffe als auch auf Freizeitboote diskutiert werden, die im Ostseeraum verkehren. Wie beschrieben, kann die Zusammensetzung kommerzieller Silikon-FRCs variieren, und Berichte über verschiedene Arten von auslaugbaren Materialien aus diesen Produkten veranlassten den zweiten Teil dieser Arbeit. Hier sollte bewertet werden, ob kommerzielle Silikon-FRCs aus ökologischer Sicht eine sinnvolle Alternative zu bioziden Beschichtungen darstellen. Ihre Umweltverträglichkeit wurde daher durch eine Überprüfung der veröffentlichten Literatur in Bezug auf zwei Aspekte untersucht, nämlich ihre Toxizität für Wasserorganismen, insbesondere im Vergleich zu Kupferbeschichtungen, und die chemische Natur und potenzielle Umweltgefährdung möglicher Leachables. Im dritten und

letzten Teil wurden die Hindernisse analysiert, die derzeit die Etablierung von Silikon-FRCs sowohl auf dem professionellen als auch auf dem Freizeitmarkt behindern könnten.

2. Materialien und Methoden

2.1. Wirksamkeitsstudie

2.1.1. Plattenvorbereitung und Expositionsorte

Vier Beschichtungen wurden in die Studie aufgenommen: eine biozidfreie Farbe (Kontrolle), zwei kupferhaltige Antifouling-Farben (Kupfer 1 und Kupfer 2) und ein Silikon-FRC (Foul-Release) (Tabelle 1). Während die Kupferfarben für den Einsatz auf Handelsschiffen vorgesehen sind, sind in den meisten Ländern rund um die Ostsee Antifouling-Farben ähnlicher Zusammensetzung für Freizeitbootbesitzer erhältlich. Das in dieser Studie verwendete Silikon-FRC (Silic One) wird für Freizeitschiffe vermarktet, aber Hempel hat auch eine Schiffsbeschichtung (HempaSil X3+) auf Basis der gleichen Hydrogel-Technologie. Die Ergebnisse dieser Beschichtungen sind somit sowohl für Schiffe als auch für Freizeitboote relevant. Alle untersuchten Beschichtungen wurden auf 15 × 15 cm große PVC (Polyvinylchlorid)-Platten aufgetragen. Die Platten wurden geschliffen und dann mit einer Walze mit einer ersten Grundierungsschicht (Hempel's Underwater Primer 26030) lackiert, gefolgt von einer Deckbeschichtung. Für die Silikonbeschichtung wurde vor der Deckbeschichtung auch eine Schicht Haftvermittler (Hempel's Silic One Tiecoat 27450) aufgetragen. Für jede Expositionsstelle wurden vier Wiederholungen jeder Behandlung hergestellt.

Tabelle 1. In der Studie verwendete Beschichtungen. Informationen zum Gehalt an Wirkstoffen (Kupferoxid und DCOIT) wurden dem öffentlichen Pestizidregister der schwedischen Chemikalienagentur entnommen (schwedische Chemikalienagentur, 2021). Der Bereich des Zinkoxidgehalts wurde den Sicherheitsdatenblättern der Produkte entnommen.

Coating	Product name	Manufacturer	Color	Cuprous oxide (wt%, dry)	Copper pyrite (wt%, dry)	DCOIT ^a (wt%, ww)	Zinc oxide (wt%, dry)
Control	Underwater Primer	Hempel	Aluminium grey	–	–	–	–
Copper 1	Sigmari ne 530	PPG	Redbrown	39.02	–	2.53	10–25
Copper 2	SeaForce 60	Jotun	Red	31.6	1.5	–	10–25
Foul-releas	Silic One	Hempel	Black	–	–	–	–

a
4,5-Dichloro-2-octyl-isothiazolone.

Die Panels wurden an Rahmen befestigt, die im Juli 2020 in einer Tiefe von 1,5 m (Expositionstiefe von $1,5 \pm 0,5$ m für die Panels) an drei verschiedenen Forschungsstationen entlang der schwedischen Küste ausgesetzt wurden: Askö Laboratory (Station 1), Kristineberg Marine Research Station (Station 2) und Meereslabor Tjärnö (Station 3). Salzgehalts- und Temperaturmessungen in 1 m Tiefe wurden von Überwachungsstellen an den Forschungsstationen selbst (Stationen 2 und 3) oder von nahe gelegenen Bojen (Station 1) (Kristineberg Marine Research Station, 2021; SMHI, 2021; Tjärnö Marine Laboratory, 2021) erhalten). Station 1 befindet sich in der eigentlichen Ostsee und wies einen durchschnittlichen Salzgehalt von 6 PSU auf, während sich die Stationen 2 und 3 mit entsprechenden durchschnittlichen Salzgehalten von 24 und 26 PSU im Skagerrak befinden (Abb. 2). Die Platten wurden etwa jeden Monat über einen Zeitraum von einem Jahr zur späteren visuellen Beurteilung der Art und Oberflächenbedeckung von Fouling-Organismen transportiert und fotografiert. Leider wurden die Panels an Station 3 nach 8 Monaten Exposition gestört, wahrscheinlich durch Eiderenten, die sich von Miesmuscheln ernährten, die die Panels dominierten. Das Experiment an Station 3 musste daher Anfang März 2021 beendet werden.

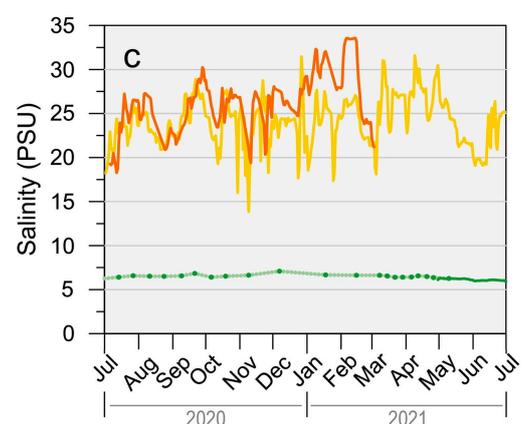
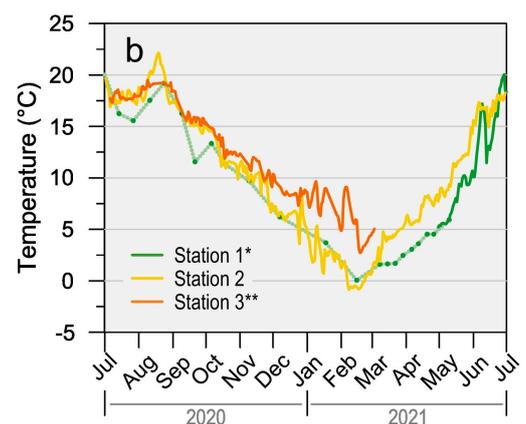
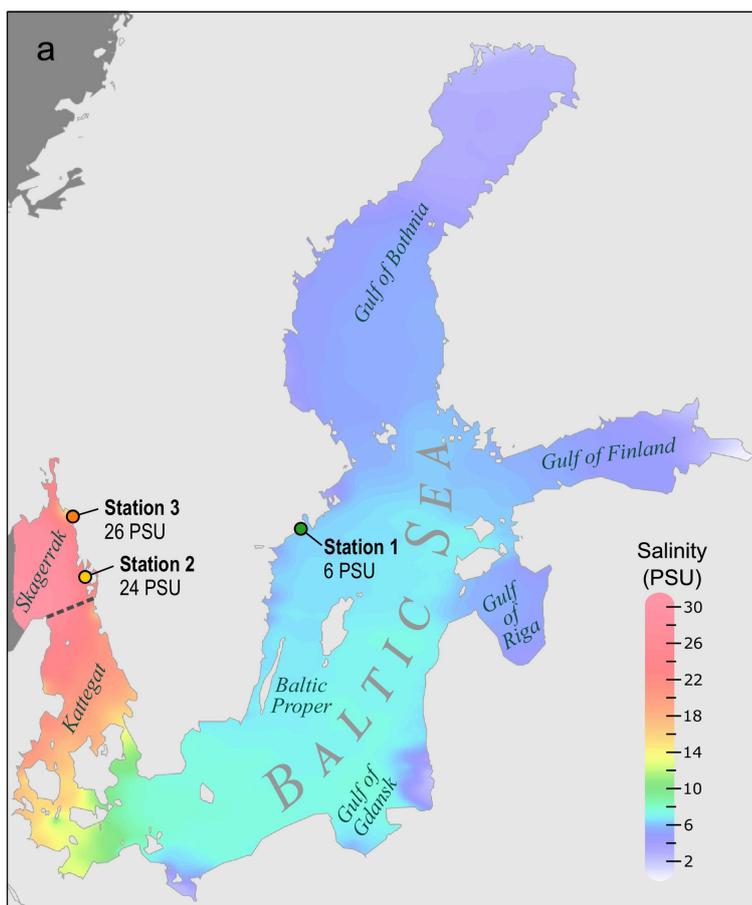


Abb. 2. Karte mit den Standorten der drei Stationen (a). Der durchschnittliche Salzgehalt während der Studie ist unter jeder Station angegeben. Die durchschnittliche Tagestemperatur (b) und der Salzgehalt (c) in 1 m Tiefe für den gesamten Untersuchungszeitraum werden ebenfalls angezeigt. Tagesmittelwerte für Salzgehalt und Temperatur waren nur für die letzten Monate der Exposition an Station 1 (*) aufgrund von Wartungsarbeiten an der Boje bei Askö B1 verfügbar. Die gepunkteten grünen Linien zeigen stattdessen ~ monatliche Daten (Punkte zeigen den genauen Probenahmepunkt) in 0 m Tiefe am selben Ort für den Zeitraum Juli 2020–April 2021, gemessen vom nationalen Umweltüberwachungsprogramm an Station B1. Die Exposition an Station 3 (**) musste nach ca. 8 Monaten vorzeitig beendet werden, was sich auch in den Temperatur- und Salinitätskurven widerspiegelt. (Zur Interpretation der Farbverweise in dieser Abbildungslegende wird der Leser auf die Webversion dieses Artikels verwiesen.)

2.1.2. Verschmutzungsbeurteilung

Der Bewuchs auf den Paneelen wurde auf einer Skala von 0 bis 100 nach einem Klassifizierungssystem aus dem Naval Ships' Technical Manual (NSTM) der US Navy (2006) bewertet. Eine Fouling-Rate (FR) von 0 steht für eine saubere und fäulnisfreie Oberfläche, während FR10 und höher verschiedene Arten von Fouling-Organismen darstellen, wobei eine erhöhte Fouling-Rate auf eine stärkere Fouling-Schwere hindeutet (Tabelle 2). Verschmutzungsraten von 10–30 stehen für weiche Verschmutzungen, z. verschiedene Algenarten, wobei ab FR40 Hardfouling, also kalkhaltiger Bewuchs, steht. Die NSTM-Skala enthält keine empfohlene Bewertung für die Klassifizierung von Bryozoen. Wenn vorhanden, wurde für Bryozoen eine Fouling-Rate von 40 verwendet, da sie als am repräsentativsten erachtet wurde. Die Oberflächenbedeckung jedes identifizierten Bewertungstyps wurde gemäß ASTM D 6990 (2011) geschätzt. Gemäß diesem Verfahren wurde die Anhaftung von Biofouling innerhalb von 13 mm von allen Kanten der Platte in der Analyse außer Acht gelassen. Die bewerteten Oberflächenbedeckungen der Foulingraten wurden verwendet, um den Foulingdruck an den drei Stationen zu charakterisieren (durch Bewertung des Foulings auf der Kontrollfarbe) und um die Wirksamkeit der untersuchten Antifoulingbeschichtungen in ihrer Fähigkeit zu vergleichen, verschiedene Arten von Foulingorganismen abzuschrecken.

Tabelle 2. Fouling-Ratenskala, die in der Studie verwendet wurde, um die Art des auf den Beschichtungen vorhandenen Foulings zu bewerten. Angepasst aus dem Technischen Handbuch für Marineschiffe (NSTM) (US Navy, 2006). Die entsprechende Änderung der erforderlichen Wellenleistung für eine Fregatte der Klasse Oliver Hazard Perry (FFG-7) bei einer Geschwindigkeit von 15 Knoten, wie sie von Schultz (2007) abgeleitet wurde, ist ebenfalls als Referenz gezeigt.

Fouling type	Fouling rate (FR)	Description	Change in required shaft power for an FFG-7

–	0	Clean, foul-free surface	–
Soft	10	Incipient slime, painted surfaces visible beneath the fouling	11 %
	20	Advanced slime, painted surfaces obscured by the fouling	
	30	Soft fouling up to 76 mm in length and up to 6.4 mm in height (e.g. filaments, sea urchins)	21 %
Hard	40	Tubeworms <6.4 mm in height or diameter	35 %
	50	Barnacles <6.4 mm in height or diameter	
	60	Combination of tubeworms and barnacles <6.4 mm in height or diameter	
	70	Combination of tubeworms and barnacles >6.4 mm in height or diameter	54 %
	80	Closely packed tubeworms or barnacles (<6.4 mm in height) growing on top of each other	
90	Dense growth of tubeworms with barnacles, 6.4 mm or greater in height	86 %	
Composite	100		Soft and hard fouling present, with soft fouling growing over various forms of hard growth.

Um einen Gesamtvergleich zwischen den Behandlungen anzustellen, wurde auch eine einzelne gewichtete Fouling-Rate, FR_w , für jedes Wiederholungspanel bestimmt (Oliveira und Granhag, 2020). Die Werte (0–100) jeder identifizierten Fouling-Bewertungskategorie wurden mit ihrer entsprechenden beobachteten Oberflächenbedeckung (in %) multipliziert und gemäß der folgenden Gleichung (wobei $n = 100$) summiert:

(1)

$$FR_w = \sum_{i=0}^n \frac{FR_i \times Surface\ coverage_i}{100}$$

Die berechneten FRw wurden verwendet, um zu jedem Beobachtungszeitpunkt auf signifikante Unterschiede zwischen den Kupfer- und Fouling-Release-Beschichtungen zu testen, indem einfache ANOVAs mit Post-hoc-Tests (Tukey's HSD) durchgeführt wurden. Alle statistischen Tests wurden in JMP® Pro 15 mit einem Signifikanzniveau von 5 % ($\alpha = 0,05$) durchgeführt.

2.2. Bewertung der Umweltauswirkungen von Silikon-Fouling-Release-Beschichtungen

Da Silikon-FRCs im Vergleich zu herkömmlichen Antifouling-Beschichtungen automatisiert biozidfrei sind oder geringere Mengen an Bioziden enthalten, gelten sie allgemein als umweltfreundlicher (Ciriminna et al., 2015). Es wurden jedoch Bedenken hinsichtlich der Tatsache geäußert, dass sie umweltbeständige auslaugbare Stoffe (z. B. Silikonöle) enthalten, die teilweise für die Beschichtungsleistung verantwortlich sein könnten (Nendza, 2007; Buskens et al., 2013). Um die Gesamtumweltauswirkungen von Silikon-FRCs zu bewerten, wurden zwei Aspekte durch eine Durchsicht der veröffentlichten Literatur untersucht, nämlich 1) ihre Toxizität für Wasserorganismen und 2) die chemische Natur und potenzielle Umweltgefährdung möglicher auslaugbarer Stoffe. Für erstere wurde eine Literaturrecherche durchgeführt, um ökotoxikologische Studien einschließlicher FRCs zu identifizieren. Für letztere Substanzen wurden die in der Literatur berichtet wurden, die enthalten sein und aus kommerziellen Silikonbeschichtungen ausgelaugt werden can und umweltbedenklich sein can, überprüft.

2.3. Bewertung von Marktbarrieren für Silikon-Fouling-Release-Beschichtungen

Bis heute gibt es nur ein Unternehmen, Hempel, das biozidfreie Silikonbeschichtungen sowohl für Schiffe (Hempasil X3+) als auch für Sportboote (Silic One, getestet in dieser Studie) vermarktet, wobei die letztere Beschichtung für Bootsfahrer in den meisten Ländern verfügbar ist das Baltische Meer. Um Einblicke in die Hindernisse zu erhalten, die die Endverbraucher in jedem dieser Märkte derzeit daran hindern könnten, auf eine biozidfreie Silikonbeschichtung umzusteigen, wurde zusätzlich zur Sichtung der vorhandenen Literatur ein Interview mit Hempel-Vertretern durchgeführt.

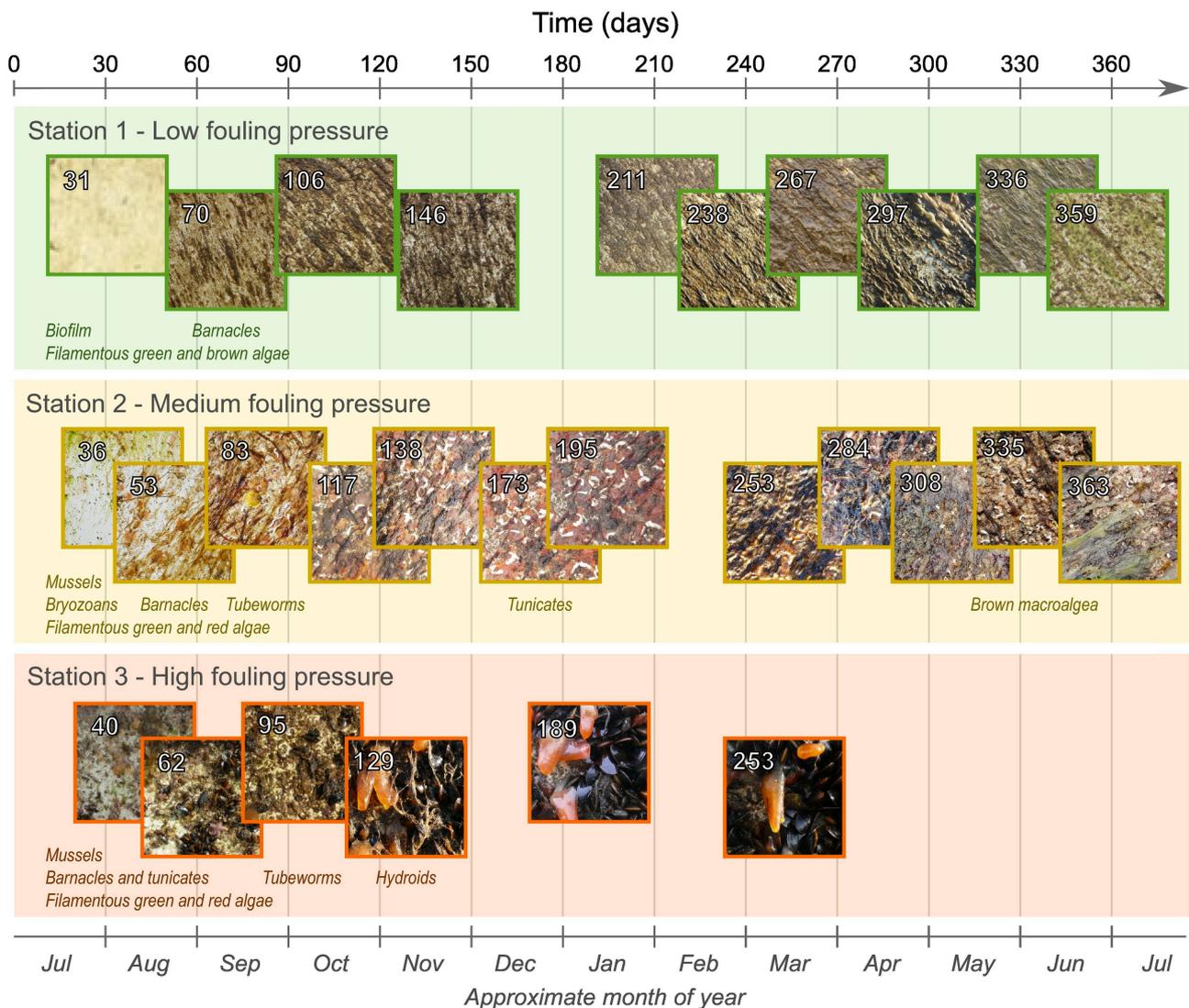
3. Ergebnisse & Diskussion

3.1. Wirksamkeit einer Silikonbeschichtung im Vergleich zu Kupferbeschichtungen in der Ostsee

3.1.1. Unterschiede im Verschmutzungsdruck zwischen den Stationen

Der Fouling-Druck, d. h. die Intensität und Art der Fouling-Organismen, denen Schiffs- und Freizeitbootrümpfe im Ostseeraum ausgesetzt sein können, kann sowohl zeitlich als auch räumlich variieren (Wrange et al., 2020). Um zu bewerten, wie sich die untersuchten Beschichtungen unter verschiedenen Fouling-Bedingungen verhalten, wurden sie daher an drei verschiedenen Stationen exponiert. Hier wird der Verschmutzungsdruck jeder Station, wie auf den Kontrolltafeln aufgezeichnet, beschrieben.

An Station 1 in der Ostsee war der Bewuchsdruck relativ gering mit überwiegend weichem Bewuchs bestehend aus Schleim (FR10–20) und Fadenalgen (FR30). Seepocken (*Amphibalanus improvisus*) wurden jedoch auch nach zweimonatiger Exposition in geringer Dichte beobachtet (Abb. 3, Tabelle S1). Das gewichtete FR, FRw, an Station 1 überstieg während der gesamten Studie niemals 30, was die leichte Verschmutzung und die geringe Anzahl beobachteter Seepocken



widerspiegelt (Abb. 4). Dies stützt frühere Beobachtungen, dass die Ansiedlung von Seepocken 1–3 Mal pro Jahr in der Region Askö auftritt, in der die Platten freigelegt wurden (Wrange et al., 2020).

Abb. 3. Beispielfotos von Kontrollpanels und Hauptbewuchsorganismen an den drei Untersuchungsstandorten. Zahlen auf Fotografien geben die Anzahl der Tage an, die die Platte eingetaucht war, als das Bild aufgenommen wurde.

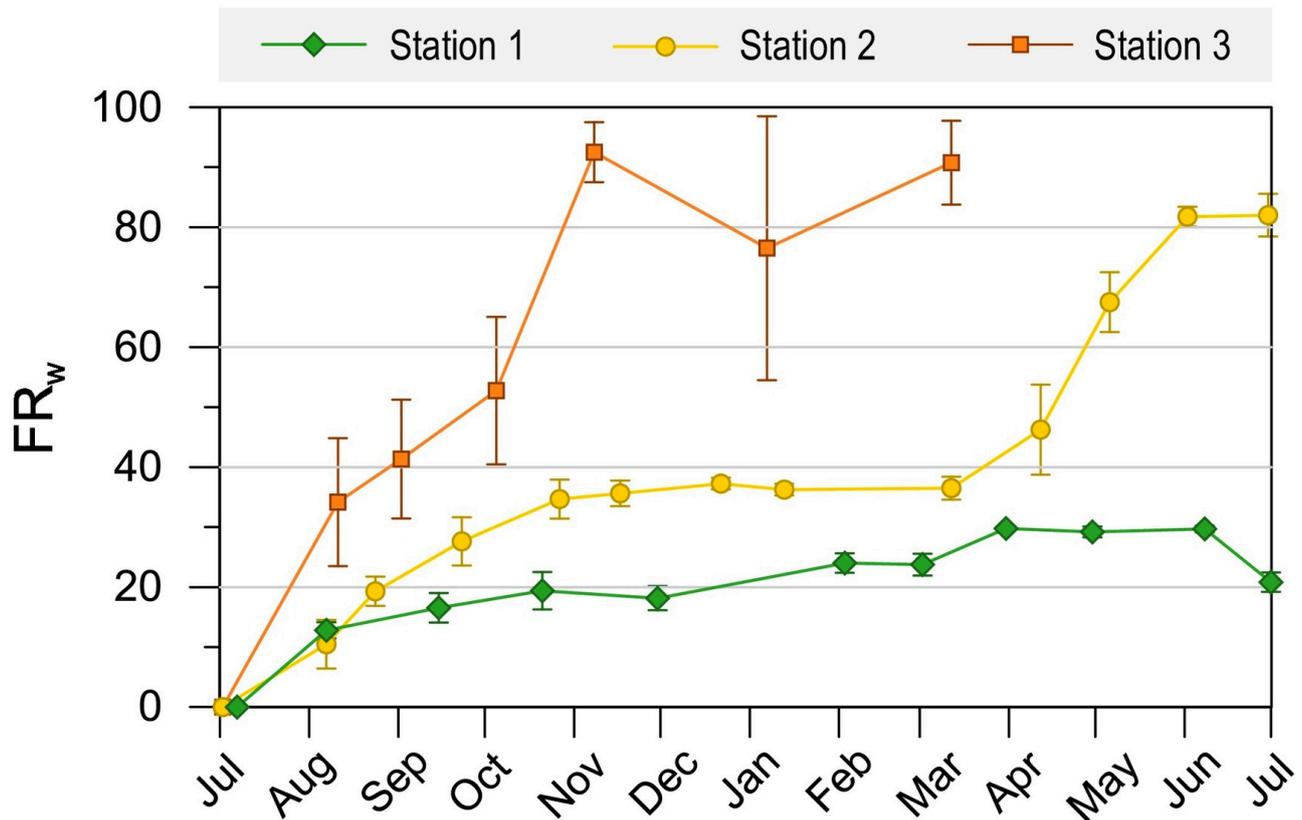


Abb. 4. Berechnete gewichtete Verschmutzungsrate (FR_w) für die Kontrollbeschichtung an den drei Stationen. Fehlerbalken zeigen die Standardabweichung (n = 4 Panels). Die Exposition an Station 3 wurde vorzeitig nach ca. 8 Monaten (im März 2021) beendet.

An Station 2 war der Bewuchs intensiver, darunter eine höhere Vielfalt an Organismen und mehr kalk- und krustenbildende Arten, aber auch Fadenalgen (Abb. 3). Bereits im ersten Monat der Exposition wurden die Platten von Röhrenwürmern (FR40) und krustenbildenden Bryozoen besiedelt, die schnell zu den dominierenden Bewuchsarten auf den Platten wurden. Obwohl während der Wintermonate einige Seepocken auf den Platten auftauchten, trat die Hauptansiedlung von Seepocken ab April auf, was zur Bildung mehrerer Schichten von Bewuchs führte. Dieses Muster spiegelt sich in der berechneten FRw wider, die während der ersten 5 Monate allmählich zunahm und dann im Winter konstant blieb (bei etwa 40), um danach nach der Seepockensiedlung im April schnell auf über 80 anzusteigen (Abb. 4, Tabelle S1). Nach einem Jahr Exposition zeigten die Panels mehrere Bewuchsschichten, darunter Röhrenwürmer, Bryozoen, Seepocken, Austern, Manteltiere und Fadenalgen (Abb. 4, Abb. 5b).

Abb. 5. Durchschnittliche Bedeckung und Art der Verschmutzung (hier als Verschmutzungsrate dargestellt) auf statischen Kontrollen (a–c) und lackierten Blechen mit Kupfer- (d–f und g–i) und Silikon-Fouling-Release-Beschichtungen (j–l). während 1 Jahr kontinuierlicher Exposition an jeder der drei Stationen. Die Exposition an Station 3 wurde vorzeitig nach ca. 8 Monaten (im März 2021) beendet.

An Station 3 war der Bewuchsdruck am höchsten, wobei der Bewuchs bereits nach dem ersten Monat der Exposition schnell zunahm, beginnend mit der Ansiedlung von Miesmuscheln (*Mytilus edulis*), Seepocken und Fadenalgen (Abb. 3, Abb. 5c). Bereits nach 4 Monaten Exposition wurde ein FRw > 90 erreicht (Abb. 4). Der Bewuchs wurde stark von Miesmuscheln mit einer darunter liegenden Seepockenschicht dominiert, aber auch Manteltiere (*Ciona intestinalis*) waren auf den Platten vorhanden. Die Artenvielfalt war im Vergleich zu Station 2 geringer, was wahrscheinlich durch die starke Dominanz der drei genannten Arten erklärt wird. Nach 8 Monaten wurde eine plötzliche Verringerung des Bewuchses auf den Platten beobachtet, was anzeigte, dass die stark beschmutzten Platten gestört worden waren, höchstwahrscheinlich durch Eiderenten, die die Muscheln von den Platten abrissen. Die Hauptfütterungszeit von Eiderenten findet in den späten Wintermonaten statt und Eiderenten sind im Winter in der Gegend weit verbreitet. Der Verlust von Muscheln kann jedoch teilweise auch auf Wellenbewegungen zurückzuführen sein, die dazu führen, dass große schwere Muschelansammlungen von den Platten fallen. Station 3 war im Vergleich zu den beiden anderen Stationen ein exponierterer Standort, da die Paneele an einem schwimmenden Steg in der Mitte einer halbgeschlossenen Bucht hingen. Im Gegensatz dazu hingen die Paneele an Station 1 und 2 an Stegen näher an der Küste. Der Bewuchsverlust auf den Kollektoren führte zu einem vorzeitigen Abbruch der Kollektivüberwachung an Station 3 (Abb. 4, Abb. 5a).

3.1.2. Leistung getesteter Beschichtungen

Die durchschnittliche Menge und Art des Foulings, klassifiziert nach der Fouling-Raten-Skala der US Navy (2006), die auf allen Kupfer- und Fouling-Release-Beschichtungen im Laufe des einjährigen Untersuchungszeitraums vorhanden war, ist in Abb. 5 dargestellt. Vergleich des Hintergrundverschmutzungsdrucks, die klassifizierte Verschmutzung wird auch für die Kontrollfarbe gezeigt. Die durchschnittliche Fouling-Bewertung und Wiederholungsvariabilität für alle Beschichtungen finden Sie in den ergänzenden Informationen (Tabellen S1–S3).

3.1.2.1. Kupferbeschichtungen

Die beiden Kupferfarben (Abb. 5d–f und g–i) zeigten an allen drei Expositionsorten nahezu parallele Ergebnisse, sowohl hinsichtlich der Schwere (d. h. Fouling-Bewertung) der Fouling-Gemeinschaft als auch ihrer zeitlichen Veränderungen. An Station 1 waren beide Kupferbeschichtungen in den ersten 2–3 Monaten frei von Fouling, danach wurden während des restlichen Jahres hauptsächlich beginnender Schleim (FR10) und/oder in geringem Umfang fortgeschrittener Schleim (FR20) beobachtet Expositionsdauer (Abb. 5d und g, Tabelle S1). Auch wenn der durchschnittliche Anteil der mit Fouling bedeckten Oberfläche ($FR > 0$) bei Kupferbeschichtung 2 im Zeitraum September–Mai etwas höher war, ist dieser Unterschied im Vergleich zu Kupferbeschichtung 1 nicht signifikant (siehe Tabelle S1 der ergänzenden Informationen).

An Station 2, wo der Fouling-Druck stärker war, blieben die mit einer der beiden Kupferfarben beschichteten Platten in den ersten 2–3 Monaten der Exposition dennoch frei von Fouling (Abb. 5e und h, Tabelle S2). Das Fouling während der folgenden 3 Monate besteht aus unterschiedlichen Oberflächenbedeckungen (10–80 %) mit beginnendem Schleim (FR10). Nach 6 Monaten, d. h. ab Januar 2021, steigt die Bewuchsbedeckung stetig an und erreicht im März allmählich 100 %, wonach für den verbleibenden Teil des Versuchs keine Teile der Platten mehr bewuchsfrei waren. Während dieses Zeitraums bleibt beginnender Schleim die vorherrschende Art der Verschmutzung auf den Platten mit durchschnittlichen Oberflächenbedeckungen von etwa 80 % für Kupferbeschichtung 1 und 60 % für Kupferbeschichtung 2. Der Rest der verschmutzten Oberfläche war hauptsächlich von fortgeschrittenem Schleim (FR20). Wie bei Station 2 sind beginnender (FR10) und fortgeschrittener (FR20) Schleim die vorherrschenden Arten von Fouling, die auf den an Station 3 freigelegten Kupferbeschichtungen vorhanden sind (Abb. 5f und i, Tabelle S3). Ihre Etablierung erfolgt jedoch viel früher, wobei Schleim auf beiden Kupferfarben bereits bei der allerersten Messung nach nur 1 Monat Exposition beobachtet wird. Während es an Station 2 8 Monate dauerte, bis verschiedene Schleimarten die Oberfläche der beschichteten Platten vollständig besiedelten, dauerte dieser Vorgang an Station 3 nur 3 Monate. An Station 1 mit dem geringsten Verschmutzungsdruck und Salzgehalt trat dies nur einmal auf der Kupferbeschichtungen (Kupferbeschichtung 1) nach 11 Monaten Exposition.

3.1.2.2. Foul-Release-Beschichtung aus Silikon

Bei der biozidfreien FRC waren innerhalb des ersten Monats der Exposition an Station 1 kleine Vorkommen ($\leq 10\%$) von Schleim und Algen auf der Beschichtungsoberfläche vorhanden (Abb. 5 j, Tabelle S1). Die Oberflächenbedeckung mit weichem Bewuchs (FR10–30) stieg dann allmählich von 10 auf 20 % Bedeckung in den ersten vier Monaten (Juli–Oktober), auf 60 % in den folgenden 4 Monaten (November–Februar) und auf 80 % während des 9. Monats Exposition (März). Eine vollständige Oberflächenbedeckung (100 %) wurde im Juni nach 11-monatiger Exposition beobachtet. Obwohl Vorkommen von fortgeschrittenem Schleim (FR20) und Fadenalgen (FR30) beobachtet wurden, war beginnender Schleim (FR10) die vorherrschende Art von weichem Bewuchs über den gesamten Untersuchungszeitraum. Bei der letzten Beobachtung nach 12 Monaten Einwirkzeit war die Bewuchsbedeckung der Oberfläche deutlich geringer und fiel von durchschnittlich 100 % im Vormonat auf 13 %, was wahrscheinlich auf die selbstreinigenden Eigenschaften des FRC zurückzuführen ist. Die bis zu diesem Zeitpunkt auf der Platte angesammelten Verschmutzungen sind möglicherweise zu schwer geworden, um an der rutschigen Oberfläche der Beschichtung haften zu bleiben. Es ist auch möglich, dass die Verschmutzung durch die Einwirkung erhöhter lokaler Strömungen entfernt wurde.

An Station 2 blieb der FRC während der ersten 6 Monate der Exposition im Wesentlichen vollständig frei von Fouling (Abb. 5k, Tabelle S2). Ab Januar wurden beginnende Schleimbildungen (variierend zwischen ~20–90 % Flächenbedeckung) und kleinere Vorkommen von Seepocken (1–16 % Flächenbedeckung) auf den Platten beobachtet. Überraschenderweise wurden auf der FRC an Station 3 (Abb. 5l, Tabelle S3) keine Seepocken oder andere harte Verschmutzungen beobachtet, obwohl die Kontrolltafeln bereits innerhalb des ersten Monats der Exposition einen starken Verschmutzungsdruck mit Besiedlung durch harte Verschmutzungen bezeugen können (Abb. 5c). Dies kann mit Station 2 verglichen werden, wo Fouling-Raten >40 nur 6 Monate nach Beginn der Studie auf den Kontrollpanels beobachtet wurden (Tabelle S2). Es ist dennoch möglich, dass sich am FRC an Station 3 schließlich Hard Fouling gebildet hätte, wenn die Studie an diesem Standort nicht aufgrund der Störung der Panels vorzeitig beendet worden wäre. Obwohl in dieser Studie nicht gemessen, ist es auch möglich, dass Unterschiede in den lokalen Strömungsbedingungen die Ergebnisse beeinflusst haben könnten. Wenn lokale Strömungen an einer Station im Vergleich zu einer anderen deutlich stärker wären, könnte dies theoretisch der Leistung des FRC an dieser Station zugute kommen, indem es ihm ermöglicht wird, sich in größerem Umfang selbst zu reinigen. Der starke Rückgang der beginnenden Schleimbedeckung (FR10) zwischen Dezember 2020 und Januar 2021 an Station 3 könnte beispielsweise auf den Selbstreinigungsmechanismus der Beschichtung zurückzuführen sein. Es sollte jedoch beachtet werden, dass es aufgrund der Lichtreflexion, die durch die glänzende Beschaffenheit der FRC-Oberfläche verursacht wird, besonders schwierig war, beginnenden Schleim (FR10) von einer fäulnisfreien Oberfläche (FR0) zu unterscheiden. Die Kategorie FR10 entspricht weichem Bewuchs, der zu leichten Rot- oder Grüntönen auf der Oberfläche der Beschichtung führt, wobei die lackierte Oberfläche unter dem Bewuchs noch sichtbar ist (US Navy, 2006). Die glänzende Oberfläche des FRC hat möglicherweise zu erhöhten Unsicherheiten bei der Bewertung der Oberflächenbedeckung für diese spezielle Art von leichten Verschmutzungen beigetragen.

3.1.3. Vergleich zwischen Kupfer- und Foul-Release-Beschichtungen

Während sich die beiden Kupferbeschichtungen an allen drei Stellen ähnlich verhielten, wird aus Abb. 5 deutlich, dass sie sich im Vergleich zum FRC unterschiedlich verhielten. Um einen Gesamtvergleich zwischen Beschichtungen anzustellen, wurden gewichtete Verschmutzungsraten (FRw) berechnet (siehe Gleichung (1)) und unter Verwendung von ANOVAs auf signifikante Unterschiede getestet.

An der Stelle mit dem niedrigsten Fouling-Druck, Station 1, war das Ausmaß und die Art des Foulings auf den Kupferbeschichtungen ähnlich. Dies spiegelt sich auch im berechneten FRw wider, wo der statistische Vergleich mittels ANOVA bestätigt, dass die Leistung der beiden Kupferbeschichtungen zu keinem Zeitpunkt während der 1-jährigen Studie signifikant unterschiedlich war (Abb. 6a). An Station 1 war das Vorhandensein von beginnendem Schleim (FR10) als Hauptverschmutzungstyp allen Beschichtungen gemeinsam. Fortgeschrittener Schleim und Algen (FR20 und 30) waren jedoch auf der FRC (je nach Zeitpunkt 2–29 % der Plattenfläche) in größerem Ausmaß vorhanden als auf den Kupferfarben 1 (0–3 %) und 2 (0–1 %) (Abb. 5). Dies führte folglich zu einem höheren durchschnittlichen FRw für die FRC (Abb. 6a). Die statistische Analyse zeigt jedoch, dass sich der FRw des FRC nur zu zwei Zeitpunkten (August 2020 und Mai 2021) signifikant von einer der beiden Kupferbeschichtungen unterschied. Daher schnitten die Kupferbeschichtungen an diesem Standort im Allgemeinen nicht wesentlich besser ab als die FRC.

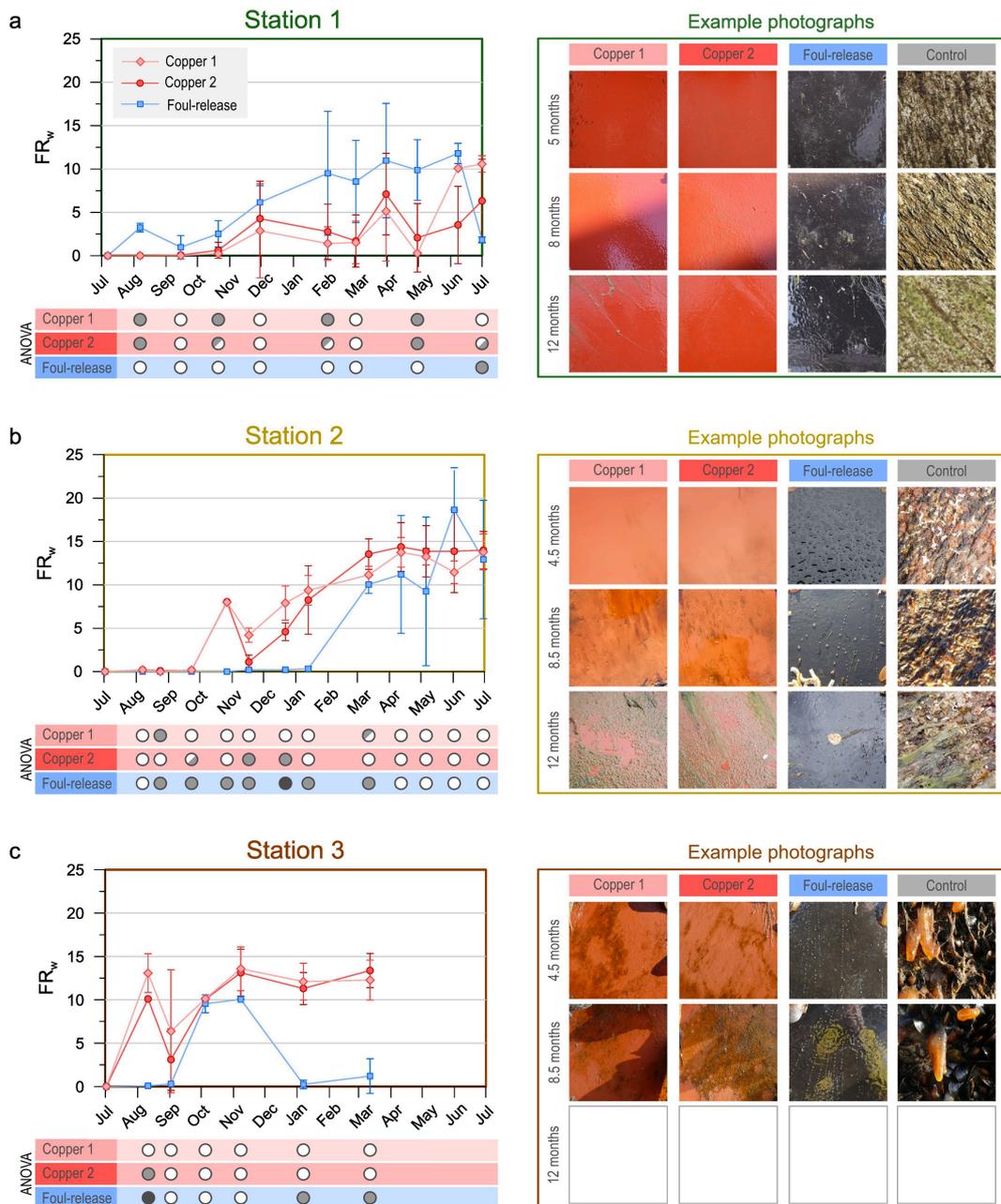


Abb. 6. Berechnete gewichtete Foulingrate (FRw) für die Kupfer- und Fouling-Release-Beschichtungen an Station 1 (a), 2 (b) und 3 (c). Fehlerbalken zeigen die Standardabweichung (n = 4 Panels). Die Ergebnisse der ANOVAs mit HSD-Post-Hoc-Tests von Tukey sind unter jeder jeweiligen Grafik dargestellt, wobei Punkte, die keine Verbindungsfarben enthalten, FRw-Werten entsprechen, die sich als signifikant unterschiedlich erwiesen haben. Einige Beispielfotografien der beschichteten Platten und der Kontrolle von drei verschiedenen Zeitpunkten sind rechts von jedem Diagramm gezeigt. Beachten Sie, dass Fouling, das innerhalb von 13 mm von den Plattenkanten wächst, bei der Bewertung nicht berücksichtigt wurde (siehe Materialien und Methoden).

Die Exposition an Station 3 wurde vorzeitig nach ca. 8 Monaten (im März 2021) beendet.

An Station 2, wo ein mittlerer Verschmutzungsdruck aufrechterhalten wurde, waren beide Beschichtungstypen in der Lage, die Verschmutzung während der ersten drei Monate des Experiments (Juli–September) wirksam zu verhindern, aber ein deutlicher Unterschied zwischen den Beschichtungen kann während der folgenden Herbst-/Wintermonate beobachtet werden (Oktober–Januar). Zu diesem Zeitpunkt wurde allgemein festgestellt, dass der FRC im Vergleich zu beiden Kupferbeschichtungen einen deutlich niedrigeren FRw aufweist: Während der FRw des FRC konstant und nahezu null war, zeigen die beiden Kupferbeschichtungen einen Anstieg des FRw im Vergleich zu den Vormonaten (Juli–September) (Abb. 6b). Dies ist besonders interessant, da der FRw der Kontrollfarbe während dieser Zeit keinen Anstieg des Fouling-Drucks an dieser Station bezeugt. Ganz im Gegenteil scheint das Bewuchswachstum zwischen Oktober und März mehr oder weniger stagniert zu sein (Abb. 4). Die reduzierte Leistung der Kupferbeschichtungen kann somit stattdessen mit verringerten Freisetzungsraten von Bioziden aus den Lacken gekoppelt werden. Die Wassertemperatur an Station 2 sank nach dem Monat September rapide (Abb. 2b). Dieser Temperaturabfall könnte die Freisetzungsraten von Bioziden in der Beschichtung durch verringerte Auflösraten von Bioziden und/oder Farbbindern (Ferry und Carritt, 1946; Rascio et al., 1988) beeinflusst haben, was die Anhaftung und das Wachstum von Schleim und Fäden ermöglicht hat Algen. In den letzten 4 Monaten der Studie zeigten sich sowohl die Kupferbeschichtungen als auch der FRC wieder ähnlich. Dies ist darauf zurückzuführen, dass sich einige kalkhaltige Verschmutzungen, hauptsächlich Seepocken, an den FRC anlagern konnten, was zu einem FRw führte, der mit dem der Kupferbeschichtungen vergleichbar war. Das Ausmaß der Anhaftung des kalkhaltigen Foulings war jedoch durch große Unterschiede zwischen den Wiederholungen gekennzeichnet, wie durch die Fehlerbalken widergespiegelt. Einige einzelne Paneele schnitten daher im Vergleich zu den Kupferbeschichtungen besser ab. Die große Variation zwischen replizierten FRC-Paneele kann teilweise durch die Tatsache erklärt werden, dass die Verschmutzung lose an den FRC-Paneele haftete und sich leicht ablöste, wenn sie berührt wurde, z. beim vorsichtigen Entfernen von großen Schwebefadenalgen, die trotz schonender Handhabung bei der Probenahme manchmal am verwendeten Panelrahmen hängengeblieben sind. Beim Abrufen der Platten im Oktober

2021 wurde auch festgestellt, dass die zuvor beobachteten Seepocken auf den FRC-Platten verschwunden waren, was auf selbstreinigende Eigenschaften hinweist. So zeigen die Ergebnisse für Station 2, dass der FRC eine ähnlich gute oder zu bestimmten Zeitpunkten sogar bessere Leistung als die Kupferbeschichtungen aufwies.

An Station 3 unterschied sich der berechnete FRw der FRC im Allgemeinen nicht signifikant von denen der Kupferbeschichtungen während der ersten 6 Monate der Exposition (Juli–Dezember) (Abb. 6c). Bei den folgenden Erhebungen (im Januar und März 2021) war der FRw des FRC im Vergleich jedoch deutlich niedriger. Zu diesem Zeitpunkt war der zuvor auf der Beschichtung beobachtete beginnende Biofilm (FR10) auf den Aufnahmen der Platten nicht mehr sichtbar, was zu einer Reduzierung des durchschnittlichen FRw von 10 auf ≤ 2 führte. Wie bereits erwähnt, könnte dies das Ergebnis der Selbstreinigung durch die Beschichtung und/oder im Zusammenhang mit Unsicherheiten bei der Bewertung der Abdeckung von als FR10 klassifiziertem Fouling aufgrund von Lichtreflexionen durch die Beschichtungsoberfläche gewesen sein.

Zusammenfassend wurde festgestellt, dass die FRC mit Ausnahme von nur zwei Zeitpunkten an Station 1 unabhängig von der Expositionsstelle oder -zeit gleich gut oder signifikant besser abschnitt als die untersuchten Kupferbeschichtungen. Obwohl sich die Kupferbeschichtungen sowohl in der Menge des zugesetzten Kupferoxids als auch in der Art des Booster-Biozids unterscheiden (Tabelle 1), schnitten sie im Allgemeinen gleich gut ab, wobei statistische Unterschiede nur zu wenigen Zeitpunkten an Station 2 und 3 beobachtet wurden (Abb. 6).

3.1.4. Auswirkungen für Reeder und Bootsfahrer im Ostseeraum

Für das Inverkehrbringen auf dem europäischen Markt müssen biozidhaltige Antifoulingfarben von der zuständigen Behörde in den einzelnen Mitgliedsstaaten zugelassen werden. Die Zulassung kann nur erteilt werden, wenn das Produkt sowohl eine Umweltrisikobewertung als auch eine Wirksamkeitsbewertung besteht, bei der nachgewiesen wird, dass das Produkt gegen seine Zielorganismen wirksam ist (Europäisches Parlament und Rat, 2012). Für die letztgenannte Bewertung hat die Europäische Chemikalienagentur (ECHA) Leitlinien für die Wirksamkeitsprüfung von Antifouling-Farben bereitgestellt (ECHA, 2018). Die Richtlinien sind die gleichen, ob die Farbe für Freizeitboote oder Schiffe bestimmt ist. Danach sollte ein statischer Floßtest mit beschichteten Blechen über einen Zeitraum von mindestens 6 Monaten durchgeführt werden, der den Zeitraum der höchsten Verschmutzungsaktivität abdeckt. Die Beurteilung der Wirksamkeit basiert dann auf der Oberflächenbedeckung mit Makrofouling, definiert als große, distinkte vielzellige Organismen, die für das menschliche Auge sichtbar sind, wie Seepocken, Röhrenwürmer oder Algenwedel > 5 mm. Übertragen auf die in dieser Studie verwendete NSTM-Fouling-Ratenskala entspricht diese Definition von Makrofouling-Organismen ungefähr einem $FR \geq 40$. Gemäß den Richtlinien gilt das Ergebnis eines Produkts als akzeptabel, wenn die Makrofouling-Abdeckung unter 25 % liegt (ECHA, 2018). Alle hier getesteten Beschichtungen, einschließlich der biozidfreien Silikonbeschichtung, konnten somit die von der ECHA formulierte Wirksamkeitsanforderung auch nach einem Jahr Einwirkzeit mehr als zufriedenstellend erfüllen.

Statische Tests von Antifouling-Farben werden typischerweise als Worst-Case-Szenario angesehen, da die stagnierenden Bedingungen in Kombination mit der hohen Bewuchsintensität küstennaher Küstengewässer die Ansiedlung von Bewuchsorganismen stark begünstigen (ECHA, 2018; Cassé und Swain, 2006). Für ein Handelsschiff mit wenig Liegezeit können statische Tests, wie sie in dieser Studie durchgeführt werden, daher ein Worst-Case-Szenario darstellen. Bei einem Sportboot hingegen kann der Test eher die tatsächlichen Einsatzbedingungen widerspiegeln. Nationale Erhebungen in Schweden haben beispielsweise gezeigt, dass Freizeitboote während 85–90 % der Bootssaison im Leerlauf sind (The Swedish Transport Agency, 2015; Swedish Transport Agency, 2021). Die Dauer der Bootssaison in der Ostsee beträgt in der Regel etwa 5 Monate und erstreckt sich von Mai bis Oktober. Die Boote werden im Herbst aufgenommen und über den Winter an Land gelagert, um Schäden durch Sturm und Meereis zu vermeiden. In dieser Studie wurden die Beschichtungen nicht für die gesamte Dauer der Bootssaison 2020 ausgesetzt, da die Platten im Juli eingesetzt wurden, d. h. 2 Monate nach Beginn der Saison. Die Kontrolltafeln zeigen dennoch, dass die Beschichtungen einem erheblichen Verschmutzungsdruck ausgesetzt waren. In Abb. 6 sind Fotos einer der nachgebauten Tafeln nach einem Zeitraum von etwa 5 Monaten, d. h. der ungefähren Länge einer Bootssaison, gezeigt. Zu diesem Zeitpunkt zeigten die statistischen Tests an keinem der Standorte einen signifikanten Unterschied zwischen der Leistung der FRC- und Kupferbeschichtungen. Auch am Ende des Belastungstests nach fast der doppelten Dauer einer Bootssaison oder mehr, also nach 8,5 (Station 3) bzw. 12 Monaten (Station 1 und 2), erwies sich der Silikon-FRC als gleich effizient oder sogar überlegen die Farben auf Kupferbasis. Dieses Ergebnis zeigt, dass die getestete biozidfreie Beschichtung tatsächlich genauso geeignet ist wie herkömmliche Kupferbeschichtungen für Freizeitboote.

Auch wenn die Leerlaufzeit je nach Aktivitätsgrad der Schiffe unterschiedlich sein kann, stellen die Bedingungen statischer Paneltests im Allgemeinen ein Worst-Case-Szenario für diesen Schiffstyp dar. Im Gegensatz zu Freizeitbooten, die meistens am gleichen Liegeplatz liegen, können Schiffe je nach ihrer spezifischen Route unterschiedlicheren Arten von Fouling-Organismen und Belastungen ausgesetzt sein. Trotzdem hat sich die biozidfreie Silikonbeschichtung auch an der Stelle mit dem höchsten Verschmutzungsdruck (Station 3) bewährt. Dies ist besonders interessant, da die statische Belastung insbesondere für die FRC ein Worst-Case-Szenario darstellt, da der Abtrag durch die Wasserscherkraft auf einem fahrenden Schiff erfolgt wäre. Wahrscheinlich wäre die Leistung dieser Beschichtung im Vergleich zu den herkömmlichen Kupferbeschichtungen sogar noch besser gewesen, wenn der Test dynamischere Bedingungen beinhaltet hätte.

Die Ostseeregion erstreckt sich über einen breiten Salzgradienten, der den Artenreichtum und die Bewuchsintensität beeinflusst, mit geringerem Bewuchsdruck in den inneren Teilen der Ostsee und zunehmender Richtung Nordsee (Wrange et al., 2020). Standort 3 befindet sich in einer Region mit hohem Salzgehalt, mit allgemein hohem Verschmutzungsdruck, auch im Vergleich zu anderen europäischen Gewässern (Canning-Clode, 2008). Obwohl diese Studie darauf abzielte, die Eignung biozidfreier FRCs in der Ostsee zu bewerten, deuten ihre Ergebnisse darauf hin, dass aktuelle kommerzielle FRCs auch in anderen Meeren gute Leistungen erbringen könnten.

3.2. Umweltauswirkungen von Silikon-Fouling-Release-Beschichtungen

3.2.1. Toxizität für Wasserorganismen

Sieben ökotoxikologische Studien (nummeriert von 1 bis 7 in Tabelle 3), die mit kommerziellen Silikon-FRCs durchgeführt wurden, wurden identifiziert und überprüft (Truby et al., 2000; Karlsson und Eklund, 2004; Watermann et al., 2005; Feng et al., 2012). ; Okamura et al., 2012; Piazza et al., 2018; Muller-Karanassos et al., 2021). Bei diesen ökotoxikologischen Bewertungen wurden Testorganismen entweder den getauchten Beschichtungen (Studien 1, 3 und 4), Beschichtungssickerlösungen (Studien 2, 3, 5 und 6) oder mit Farbpartikeln angereichertem Sediment (Studie 7) ausgesetzt. Aber selbst für die gleiche Art der Exposition unterschieden sich die Auswahl des Organismus, die ökotoxikologischen Endpunkte, die Arten der Silikonbeschichtung und die Vorbehandlung der Beschichtung (d. h. vor dem Eintauchen oder nicht). Insbesondere die Wahl des Verhältnisses zwischen Beschichtungsfläche (in cm²) und Lösungsvolumen (in ml) in den Studien mit Beschichtungssickerwasserlösungen variierte erheblich von 1:0,44 bis hinunter zu 1:100. Details zum Testdesign und zentrale Ergebnisse der Studien sind in Tabelle SI4 der ergänzenden Informationen zusammengefasst.

Tabelle 3. Design- und Toxizitätsendpunkte von ökotoxikologischen Studien, die mit handelsüblichen Silikon-Fouling-Release-Beschichtungen durchgeführt wurden. Die Studien sind in chronologischer Reihenfolge aufgeführt. Details zum Testdesign und zentrale Ergebnisse der Studien sind in Tabelle SI4 der ergänzenden Informationen zusammengefasst.

Reference	Media	Tested silico	Negative	Positive control	Coating condition	Exposed organism	Exposure	Ecotoxicological
1. Truby et al.	Water of unspecified	RTV11 (a PDMS)	No	Yes An	Fresh	Mysid shrimp (<i>Mysid</i>)	4 days	Lethality, LC50

(2000) Exposure to immersed coating	cited natural silicone elastomer from GE Silicones)			ablative copper coating		Silverside fish (<i>Menidia beryllina</i>)	4 days	Lethality, LC50
2. Karlsson and Eklund (2004) Exposure to immersed coating	Natural seawater (7 or 20 PSU)	Intersleek 700 (International paint)	No	Yes A copper coating with Irgarol (Cruiser Superior)	Pre-immersed for 1 h	Macroalgae (<i>Ceramium</i>)	14 days	Growth inhibition, EC50
						Macroalgae (<i>Ceramium</i>)	14 days	Growth inhibition, EC50
						Copepod (<i>Nitocra</i>)	14 days	Lethality, LC50
3. Walterman et al. (2005) Exposure to immersed coating	Natural seawater	10 anonymous commercial silicone foul-release coating	Yes	No	Fresh	Marine bacteria (<i>Vibrio</i>)	30 min	Luminescence inhibition
					Pre-immersed for 6–8 weeks	Crustacean larvae (<i>Balanus amphitrite</i>)	5–7 days	Mortality rate
4. Feng et al. (2012) Exposure to immersed coating	Seawater (sea urchin) or rearing medium (fish)	Intersleek 425 Intersleek 757 Intersleek 970 (all from International)	Yes	No	Fresh or pre-immersed for 1 month	Sea urchin (<i>Arbacia punctulata</i>)	48 h	Embryonic development (frequency of hatching)
						Fish, Japanese medaka (<i>Oryzias latipes</i>)	72 h	Embryonic development (hatching success, survival)
5. Okamura et al. (2007) Exposure to immersed coating	Artificial seawater	1 anonymous commercial silicone foul-release coating	No	Yes A copper coating with Irgarol (Cruiser Superior)	Pre-leached for 1 h	Marine bacteria (<i>Photobacterium</i>)	1 h	Luminescence inhibition

al. (2012) Exposure to leach	ater	comme rcial silicon e foul-release coating (suppli		copper coating with zinc pyri thione (Intern	differ ent amounts of time (up to	Marine diatom (<i>Skeleto</i>	72 h	Growth rate inhibition
						Crustace an	48 h	Lethality, LC50
6. Piazza et al. (2018) Exposure to leach	Natur al seawater (37 PSU)	5 anony mous comme rcial silicon e foul-release coating	Yes	No	Pre-imme rsed for 24 h, 7 day s, 14 da ys,	Crustace an larvae (<i>Amphib alanus Amphitr ite</i>)	24 h	Acute toxicity (immobil ity percentag e of larvae) and swimmin
7. Muller-Karassos et al. (2021) Expos	Estua rine sedi ment	Particl es from an anony mous comme rcial silicon	Yes	Yes	Pre-imme rsed for 5– 10 da ys	Ragwor m (<i>Hediste diversic</i>	18 da ys	Feeding rate, weight change,
						Cockle (<i>Cerasto derma edule</i>)	18 da ys	Feeding rate, weight change,

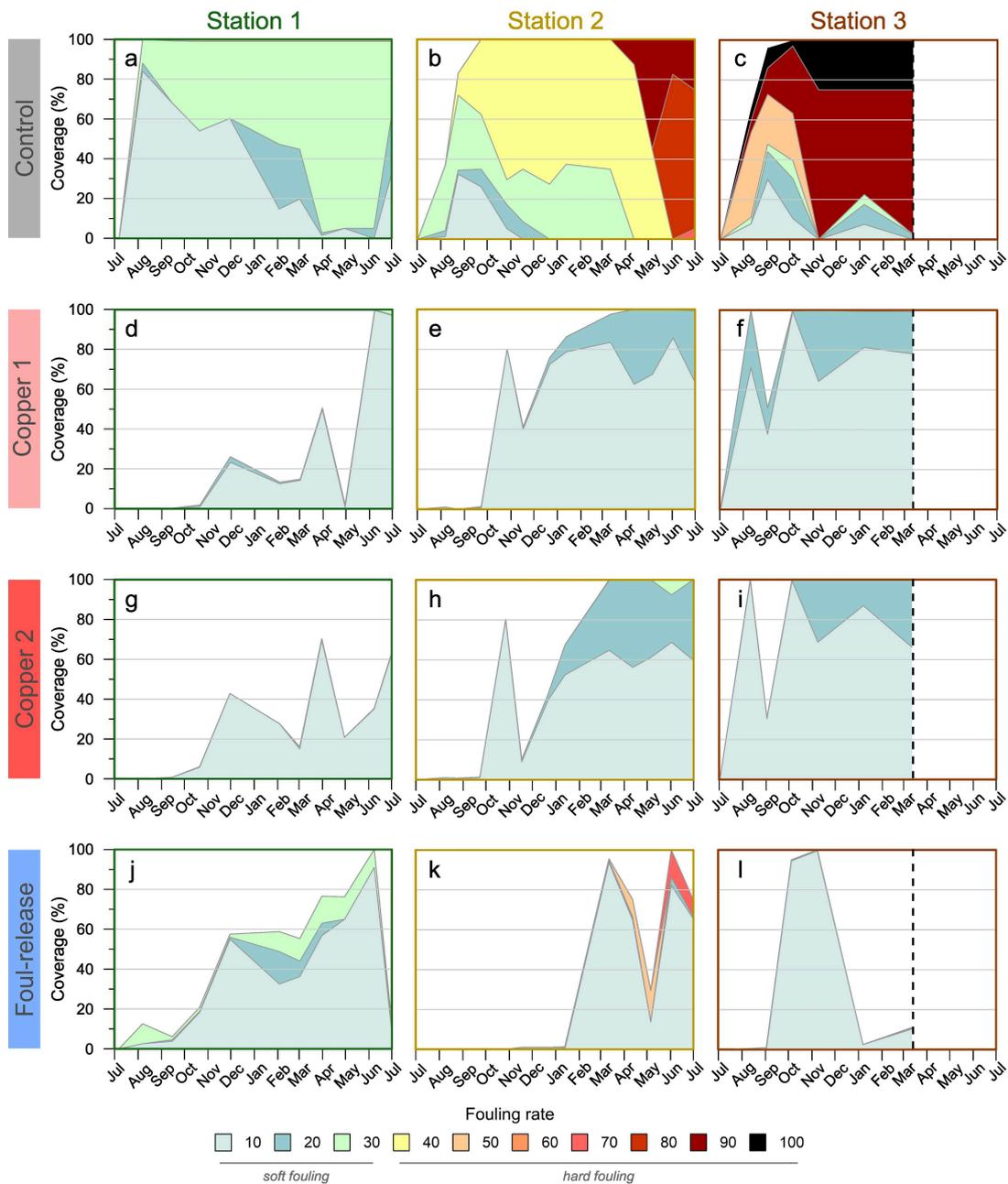
a

PDMPDPS = polydimethyldiphenylsilicone.

Drei der Studien (Studien 1, 2 und 5) verwendeten eine positive Kontrolle (Kupferbeschichtung, typischerweise mit einem Booster-Biozid), was es ermöglicht, die ökotoxikologische Reaktion zwischen Silikon-FRCs und herkömmlichen Beschichtungen auf Kupferbasis zu vergleichen. Die Ergebnisse zeigen, dass Kupferbeschichtungen im Vergleich zu Silikon-FRCs eine wesentlich höhere Toxizität gegenüber allen getesteten Organismen aufweisen, darunter Bakterien, Diatomeen, Makroalgen, Ruderfußkrebse, Garnelen und Fische (Tabelle SI4). Für viele Organismen waren die getesteten Sickerwasserkonzentrationen aus den Silikon-FRCs nicht hoch genug, um überhaupt die Bestimmung eines EC50- oder LC50-Werts zu ermöglichen, während die Auswirkungen der Exposition gegenüber Kupferbeschichtungen bei ziemlich niedrigen Sickerwasserkonzentrationen deutlich waren (z. B. Studien 1 und 2). Das bedeutet jedoch nicht zwangsläufig, dass Silikon-FRCs für Meeresökosysteme ungiftig sind. In den Studien mit Negativkontrolle (Studien 3, 4 und 6) wurden im Vergleich zur Kontrolle (keine Beschichtung) einige ökotoxikologische Wirkungen durch die Exposition gegenüber Silikonbeschichtungen oder deren Sickerwasser beobachtet. In Studie 3 untersuchten Watermann et al. (2005) fanden heraus, dass 3 von 10 getesteten Silikon-Decklacken leicht toxisch für Meeresbakterien waren (Watermann et al., 2005). Darüber hinaus wurde eine 100-prozentige Sterblichkeit von Cypris-Larven bei direkter Exposition gegenüber einer der getesteten Beschichtungen beobachtet, da die Larven in aus der Beschichtung austretendem Silikonöl stecken blieben und sie unbeweglich machten. In Studie 4 untersuchten Feng et al. (2012) verglichen die Auswirkungen von frischen und vorgetauchten Beschichtungen auf die Embryonalentwicklung von Seeigeln und Fischen für zwei hydrophobe Silikonbeschichtungen (Intersleek 425 und 757, wobei letztere die Deckschicht des Intersleek 700-Systems ist) und eine Fluorpolymer-Silikonbeschichtung (Intersleek 970, Deckschicht des Intersleek 900-Systems) (Feng et al., 2012). Wenn frische Beschichtungen verwendet wurden, erreichten alle exponierten Seeigel-Embryonen bei 2 von 3 Beschichtungen (Intersleek 425 und 970) keine späteren Entwicklungsstadien (Pluteus oder vollständiger Pluteus), da sie ihre Entwicklung im frühesten Stadium vor dem Prisma stoppten.

In ähnlicher Weise wurde ein signifikant negativer Effekt für diese beiden Beschichtungen auf den Schlupferfolg der Fischeier des japanischen Medakas (*Oryzias latipes*) beobachtet. Zusätzlich wurde bei allen drei Beschichtungen eine Unfähigkeit zum Aufblasen der Schwimmblase bei allen Embryonen beobachtet. Diese toxischen Wirkungen wurden verringert, wenn die Beschichtungen 1 Monat lang unter fließendem Meerwasser vorgetaucht wurden. Nichtsdestotrotz zeigte Intersleek 970 immer noch einen deutlich negativen Einfluss auf die embryonale Entwicklung von Seeigeln, und die Schwimmblaseninflation der embryonalen Fischeier fehlte trotz Voreintauchens sowohl bei Intersleek 425 als auch bei 970 vollständig. Auch wenn es ungewiss ist, wie repräsentativ die Bedingungen dieser statischen Embryotoxizitätstests mit geringem Volumen (Verhältnis von Beschichtung zu Volumen von 1:1) im Vergleich zu den Umgebungsbedingungen sind, unterstreicht die Studie, dass kommerzielle FRCs Wirkstoffe freisetzen können, insbesondere während ihres ersten Eintauchens. Dies wurde auch in Studie 6 bestätigt, in der Piazza et al. (2018) bewerteten die Toxizität von 5 kommerziellen Beschichtungen nach unterschiedlichen Eintauchzeiten (24 h–3 Monate), auch unter Verwendung eines Tests mit geringem Volumen (Verhältnis Beschichtung zu Volumen von 1:0,44) (Piazza et al., 2018). Hier waren die ökotoxikologischen Endpunkte die Immobilität und die Änderung der Schwimmgeschwindigkeit von Seepocken-Cypris-Larven. Die Autoren stellten fest, dass die negativen Auswirkungen mit zunehmender Zeit vor dem Eintauchen reduziert wurden, ohne signifikante Auswirkungen im Vergleich zur Kontrolle für eine der Beschichtungen nach 2 Monaten. Zuvor wurden einige Unterschiede zwischen den Beschichtungen beobachtet: Während drei der Beschichtungen nur für die kürzeste Zeit vor dem Eintauchen (24 h) akute (Immobilitäts-)Wirkungen bei den Larven zeigten, zeigten die anderen zwei immer noch signifikante toxische Wirkungen nach 2 Wochen und jeweils 1 Monat Immersion.

Studie 7 untersuchte die ökotoxikologische Wirkung von Silikonfarbpartikeln auf im Sediment lebende Organismen (einen Wurm und eine Herzmuschel) (Muller-Karanassos et al., 2021). Hier wurden sowohl Negativ- als auch Positivkontrollen eingeschlossen, die entweder aus unveränderten Sedimenten (negativ) oder Sedimenten mit Zusätzen von historischen (auf verlassenen Booten gesammelten) oder modernen bioziden Farbpartikeln (positiv) bestanden. Die Mengen an zugesetzten Farbpartikeln basierten auf mittleren beobachteten Konzentrationen im Feld, und verschiedene subletale Wirkungen wurden nach 18 Tagen bewertet (Tabelle 3). Am giftigsten waren die modernen bioziden Farbpartikel, die im Vergleich zu den historischen eine höhere Kupferkonzentration enthielten. Der Test mit modernen bioziden



Farbpartikeln führte nach 18 Tagen zu gesundheitsschädlichen Wirkungen beim Kreuzbandwurm (verringerte Fressrate und Gewichtsverlust) und war akut toxisch für Herzmuscheln mit Mortalität aller Wiederholungen innerhalb der ersten 10 Tage der Exposition. Für den Test mit Siliconfarbenpartikeln wurden außer der Gewichtsveränderung bei den Herzmuscheln keine signifikanten Unterschiede im Vergleich zur Kontrolle beobachtet. Dieser Effekt war jedoch nicht wesentlich, und die Autoren schlussfolgern im Allgemeinen, dass die Silikonfarbpartikel keine gesundheitsschädlichen Auswirkungen auf Herzmuscheln oder Kreuzbandwürmer hatten.

In den meisten der untersuchten Studien waren die Identitäten von Silikonbeschichtungen anonym, was problematisch ist, da sich die Beschichtungsformulierungen wahrscheinlich nicht nur zwischen den Herstellern, sondern auch im Laufe der Zeit unterscheiden werden, wie bereits erwähnt (Abb. 1). Einige allgemeine Schlussfolgerungen können dennoch gezogen werden. Zusammenfassend lässt sich sagen, dass, obwohl einige Studien auf mögliche negative Auswirkungen von Silikonbeschichtungen auf Meeresorganismen hinweisen, kupferhaltige Beschichtungen erheblich toxischer sind. Darüber hinaus scheint eine potenzielle Freisetzung von Wirkstoffen aus Silikonbeschichtungen hauptsächlich innerhalb der ersten 2 Monate des Eintauchens zu erfolgen. Dies könnte vielleicht erklären, warum in Studie 3, in der die Beschichtungen 6–8 Wochen lang eingetaucht wurden, im Allgemeinen keine Immobilität von Cypris-Larven beobachtet wurde, in Studie 6 jedoch leicht beobachtet wurde hängt also davon ab, ob eine Vortauchung der getesteten Beschichtung(en) durchgeführt wurde. Außerdem wurden in Studien, in denen mehrere Produkte parallel getestet wurden (Studien 4 und 6), nicht generell für alle Silikonbeschichtungen die gleichen toxischen Wirkungen beobachtet. Daher ist die spezifische Formulierung der Beschichtung (d. h. die Identität des spezifischen Produkts) wichtig. Die Ergebnisse einer Silikonbeschichtung sind daher nicht repräsentativ für alle Silikonbeschichtungen im Allgemeinen. Dies deutet auch darauf hin, dass Zusatzstoffe und nicht das in allen Beschichtungen vorhandene PDMS-Elastomer für alle beobachteten Effekte verantwortlich sind. Schließlich ist die Expositionskonzentration von Bedeutung. Intersleek 700 wurde in den beiden Studien 2 und 4 getestet, die sehr unterschiedliche Ansätze und folglich unterschiedliche Ergebnisse hatten. In Studie 2 war das Verhältnis von Beschichtung zu Volumen das niedrigste aller Studien und 100-mal niedriger im Vergleich zu Studie 4.

Obwohl die Auslaugungszeit in Studie 2 (14 Tage) länger war als in Studie 4 (2 oder 3 Tage), ist es daher vielleicht nicht überraschend, dass die Sickerwasserkonzentration keine Bestimmung von EC50- oder LC50-Werten für die Endpunkte ermöglichte von Studie 2. Andererseits kann die Umweltrelevanz der Verwendung hoher Beschichtungs-zu-Volumen-Verhältnisse diskutiert werden. In Studie 4 untersuchten Feng et al. (2012) geben an, dass das Ziel darin bestand, die spezifischen Auswirkungen auf Embryonen in der Nähe oder auf den Beschichtungen zu modellieren, da sie argumentieren, dass Embryonen leicht in die rutschfeste Schicht über dem Rumpf eines angedockten Schiffes eindringen können (Feng et al., 2012). Während ein hohes Verhältnis von Beschichtung zu Volumen daher für bestimmte Situationen und Organismen relevant sein kann, haben Piazza et al. (2018) (Studie 6) argumentieren, dass die Ergebnisse aus ihrem Expositionsszenario, das das höchste Verhältnis (1:0,44) aufwies, nicht als Nachweis für die tatsächliche Toxizität oder potenzielle Umweltgefährdung der Beschichtungen verwendet werden sollten, sondern lediglich zum Vergleich möglicher Potenziale Freisetzung von Wirkstoffen (Piazza et al., 2018). Die Ergebnisse aus den Studien mit konzentrierter Sickerwasserbelastung werfen dennoch die Frage auf, ob der Fouling-Verhinderungsmechanismus aller handelsüblichen Silikonbeschichtungen tatsächlich rein physikalisch ist. Weitere Studien, in denen bekannte kommerzielle Beschichtungszusammensetzungen getestet werden, sind daher gerechtfertigt. Darüber hinaus sollte die Herstellung von Beschichtungslösungssickerwasser standardisiert werden, um direkte Vergleiche zwischen Studien zu verschiedenen Beschichtungen zu ermöglichen.

3.2.2. Leachables und ihre potenzielle Umweltgefährdung

Wie im vorherigen Abschnitt diskutiert, scheint die Toxizität von Silikon-FRCs im Vergleich zu Kupferbeschichtungen sehr gering zu sein. Einige Studien weisen jedoch darauf hin, dass einige Beschichtungen während der ersten 1–2 Monate des Eintauchens Wirkstoffe auslaugen können (Feng et al., 2012; Piazza et al., 2018). Die chemische Natur dieser Substanzen ist nicht bekannt und könnte alles sein, von Katalysatoren, nicht umgesetzten Komponenten, die an die Oberfläche des Polymers wandern, Lösungsmittel und/oder geringe Mengen toxischer Verbindungen in Pigmenten und anderen Zusatzstoffen (Feng et al., 2012). Substanzen, über die in der Literatur berichtet wurde und die absichtlich oder unbeabsichtigt aus kommerziellen Silikonbeschichtungen enthalten und ausgelaugt werden können und umweltbedenklich sein können, wurden hier zusammengefasst.

Die Zugabe und Auswaschung von hydrophoben Silikonölen wird in der Literatur vielfach erwähnt (Lejars et al., 2012; Hu et al., 2020; Truby et al., 2000; Watermann et al., 2005). Solche Öle, die im Bereich von 1–10 Gew.-% FRCs vorhanden sein können, werden mit dem Ziel zugesetzt, als Weichmacher zu wirken, aber auch die Antifouling-Leistung zu verbessern. Die Öle wandern und bilden einen öligen Film auf der Oberfläche der Beschichtung, wodurch sie rutschiger wird und frühe Verschmutzungsstadien mit sich bringt, wenn sie ins Meer gelangen (Lejars et al., 2012). Das Ausmaß, in dem Silikonöle in derzeit verfügbaren Beschichtungen vorhanden sein können oder nicht, ist nicht bekannt, da diese Informationen von den Herstellern nicht offengelegt werden. Eine Übersicht von Nendza (2007) hat Bedenken hinsichtlich der möglichen weitreichenden physikalischen Auswirkungen dieser Art von auslaugbaren Stoffen auf die Umwelt geäußert. Nendza (2007) argumentiert, dass die Auswaschung von Silikonölen, d. h. PDMS, zur Bildung eines Ölfilms auf Sedimenten und bei hohen Expositionen zum potenziellen Einfangen und Ersticken von Meeresorganismen führen könnte. Auch wenn die wissenschaftlichen Beweise für letzteres etwas schwach erscheinen und die Toxizität und das Bioakkumulationspotenzial von reinem PDMS Berichten zufolge gering sind (Stevens et al., 2001; Wang et al., 2021), beruhend auf der Auswaschung von persistenten Silikon-Ölbasierte Flüssigkeiten sind möglicherweise nicht die umweltverträglichste Art, Antifouling-Schutz zu bieten. Die kürzlich erforschten abbaubaren Silikon-Fouling-Release-Beschichtungen, die auf der Erosion der Beschichtung durch Hydrolyse beruhen und dadurch absichtlich Polysiloxane in die Umwelt freisetzen würden, sind aus genau dem gleichen Grund fragwürdig, obwohl diese Technologie (noch) nicht als kommerzielles Produkt bekannt ist (Gevaux et al., 2019; Hu et al., 2021).

Der Zusatz von fluorierten Substanzen stellt einen weiteren ökologisch bedenklichen Ansatz dar, um die Leistung von Silikon-FRCs zu verbessern. Obwohl argumentiert wurde, dass die Verwendung von Materialien auf Silikonbasis zusammen mit fluorierten Verbindungen das Beste aus „zwei Welten“ in Bezug auf die Antifouling-Leistung kombiniert, wurde auch vorgeschlagen, dass die Verwendung von Per- und Polyfluoralkyl-Substanzen (PFAS) allgemein empfohlen werden sollte aufgrund ihrer hohen Persistenz und potenziellen Umweltgefährdung begrenzt sein (Nurioglu et al., 2015; Glüge et al., 2020). Einige Forscher haben daher die freiwillige Entfernung fluoriertes Substanzen aus Silikonbeschichtungen gefordert, da fluorfreie Ersatzstoffe nachweislich ähnlich gute Ergebnisse erzielen (Vesco et al., 2019). Bei kommerziellen Silikon-FRCs wurde beispielsweise von Intersleek 1100SR (eingeführt im Jahr 2013) berichtet, dass es PFAS enthält (Wang et al., 2020). Obwohl Intersleek 1100SR derzeit noch auf dem Markt ist, scheint die jüngste Einführung von International Paint (Intersleek 1000 im Jahr 2016) fluorfrei zu sein, was vielleicht ein Zeichen für die Absicht des Unternehmens sein könnte, fluorierte Substanzen schrittweise einzustellen. In der EU werden mehrere PFAS in den kommenden Jahren eingeschränkt und eine Reihe weiterer PFAS stehen auf der REACH-Kandidatenliste der besonders besorgniserregenden Stoffe (ECHA, 2021). Dies kann dazu beitragen, die Verwendung von fluorierten Verbindungen in FRCs in der Zukunft einzuschränken.

Während die Zugabe von hydrophoben Silikonölen implementiert wurde, um die Leistung von PDMS-basierten Beschichtungen durch ihre beabsichtigte Freisetzung zu verbessern, können Produkte der 2. und 3. Generation (siehe Einleitung) stattdessen unter der unbeabsichtigten Freisetzung von amphiphilen Ölen leiden. Obwohl diese Blockcopolymere nicht in der Beschichtungsmatrix gebunden sind, sollen sie an der Beschichtungsoberfläche „verankert“ bleiben, um der Oberfläche die gewünschten amphiphilen Eigenschaften zu verleihen, die Fouling verhindern können. Die Stabilität dieser oberflächenaktiven Additive hängt von ihrer Chemie ab, aber eine Studie über experimentelle Beschichtungen mit Konzentrationen von bis zu 7 Gew.-% PDMS-PEG-basierter Copolymere zeigt auch Beschichtungsformulierung (z. B. das Vorhandensein von Bioziden) und Umgebungsparameter (z. B. Meerwassertemperatur), um ihre Freisetzungsraten zu beeinflussen (Camós Noguera et al., 2017). Wenn die hinzugefügten Blockcopolymere verloren gehen oder abgebaut werden, kann ein Regenerationsprozess stattfinden, bei dem Copolymermoleküle im Großteil der Beschichtung an die Oberfläche diffundieren, um verlorene zu ersetzen (Inutsuka et al., 2013). Dieses Verfahren ist jedoch nur wirksam, solange es keinen Mangel an Copolymermolekülen in der Masse der Beschichtung gibt. Die Hydrogelbeschichtungen von Hempel (z. B. Silic One und sein Schiffsgegenstück Hempasil X3+) nutzen diese Technologie. In der PDMS-Matrix sollen Hydrogelvorläufer vorhanden sein, die im Schadensfall die Hydrogeloberfläche der Beschichtung regenerieren können (Thorlaksen et al., 2010). Eine Studie zur Bewertung des Masseverlusts in Silikonbeschichtungen beim Eintauchen in destilliertes Wasser bei Raumtemperatur ergab, dass Hempasil X3 innerhalb von etwa 8 Monaten einen Verlust von 8 Gew.-% aufwies. Es wurde die Hypothese aufgestellt, dass dieser Verlust auf das Auswaschen von nicht gebundenen Copolymeren zurückzuführen ist (Gevaux, 2019). Ob auch die aktuelle Produktversion Hempasil X3+ einen solchen Massenverlust aufweisen kann, ist nicht bekannt. Sigmaglilide 1290 von PPG soll auch über eine dynamische Oberflächenregeneration verfügen, die den Leistungsverlust während der gesamten Lebensdauer des Produkts verhindert (PPG, 2021). Oliveira und Granhag (2020) legten mit Sigmaglilide 1290 beschichtete Platten frei und stellten fest, dass „[...] während der ersten drei Monate nach dem Einsatz ein dünner Ölfilm auf der Meeresoberfläche beobachtet werden konnte, als die Platten für

monatliche Inspektionen zurückgeholt wurden” (Oliveira und Granhag , 2020). Diese nicht gebundenen Öle könnten entweder hydrophober oder amphiphiler Natur gewesen sein (Gevaux, 2019). Da Farbformulierungen als geschützte Informationen gelten, ist die Identität von Zusatzstoffen in kommerziellen Produkten unbekannt, und es ist daher schwierig, über ihre potenzielle Toxizität zu spekulieren. Was das Umweltverhalten von amphiphilen Additiven anbelangt, ist der Verankerungsteil typischerweise auf PDMS-Basis, was bedeutet, dass diese Substanzen wahrscheinlich persistenter Natur sind. Daher sollten Anstrengungen unternommen werden, um ihre Freisetzung zu vermeiden.

Das Auftreten und Auswaschen von Organozinnverbindungen aus Silikonbeschichtungen wurde ebenfalls untersucht, da die häufigste Härtungsreaktion zur Herstellung der PDMS-Elastomere in kommerziellen Silikon-Fouling-Release-Produkten die Verwendung einer Organozinnverbindung als Katalysator beinhaltet, am typischsten Dibutylzinn (DBT) oder Dioctylzinnverbindungen (Lejars et al., 2012). Obwohl Organozinn in Antifoulingfarben von der International Maritime Organization seit 2008 verboten ist, sind geringe Zusätze nach der AFS-Konvention zulässig (IMO, 2005). In den Fällen, in denen DBT verwendet wurde, können auch Tributylzinn (TBT) und Monobutylzinn (MBT) als Verunreinigungen in der Beschichtung vorhanden sein (Watermann et al., 2005). Auslaugtests von sechs kommerziellen Beschichtungen zeigten jedoch entweder nicht nachweisbare oder sehr geringe Freisetzungen von MBT ($\leq 0,0006 \mu\text{g}/\text{cm}^2/\text{Tag}$), DBT ($\leq 0,007 \mu\text{g}/\text{cm}^2/\text{Tag}$) und TBT ($\leq 0,0002 \mu\text{g}/\text{cm}^2/\text{Tag}$) (Watermann et al., 1997). Trotzdem wurde vorgeschlagen, dass es ratsam wäre, andere Katalysatoren zu verwenden, da solche verfügbar sind (Lejars et al., 2012; Watermann et al., 2005).

Aus toxikologischer Sicht stellt die absichtliche Freisetzung von Bioziden wahrscheinlich die größte Bedrohung für die Meeresumwelt dar, wenn es um Silikon-FRCs geht. Biozide Silikonbeschichtungen wurden aufgrund technischer Herausforderungen erst in den letzten Jahren auf den Markt gebracht (Abb. 1). Die erfolgreiche Einarbeitung von Wirkstoffen zur Verbesserung der Antifoulingleistung wurde dadurch erschwert, dass die Silikonmatrix nur geringe Zugaben von Bioziden verträgt, ohne die Oberflächenglätte der Beschichtung zu beeinträchtigen (Ciriminna et al., 2015). Zugesezte Biozide können auch in der hochvernetzten PDMS-Matrix eingeschlossen werden und daher nicht leicht an die Oberfläche wandern (Thomas et al., 2004). Um diese Probleme zu lösen, enthält die 2013 eingeführte Hempaguard-Produktserie von Hempel mikroverkapselte Biozide, die eine kontrollierte Diffusion und Freisetzung des Wirkstoffs Kupferpyrithion ermöglichen (Ciriminna et al., 2015; Hempel, 2021). Dennoch ist zu beachten, dass Hempaguard im Vergleich zu herkömmlichen Kupferbeschichtungen deutlich weniger Biozide zugesetzt werden (Radenovic et al., 2014). Chugokus Bioclean Plus soll auch Kupferpyrithion enthalten (Lloyd's Register, 2019). Obwohl die Art der Einarbeitung in diese Beschichtung nicht bekannt ist, wird das Produkt vom Hersteller mit einer kontrollierten linearen Freisetzung von Wirkstoffen vermarktet (CMP, 2014). Ein nachhaltigerer Ansatz, um die Vorteile der Aufnahme eines Wirkstoffs in die Formulierung zu nutzen und gleichzeitig seine Freisetzung in die Meeresumwelt zu vermeiden, war das Ziel einiger neuerer Studien (Silva et al., 2019; Ferreira et al., 2020; Silva et al., 2021). Hier wurden nicht freisetzende biozide Beschichtungen durch die Pfropfung eines Biozids (Econea) in die Beschichtungsmatrix von Hempasil X3+ erhalten. Es wurde festgestellt, dass die Fixierung des bioziden Wirkstoffs die Umweltbelastung reduziert, sogar während simulierter Trageszenarien (Silva et al., 2021). Die Verwendung dieser Technik in kommerziellen Produkten würde sicherlich dazu beitragen, Umweltrisiken, die mit bioziden Silikon-FRCs verbunden sind, weiter zu mindern.

3.3. Barrieren für den Übergang zu biozidfreien Foul-Release-Beschichtungen

Obwohl Silikon-FRCs im Vergleich zu herkömmlichen Kupferbeschichtungen ähnliche oder in einigen Fällen überlegene Antifouling-Eigenschaften zu haben scheinen, wie hier und in einer früheren Studie im Ostseeraum (Oliveira und Granhag, 2020) gezeigt wurde, und eine wesentlich geringere Umweltbelastung, wie oben diskutiert, entscheidet sich immer noch eine Mehrheit der Schiffs- und Sportbooteigner und -betreiber für die Verwendung von biozidhaltigen Beschichtungen auf ihren Schiffsrümpfen (Ciriminna et al., 2015). Hindernisse für ihre Etablierung auf dem Markt, wie sie von Endverbrauchern und Beschichtungsherstellern wahrgenommen werden, werden als nächstes in Bezug auf den Freizeit- und den professionellen Markt erörtert.

Sowohl der kommerzielle als auch der Freizeitmarkt sind traditionell, wenn es um die Wahl des Antifouling-Systems geht, ihre Endverbraucher sind eher skeptisch gegenüber nicht-bioziden Lösungen (Kim, 2021; Sandgren, 2021). Für den Freizeitmarkt liegt das größte Hindernis für die Etablierung biozidfreier Silikonbeschichtungen laut dem Beschichtungshersteller Hempel daher in der Regulierung, genauer gesagt in der weiteren Zulassung von bioziden Farben (Sandgren, 2021). Die Regulierung der auf den Markt gebrachten Produkte, anstatt von Bootsfahrern zu erwarten, dass sie fundierte und umweltfreundliche Entscheidungen treffen, kann daher ein effektiverer Weg zu einem nachhaltigen Freizeitbootfahren sein (Lepoša, 2017). Eine weitere wahrgenommene Hürde für diesen Sektor kann in der anfänglichen Aufbringung der Beschichtung auf dem Rumpf liegen. Da Sportbootfahrer im Ostseeraum in der Regel keine Profis beauftragen, sondern den Rumpf selbst beschichten, kann die Umstellung auf ein Silikonbeschichtungssystem mühsam sein. Frühere Beschichtungsschichten mit biozidhaltigen Farben müssen typischerweise entfernt und vor dem Auftragen der Silikondeckschicht eine Haftschiicht aufgetragen werden. Kürzlich wurde jedoch ein Haftvermittler auf den Markt gebracht, der direkt auf bestehende biozidbasierte Beschichtungen aufgetragen werden kann und den Übergang erleichtern könnte (Sandgren, 2021). Die Anwendungshinweise für z.B. Silic One sind jedoch strenger als Kupferbeschichtungen, z. Auftragsbedingungen und Trocknungszeiten, um eine ordnungsgemäße Haftung der Beschichtung zu gewährleisten (Noguer, 2021). Auch wenn das anfängliche Auftragen der Beschichtung mit mehr Arbeit verbunden sein kann, erfordern Silikonbeschichtungen weniger Arbeit als Farben auf Kupferbasis, wenn die gesamte Lebensdauer der Beschichtung betrachtet wird. Die garantierte Lebensdauer von Silic One beträgt beispielsweise 2 Jahre, wobei einige Kunden eine Lebensdauer der Beschichtung von bis zu 5 Jahren angeben (Sandgren, 2021; Watermann und Thomsen, 2018). Dies ist vergleichbar mit den kupferbasierten Farben auf dem Freizeitmarkt in der Ostsee, die typischerweise eine Lebensdauer von nur 1 Jahr haben. Am Ende der empfohlenen Nutzungsdauer lautet die Empfehlung für Silic One (und Hempasil, das Schiffsäquivalent), einfach die Oberfläche zu reinigen und eine neue Schicht Decklack aufzutragen (Noguer, 2021; Sandgren, 2021).

Für den professionellen Markt sind die Barrieren etwas anders. Laut Hempel wird ihr biozidfreies FRC (Hempasil X3+) derzeit von ihrem biozidhaltigen FRC (Hempaguard) übertroffen (Noguer, 2021). Dies hängt wahrscheinlich mit der zuvor erwähnten Skepsis gegenüber biozidfreien Lösungen zusammen, da Vertreter von Hempel angeben, dass Reeder Berichten zufolge „auf der sicheren Seite“ sein wollen und sich daher für die Silikonbeschichtung mit Bioziden entscheiden, wenn sie die Möglichkeit zwischen beiden haben (Noguer, 2021; Sandgren, 2021). Da die Menge an Biozid in Hempaguard jedoch nur einen Bruchteil dessen ausmacht, was in herkömmlichen bioziden Antifouling-Beschichtungen vorhanden ist, ist der Gewinn für die Meeresumwelt auch mit dieser Beschichtung immer noch beträchtlich (Ciriminna et al., 2015). Hempaguard hat auch eine bessere Leistung als Hempasil X3+, insbesondere in wärmeren Gewässern, aber für Schiffseigner, die alle 2–3 Jahre trockendocken wollen und daher nicht die 5-jährige Leistung von Hempaguard benötigen, ist das biozidfreie Hempasil X3+ geeignet und auch kostengünstigere Alternative (Noguer, 2021). Hempel-Vertreter geben weiter an, dass der Nachweis einer verbesserten Leistung, d. h. eines geringeren Kraftstoffverbrauchs, eher als Nachhaltigkeitsargumente dazu führt, Schiffseigner davon zu überzeugen, auf eine Silikonbeschichtung umzusteigen (Noguer, 2021; Sandgren, 2021). Für Schiffseigner scheint erhöhte Nachhaltigkeit daher ein Bonus und kein primärer Motivator für einen Wechsel des Beschichtungssystems zu sein. Als weiteres Hindernis für diese Endnutzer wurden hohe Anfangsinvestitionskosten genannt (Kim, 2021). Trotz höherer Anwendungskosten erzielen Silikon-FRCs jedoch eine bessere Kapitalrendite im Vergleich zu Kupferbeschichtungen, wenn die gesamte Lebensdauer der Beschichtung betrachtet wird (Lejars et al., 2012). Die Leistung wird im Laufe der Zeit nicht nur besser, was zu Kraftstoffeinsparungen führt, sondern auch die Lebensdauer ist länger, da Silikonbeschichtungen nicht auf Polier- oder Erschöpfungsmechanismen angewiesen sind. Dies führt zu verlängerten Docking-Intervallen. Für Schiffseigner wird eine Nutzungsdauer von 3–5 Jahren (je nach Schiffsaktivität und Handelsroute) für die biozidfreien FRC von Hempel empfohlen, aber einige berichten von Nutzungsdauern von bis zu 7 Jahren für die biozidhaltigen FRC (Noguer, 2021). Im Vergleich dazu beträgt die typische Lebensdauer einer herkömmlichen Kupferbeschichtung 2–3 Jahre (Lejars et al., 2012). Obwohl die

Anfälligkeit für Beschädigungen in der wissenschaftlichen Literatur typischerweise als Nachteil von FRCs erwähnt wird, wird sie schließlich nicht als Hindernis für Kunden beim Wechsel zu einer Silikonbeschichtung wahrgenommen (Noguer, 2021). Trotzdem wird an selbstheilenden Silikonbeschichtungen geforscht (Hu et al., 2020) und kommerzielle Alternativen auf Basis von haltbarerem Epoxy-Polysiloxan, wie beispielsweise Sealion Resilient von Jotun, sind bereits im Handel erhältlich.

4. Schlussfolgerung

Diese Studie hat die gute Leistung eines biozidfreien Silikon-FRC im Ostseeraum unter statischen Worst-Case-Bedingungen gezeigt, selbst an Orten mit starkem Verschmutzungsdruck. Die Wirksamkeit des getesteten FRC über ein ganzes Jahr erwies sich im Vergleich zu zwei Kupferbeschichtungen mit Booster-Bioziden als gleich oder sogar überlegen. Diese Ergebnisse zeigen, dass Silikon-FRCs sowohl für Reeder als auch für Freizeitbootbesitzer in dieser Region eine praktikable und kommerziell erhältliche biozidfreie Option darstellen.

Bis auf wenige Produkte sind die meisten Silikon-FRCs auf dem Markt biozidfrei. Als solche unterliegen sie weniger rechtlicher Kontrolle als biozide Beschichtungen. Diese Studie kann jedoch zu dem Schluss kommen, dass es eine große Variabilität in der Formulierung kommerzieller Silikon-FRCs gibt und dass sie möglicherweise nicht vollständig umweltfreundlich sind, einfach weil sie keine Biozide enthalten. Einige Beschichtungen haben sich für Meeresorganismen als toxisch erwiesen, insbesondere in den ersten Monaten des Eintauchens. Die Identität der für die beobachteten Wirkungen verantwortlichen Substanz(en) ist jedoch unbekannt. Hier wurden auch mehrere potenzielle Leachables aus kommerziellen Silikon-FRCs identifiziert, darunter hydrophobe und amphiphile Silikonflüssigkeiten, PFAS und Organozinnverbindungen. Obwohl einige Substanzen, z.B. Silikonflüssigkeiten, stellen aus toxikologischer Sicht keine Gefahr für die Umwelt dar, viele sind sehr persistent. Die Hersteller sollten daher Anstrengungen unternehmen, um ihre Freisetzung zu begrenzen oder zu vermeiden. Letztendlich sind transparentere Studien erforderlich, die die potenziellen toxischen Wirkungen kommerzieller Produkte sowie die Identität von auslaugbaren Stoffen und deren Verbleib in der Umwelt untersuchen. Dennoch haben biozidfreie Silikon-FRCs unbestreitbar eine wesentlich geringere Toxizität im Vergleich zu bioziden Kupferbeschichtungen. Ihre Verwendung sollte daher gegenüber herkömmlichen Antifoulingfarben gefördert werden.

Um den Übergang zu Silikon-FRCs in der Zukunft zu fördern, sind verschiedene Maßnahmen für den professionellen und den Freizeitmarkt erforderlich. Während der Nachweis von Kosteneinsparungen das Hauptargument zu sein scheint, um gewinnorientierte Reeder zu überzeugen, sind für den Freizeitmarkt andere Ansätze erforderlich. Bei traditionellen Endverbrauchern, die biozidfreien Lösungen eher skeptisch gegenüberstehen, kann eine stärkere Regulierung von bioziden Beschichtungen für Freizeitboote erforderlich sein. Dies könnte nicht nur Endverbraucher dazu ermutigen, das Beschichtungssystem zu wechseln, sondern auch mehr Beschichtungsunternehmen dazu anregen, silikonbasierte Beschichtungen für Freizeitschiffe auf den Markt zu bringen.

CRedit-Urheberschaftsbeitragserklärung

Maria Lagerström: Konzeptualisierung, Methodik, Formale Analyse, Recherche, Schreiben – Originalentwurf, Schreiben – Überprüfung & Bearbeitung, Visualisierung.

Anna-Lisa Wränge: Ressourcen, Recherche, Schreiben – Originalentwurf, Schreiben – Überprüfung & Bearbeitung.

Dinis Reis Oliveira: Konzeptualisierung, Methodik, Formale Analyse, Untersuchung.

Lena Granhag: Konzeptualisierung, Methodik, Recherche, Ressourcen, Schreiben – Review & Editing, Funding Acquisition.

Ann I. Larsson: Untersuchung, Schreiben – Überprüfung und Bearbeitung.

Erik Ytreberg: Konzeptualisierung, Methodik, Recherche, Ressourcen, Schreiben – Review & Editing, Funding Acquisition

Erklärung konkurrierender Interessen

Die Autoren erklären, dass ihnen keine konkurrierenden finanziellen Interessen oder persönlichen Beziehungen bekannt sind, die die in diesem Dokument beschriebene Arbeit beeinflusst haben könnten.

Danksagungen

Diese Studie wurde durch das Projekt HÅLL – Nachhaltige Schiffsrumpfwartung durch Entwicklung von Entscheidungshilfen für die maritime Industrie und Behörden (2019–2021) finanziert, das von der schwedischen Transportverwaltung (Trafikverket) über das Lighthouse Swedish Maritime Competence Centre unter dem Projekt „Hållbar sjöfart“-Programm (Kennzeichen TRV 2019/27023, Förderkennzeichen 5190054846). Erik Ytreberg und Lena Granhag wurden teilweise von BalticSea2020 finanziert. Lena Granhag wurde auch durch das Projekt COMPLETE PLUS (Praxisimplementierung der COMPLETE-Projektergebnisse und -werkzeuge, #X023), kofinanziert durch das Förderprogramm Interreg Baltic Sea Region der Europäischen Union 2017–2020 (Europäischer Fonds für regionale Entwicklung) und unterstützt Chalmers Area of Advance Transport. Die Autoren möchten Albert Camós Noguer und Joakim Sandgren von Hempel dafür danken, dass sie ihre Einblicke in Marktbarrieren für Silikon-Fouling-Release-Beschichtungen geteilt haben.

Quellen:

[Yebra et al., 2004](#)

D.M. Yebra, S. Kiil, K. Dam-Johansen

Antifouling technology—past, present and future steps towards efficient and environmentally friendly antifouling coatings

Prog. Org. Coat., 50 (2004), pp. 75-104, [10.1016/j.porgcoat.2003.06.001](#)

[j.porgcoat.2003.06.001](#)

[ArticleDownload PDFGoogle Scholar](#)

[Jin et al., 2022](#)

H. Jin, L. Tian, W. Bing, J. Zhao, L. Ren

Bioinspired marine antifouling coatings: status, prospects, and future

Prog. Mater. Sci., 124 (2022), Article 100889, [10.1016/j.pmatsci.2021.100889](#)

[j.pmatsci.2021.100889](#)

[ArticleDownload PDFView Record in ScopusGoogle Scholar](#)

[Cullinane & Cullinane, 2013](#)

K. Cullinane, S. Cullinane

Atmospheric emissions from shipping: the need for regulation and approaches to compliance

Transp. Rev., 33 (2013),

pp. 377-401, [10.1080/01441647.2013.806604](https://doi.org/10.1080/01441647.2013.806604)

[View PDF](#)[View Record in Scopus](#)[Google Scholar](#)

[Hewitt et al., 2009](#)

C.L. Hewitt, S. Gollasch, D. Minchin

The vessel as a vector – biofouling, ballast water and sediments

G. Rilov, J.A. Crooks (Eds.), Biol. Invasions Mar. Ecosyst. Ecol. Manag. Geogr. Perspect, Springer, Berlin, Heidelberg (2009),

pp. 117-131, [10.1007/978-3-540-79236-9_6](https://doi.org/10.1007/978-3-540-79236-9_6)

[View PDF](#)[View Record in Scopus](#)[Google Scholar](#)

[Fernandes et al., 2016](#)

J.A. Fernandes, L. Santos, T. Vance, T. Fileman, D. Smith, J.D.D. Bishop, F. Viard, A.M. Queirós, G. Merino, E. Buisman, M.C. Austen

Costs and benefits to European shipping of ballast-water and hull-fouling treatment: impacts of native and non-indigenous species

Mar. Policy, 64 (2016), pp. 148-155, [10.1016/j.marpol.2015.11.015](https://doi.org/10.1016/j.marpol.2015.11.015)

[ArticleDownload PDF](#)[View Record in Scopus](#)[Google Scholar](#)

[Finnie & Williams, 2010](#)

A.A. Finnie, D.N. Williams

Paint and coatings technology for the control of marine fouling

Biofouling, John Wiley & Sons, Ltd (2010),

pp. 185-206, [10.1002/9781444315462.ch13](https://doi.org/10.1002/9781444315462.ch13)

[View PDF](#)[View Record in Scopus](#)[Google Scholar](#)

[Paz-Villarraga et al., 2022](#)

C.A. Paz-Villarraga, Í.B. Castro, G. Fillmann

Biocides in antifouling paint formulations currently registered for use

Environ. Sci. Pollut. Res. (2022), [10.1007/s11356-021-17662-5](https://doi.org/10.1007/s11356-021-17662-5)

[View PDF](#)[Google Scholar](#)

[Dafforn et al., 2011](#)

K.A. Dafforn, J.A. Lewis, E.L. Johnston

Antifouling strategies: history and regulation, ecological impacts and mitigation

Mar. Pollut. Bull., 62 (2011), pp. 453-465, [10.1016/j.marpolbul.2011.01.012](#)

[ArticleDownload PDFView Record in ScopusGoogle Scholar](#)

[Amara et al., 2018](#)

I. Amara, W. Miled, R.B. Slama, N. Ladhari

Antifouling processes and toxicity effects of antifouling

paints on marine environment. A review

Environ. Toxicol. Pharmacol., 57 (2018), pp. 115-130, [10.1016/j.etap.2017.12.001](#)

[ArticleDownload PDFView Record in ScopusGoogle Scholar](#)

[Thomas & Brooks, 2010](#)

K.V. Thomas, S. Brooks

The environmental fate and effects of antifouling paint

biocides

Biofouling, 26 (2010), pp. 73-88, [10.1080/08927010903216564](#)

[View PDFGoogle Scholar](#)

[Turner, 2010](#)

A. Turner

Marine pollution from antifouling paint particles

Mar. Pollut. Bull., 60 (2010), pp. 159-171, [10.1016/j.marpolbul.2009.12.004](#)

[ArticleDownload PDFGoogle Scholar](#)

[Eklund & Eklund, 2014](#)

B. Eklund, D. Eklund

Pleasure boatyard soils are often highly contaminated

Environ. Manag., 53 (2014), pp. 930-946, [10.1007/s00267-014-0249-3](#)

[View PDF](#)

[View PDF](#)

[View PDF](#)

This article is free to access.

[View Record in ScopusGoogle Scholar](#)

[Costa et al., 2016](#)

L.D.F. Costa, N. Mirlean, J.C. Wasserman, M. Wallner-Kersanach

Variability of labile metals in estuarine sediments in areas under the influence of antifouling paints, southern Brazil

Environ. Earth Sci., 75 (2016), p. 580, [10.1007/s12665-016-5355-5](#)

[View PDF](#)[View Record in Scopus](#)[Google Scholar](#)

[Boyle et al., 2016](#)

J.F. Boyle, C.D. Sayer, D. Hoare, H. Bennion, K. Heppel, S.J. Lambert, P.G. Appleby, N.L. Rose, A.J. Davy

Toxic metal enrichment and boating intensity: sediment records of antifoulant copper in shallow lakes of eastern England

J. Paleolimnol., 55 (2016), pp. 195-208, [10.1007/s10933-015-9865-z](#)

[View PDF](#)

This article is free to access.

[View Record in Scopus](#)[Google Scholar](#)

[Daehne et al., 2017](#)

D. Daehne, C. Fürle, A. Thomsen, B. Watermann, M. Feibicke

Antifouling biocides in German marinas: exposure assessment and calculation of national consumption and emission

Integr. Environ. Assess. Manag., 13 (2017), pp. 892-905, [10.1002/ieam.1896](#)

[View PDF](#)

This article is free to access.

[View Record in Scopus](#)[Google Scholar](#)

[Fathom, 2013](#)

Fathom

A Snapshot of the Market: Hull Coating Manufacturer Profiles

(2013), pp. 30-57

Chapter 3

[Google Scholar](#)

[Lagerström, 2019](#)

M. Lagerström

Occurrence and environmental risk assessment of antifouling paint biocides from leisure boats

(2019)

[Google Scholar](#)

[Soon et al., 2021](#)

Z.Y. Soon, J.-H. Jung, C. Yoon, J.-H. Kang, M. Kim
Characterization of hazards and environmental risks of wastewater effluents from ship hull cleaning by hydroblasting

J. Hazard. Mater., 403 (2021), Article 123708, [10.1016/j.jhazmat.2020.123708](https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2020.123708)

[ArticleDownload PDFView Record in ScopusGoogle Scholar](#)

[Matzcak et al., 2018](#)

[Matzcak et al., 2018](#)

M. Matzcak, N. Meyer, E. Ooms, L. Schröder, M. Vološina, H.J.G. Warmelink, J. Zaucha, E. Czermańsk, C. Coornaert, A. Koch

QUO VADIS: exploring the future of shipping in the Baltic Sea

<https://pure.buas.nl/en/publications/quo-vadis-exploring-the-future-of-shipping-in-the-baltic-sea> (2018), Accessed 22nd Mar

2021

[Google Scholar](#)

[ICOMIA, 2018](#)

ICOMIA

Recreational Boating Industry Statistics 2017

International Council of Marine Industry Associations

(ICOMIA) (2018)

[Google Scholar](#)

[Ytreberg et al., 2021](#)

E. Ytreberg, K. Hansson, A. Lunde

Hermansson, R. Parsmo, M. Lagerström, J.-P. Jalkanen, I.-

M. Hassellöv

Metal and PAH loads from ships and boats, relative other sources, in the Baltic Sea

(2021), [10.13140/RG.2.2.34937.19046](https://doi.org/10.13140/RG.2.2.34937.19046)

[View PDFGoogle Scholar](#)

[Korpinen et al., 2012](#)

S. Korpinen, L. Meski, J.H. Andersen, M. Laamanen

Human pressures and their potential impact on the Baltic Sea ecosystem

Ecol. Indic., 15 (2012), pp. 105-114, [10.1016/j.ecolind.2011.09.023](https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2011.09.023)

[ArticleDownload PDFView Record in ScopusGoogle Scholar](#)

[Lejars et al., 2012](#)

M. Lejars, A. Margailan, C. Bressy

Fouling release coatings: a nontoxic alternative to biocidal antifouling coatings

Chem. Rev., 112 (2012), pp. 4347-4390, [10.1021/cr200350v](https://doi.org/10.1021/cr200350v)
[View PDF](#)[View Record in Scopus](#)[Google Scholar](#)

[Kim, 2021](#)

H.-J. Kim

Strategic actions for sustainable vessel hull coatings in line with the UN SDGs

J. Adv. Mar. Eng. Technol., 45 (2021), pp. 231-242, [10.5916/jamet.2021.45.4.231](https://doi.org/10.5916/jamet.2021.45.4.231)

[View PDF](#)[View Record in Scopus](#)[Google Scholar](#)

[Ciriminna et al., 2015](#)

R. Ciriminna, F.V. Bright, M. Pagliaro

Ecofriendly antifouling marine coatings

ACS Sustain. Chem. Eng., 3 (2015), pp. 559-565, [10.1021/sc500845n](https://doi.org/10.1021/sc500845n)

[View PDF](#)[View Record in Scopus](#)[Google Scholar](#)

[Brady & Singer, 2000](#)

R.F. Brady, I.L. Singer

Mechanical factors favoring release from fouling release coatings

Biofouling, 15 (2000), pp. 73-81, [10.1080/08927010009386299](https://doi.org/10.1080/08927010009386299)

[View PDF](#)[View Record in Scopus](#)[Google Scholar](#)

[Townsin & Anderson, 2009](#)

R.L. Townsin, C.D. Anderson

26 - fouling control coatings using low surface energy, foul release technology

C. Hellio, D. Yebra (Eds.), Adv. Mar. Antifouling Coat.

Technol, Woodhead Publishing (2009),

pp. 693-708, [10.1533/9781845696313.4.693](https://doi.org/10.1533/9781845696313.4.693)

[ArticleDownload PDF](#)[View Record in Scopus](#)[Google Scholar](#)

[Hu et al., 2020](#)

P. Hu, Q. Xie, C. Ma, G. Zhang

Silicone-based fouling-release coatings for marine antifouling

Langmuir, 36 (2020), pp. 2170-2183, [10.1021/acs.langmuir.9b03926](https://doi.org/10.1021/acs.langmuir.9b03926)

[View PDF](#)

[View PDF](#)

This article is free to access.

[View Record in Scopus](#)[Google Scholar](#)

[Barletta et al., 2018](#)

M. Barletta, C. Aversa, E. Pizzi, M. Puopolo, S. Vesco

Design, manufacturing and testing of anti-fouling/foul-release (AF/FR) amphiphilic coatings

Prog. Org. Coat., 123 (2018), pp. 267-281, [10.1016/](#)

[j.porgcoat.2018.07.016](#)

[ArticleDownload PDF](#)[View Record in Scopus](#)[Google Scholar](#)

[Camós Noguier, 2016](#)

A. Camós Noguier

Experimental Investigation of the Behaviour And Fate of Block Copolymers in Fouling-release Coatings

Technical University of Denmark (2016)

[Google Scholar](#)

[Gevaux, 2019](#)

L. Gevaux

Hydrolyzable polymer-based elastomers: a new strategy of antifouling coating, phdthesis

Université de Toulon (2019)

<https://tel.archives-ouvertes.fr/tel-02496991>, Accessed 26th Oct 2021

[Google Scholar](#)

[Holland et al., 2004](#)

R. Holland, T.M. Dugdale, R. Wetherbee, A.B. Brennan, J.A. Finlay, J.A. Callow, M.E. Callow

Adhesion and motility of fouling diatoms on a silicone elastomer

Biofouling, 20 (2004), pp. 323-329, [10.1080/08927010400029031](#)

[View PDF](#)[View Record in Scopus](#)[Google Scholar](#)

[Schultz, 2007](#)

M.P. Schultz

Effects of coating roughness and biofouling on ship resistance and powering

Biofouling, 23 (2007), pp. 331-341, [10.1080/08927010701461974](#)

[View PDF](#)[View Record in Scopus](#)[Google Scholar](#)

[Galli & Martinelli, 2017](#)

G. Galli, E. Martinelli

Amphiphilic polymer platforms: surface engineering of films for marine antibiofouling

Macromol. Rapid Commun., 38 (2017), p. 1600704, [10.1002/marc.201600704](#)

[View PDF](#)[View Record in Scopus](#)[Google Scholar](#)

[Camós Noguera et al., 2017](#)

A. Camós Noguera, S.M. Olsen, S. Hvilsted, S. Kiil

Field study of the long-term release of block copolymers from fouling-release coatings

Prog. Org. Coat., 112 (2017), pp. 101-108, [10.1016/j.porgcoat.2017.07.001](#)

[j.porgcoat.2017.07.001](#)

[ArticleDownload PDF](#)[View Record in Scopus](#)[Google Scholar](#)

[Noguera, 2021](#)

A. Camós Noguera

Personal communication, Albert Camós Noguera, Fuel Efficiency Solutions DK, R&D Manager at Hempel A/S (2021)

[Google Scholar](#)

[Thorlaksen et al., 2010](#)

P. Thorlaksen, D.M. Yebra, P. Català

Hydrogel-based third generation fouling release coatings

Gallois Mag., 5 (2010)

[Google Scholar](#)

[Nendza, 2007](#)

M. Nendza

Hazard assessment of silicone oils (polydimethylsiloxanes, PDMS) used in antifouling-/fouling-release-products in the marine environment

Mar. Pollut. Bull., 54 (2007), pp. 1190-1196, [10.1016/j.marpolbul.2007.04.009](#)

[j.marpolbul.2007.04.009](#)

[ArticleDownload PDF](#)[View Record in Scopus](#)[Google Scholar](#)

[Watermann et al., 1997](#)

B. Watermann, H.-D. Berger, H. Sönnichsen, P. Willemsen

Performance and effectiveness of non-stick coatings in seawater

Biofouling, 11 (1997), pp. 101-118, [10.1080/08927019709378323](#)

[View PDF](#)[View Record in Scopus](#)[Google Scholar](#)

Jotun, 2013

Jotun

Jotun introduces the world's first resilient antifouling - SeaLion Resilient

<http://www.jotun.com/bw/en/b2b/news/jotun-introduces-the-worlds-first-resilient-antifouling-sealion-resilient.aspx> (2013), Accessed 5th Nov 2021

Google Scholar

Oliveira & Granhag, 2020

D.R. Oliveira, L. Granhag

Ship hull in-water cleaning and its effects on fouling-control coatings

Biofouling, 36 (2020),

pp. 332-350, [10.1080/08927014.2020.1762079](https://doi.org/10.1080/08927014.2020.1762079)

[View PDF](#)

This article is free to access.

[View Record in Scopus](#) [Google Scholar](#)

Swedish Chemicals Agency, 2021

Swedish Chemicals Agency

Swedish Chemicals Agency's Pesticides Register

<https://apps.kemi.se/BkmRegistret/>

[Kemi.Spider.Web.External/](#) (2021)

Google Scholar

Kristineberg Marine Research Station, 2021

Kristineberg Marine Research Station

Väderobservation vid Kristineberg marina forskningsstation

<https://www.weather.mi.gu.se/kristineberg/data.shtml> (2021)

Google Scholar

SMHI, 2021

SMHI

SMHI Open data, Oceanographic observations

<https://www.smhi.se/data/oceanografi/ladda-ner-oceanografiska-observationer#param=seatemperature,stations=all> (2021)

Google Scholar

Tjärnö Marine Laboratory, 2021

Tjärnö Marine Laboratory

Tjärnö marina laboratorium - Labbvatten

<https://www.weather.mi.gu.se/tjarno/data.shtml> (2021)

[Google Scholar](#)

[US Navy, 2006](#)

US Navy

Chapter 081: waterborne underwater hull cleaning of Navy ships. S9086-CQ-STM-010/CH-081, Revision 5

Naval Ships' Technical Manual (2006)

[Google Scholar](#)

[ASTM D 6990, 2011](#)

ASTM D 6990

Standard practice for evaluating biofouling resistance and physical performance of marine coating systems

(2011)

[Google Scholar](#)

[Buskens et al., 2013](#)

P. Buskens, M. Wouters, C. Rentrop, Z. Vroon

A brief review of environmentally benign antifouling and foul-release coatings for marine applications

J. Coat. Technol. Res., 10 (2013), pp. 29-36, [10.1007/s11998-012-9456-0](#)

[View PDFView Record in ScopusGoogle Scholar](#)

[View PDFView Record in ScopusGoogle Scholar](#)

[Wrangle et al., 2020](#)

A.-L. Wrangle, F.R. Barboza, J. Ferreira, A.-K. Eriksson-

Wiklund, E. Ytreberg, P. Jonsson, B. Watermann, M. Dahlström

Monitoring biofouling as a management tool for reducing toxic antifouling practices in the Baltic Sea

(2020)

(submitted manuscript)

[Google Scholar](#)

[Ferry & Carritt, 1946](#)

J.D. Ferry, D.E. Carritt

Action of antifouling paints

Ind. Eng. Chem., 38 (1946), pp. 612-617, [10.1021/ie50438a021](#)

[View PDFView Record in ScopusGoogle Scholar](#)

[Rascio et al., 1988](#)

V.J.D. Rascio, C.A. Giúdice, A.B. del

Research and development of soluble matrix antifouling paints for ships, offshore platforms and power stations. A review

Corros. Rev., 8 (1988), pp. 87-154, [10.1515/CORRREV.1988.8.1-2.87](#)

[View PDF](#)[View Record in Scopus](#)[Google Scholar](#)

[European Parliament and Council, 2012](#)

[European Parliament and Council](#)

[Regulation \(EU\) No 528/2012 of the European Parliament and of the Council of 22 May 2012 concerning the making available on the market and use of biocidal products](#)

Regulation (EU) No 528/2012 of the European Parliament and of the Council of 22 May 2012 concerning the making available on the market and use of biocidal products

(2012)

[Google Scholar](#)

[ECHA, 2018](#)

[ECHA](#)

Guidance on the Biocidal Products Regulation, Volume II Efficacy - Assessment And Evaluation (Parts B+C),

Version 3.0

(2018)

[Google Scholar](#)

[Cassé & Swain, 2006](#)

[F. Cassé, G.W. Swain](#)

The development of microfouling on four commercial antifouling coatings under static and dynamic immersion

Int. Biodeterior. Biodegrad., 57 (2006), pp. 179-185, [10.1016/j.ibiod.2006.02.008](#)

[ArticleDownload PDF](#)[View Record in Scopus](#)[Google Scholar](#)

[The Swedish Transport Agency, 2015](#)

[The Swedish Transport Agency](#)

[Båtlivsundersökningen 2015 - en undersökning om svenska fritidsbåtar och hur de används \(in Swedish\)](#)

Båtlivsundersökningen 2015 - en undersökning om svenska fritidsbåtar och hur de används (in Swedish)

(2015)

[Google Scholar](#)

[Swedish Transport Agency, 2021](#)

[Swedish Transport Agency](#)

Båtlivsundersökningen 2020, En undersökning om båtlivet i Sverige. Dnr 2021-2170

(2021)

[Google Scholar](#)

[Canning-Clode, 2008](#)

J. Canning-Clode

Global diversity patterns in marine fouling communities - exploring latitudinal effects and the local-regional richness relationship

thesis

Christian-Albrechts-Universität (2008)

<https://oceanrep.geomar.de/7280/>, Accessed 12th Feb 2021

[Google Scholar](#)

[Truby et al., 2000](#)

K. Truby, C. Wood, J. Stein, J. Cella, J. Carpenter, C. Kavanagh, G. Swain, D. Wiebe, D. Lapota, A. Meyer, E. Holm, D. Wendt, C. Smith, J. Montemarano

Evaluation of the performance enhancement of silicone biofouling-release coatings by oil incorporation

Biofouling, 15 (2000), pp. 141-150, [10.1080/08927010009386305](https://doi.org/10.1080/08927010009386305)

[View PDFView Record in ScopusGoogle Scholar](#)

[Karlsson & Eklund, 2004](#)

J. Karlsson, B. Eklund

New biocide-free anti-fouling paints are toxic

Mar. Pollut. Bull., 49 (2004), pp. 456-464, [10.1016/j.marpolbul.2004.02.034](https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2004.02.034)

[ArticleDownload PDFView Record in ScopusGoogle Scholar](#)

[Watermann et al., 2005](#)

B.T. Watermann, B. Daehne, S. Sievers, R. Dannenberg, J.C. Overbeke, J.W. Klijnstra, O. Heemken

Bioassays and selected chemical analysis of biocide-free antifouling coatings

Chemosphere, 60 (2005), pp. 1530-1541, [10.1016/j.chemosphere.2005.02.066](https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2005.02.066)

[ArticleDownload PDFView Record in ScopusGoogle Scholar](#)

[Feng et al., 2012](#)

D. Feng, D. Rittschof, B. Orihuela, K.W.H. Kwok, S. Stafslie, B. Chisholm

The effects of model polysiloxane and fouling-release coatings on embryonic development of a sea urchin (Arbacia punctulata) and a fish (Oryzias latipes)

The effects of model polysiloxane and fouling-release coatings on embryonic development of a sea urchin (Arbacia punctulata) and a fish (Oryzias latipes)

Aquat. Toxicol., 110–111 (2012), pp. 162-169, [10.1016/](#)

[j.aquatox.2012.01.005](#)

[ArticleDownload PDFView Record in ScopusGoogle Scholar](#)

[Okamura et al., 2012](#)

H. Okamura, M. Yagi, M. Kawachi, T. Hanyuda, H. Kawai, I. Walker

Application of rotating cylinder method for ecotoxicological evaluation of antifouling paints

Toxicol. Environ. Chem., 94 (2012),

pp. 545-556, [10.1080/02772248.2012.662811](#)

[View PDFView Record in ScopusGoogle Scholar](#)

[Piazza et al., 2018](#)

V. Piazza, C. Gambardella, F. Garaventa, P. Massanisso, S. Chiavari
ni, M. Faimali

A new approach to testing potential leaching toxicity of fouling release coatings (FRCs)

Mar. Environ. Res., 141 (2018), pp. 305-312, [10.1016/](#)

[j.marenvres.2018.09.024](#)

[ArticleDownload PDFView Record in ScopusGoogle Scholar](#)

[Muller-Karanassos et al., 2021](#)

C. Muller-

Karanassos, W. Arundel, P.K. Lindeque, T. Vance, A. Turner, M. Col
e

Environmental concentrations of antifouling paint particles are toxic to sediment-dwelling invertebrates

Environ. Pollut., 268 (2021), Article 115754, [10.1016/](#)

[j.envpol.2020.115754](#)

[ArticleDownload PDFView Record in ScopusGoogle Scholar](#)

[Stevens et al., 2001](#)

C. Stevens, D.E. Powell, P. Mäkelä, C. Karman

Fate and effects of polydimethylsiloxane (PDMS) in marine environments

Mar. Pollut. Bull., 42 (2001), pp. 536-543, [10.1016/](#)

[S0025-326X\(00\)00229-0](#)

[ArticleDownload PDFView Record in ScopusGoogle Scholar](#)

[Wang et al., 2021](#)

W. Wang, H.-S. Cho, K. Kim, K. Park, J.-E. Oh

Tissue-specific distribution and bioaccumulation of cyclic and linear siloxanes in South Korean crucian carp (*Carassius carassius*)

Environ. Pollut., 288 (2021), Article 117789, [10.1016/j.envpol.2021.117789](https://doi.org/10.1016/j.envpol.2021.117789)

[ArticleDownload](#) [PDFView](#) [Record in Scopus](#)[Google Scholar](#)

[Gevaux et al., 2019](#)

[Gevaux et al., 2019](#)

L. Gevaux, M. Lejars, A. Margailan, J.-

F. Briand, R. Bunet, C. Bressy

Hydrolyzable additive-based silicone elastomers: a new approach for antifouling coatings

Polymers, 11 (2019), p. 305, [10.3390/polym11020305](https://doi.org/10.3390/polym11020305)

[View PDFView](#) [Record in Scopus](#)[Google Scholar](#)

[Hu et al., 2021](#)

P. Hu, Q. Xie, C. Ma, G. Zhang

Fouling resistant silicone coating with self-healing induced by metal coordination

Chem. Eng. J., 406 (2021), Article 126870, [10.1016/j.cej.2020.126870](https://doi.org/10.1016/j.cej.2020.126870)

[ArticleDownload](#) [PDFView](#) [Record in Scopus](#)[Google Scholar](#)

[Nurioglu et al., 2015](#)

[Nurioglu et al., 2015](#)

A.G. Nurioglu, A.C.C. Esteves, G. de With

Non-toxic, non-biocide-release antifouling coatings based on molecular structure design for marine applications

J. Mater. Chem. B, 3 (2015), pp. 6547-6570, [10.1039/C5TB00232J](https://doi.org/10.1039/C5TB00232J)

[View PDFView](#) [Record in Scopus](#)[Google Scholar](#)

[Glüge et al., 2020](#)

J. Glüge, M. Scheringer, I.T. Cousins, J.C. DeWitt, G. Goldenman, D

. Herzke, R. Lohmann, C.A. Ng, X. Trier, Z. Wang

An overview of the uses of per- and polyfluoroalkyl substances (PFAS)

Environ. Sci. Process. Impacts, 22 (2020), pp. 2345-2373, [10.1039/DoEM00291G](https://doi.org/10.1039/DoEM00291G)

[View PDFView](#) [Record in Scopus](#)[Google Scholar](#)

[Vesco et al., 2019](#)

[Vesco et al., 2019](#)

S. Vesco, C. Aversa, M. Puopolo, M. Barletta

Advances in design and manufacturing of environmentally friendly and biocide-free antifouling/foul-release coatings: replacement of fluorinate species

J. Coat. Technol. Res., 16 (2019), pp. 661-680, [10.1007/s11998-018-0144-6](https://doi.org/10.1007/s11998-018-0144-6)

[View PDF](#)[View Record in Scopus](#)[Google Scholar](#)

[Wang et al., 2020](#)

D.Z. Wang, G. Goldenman, T. Tugran, A. McNeil, M. Jones

Per- and polyfluoroalkylether substances: identity, production and use

Nordisk Ministerråd (2020)

[http://urn.kb.se/resolve?](http://urn.kb.se/resolve?urn=urn:nbn:se:norden:org:diva-5872)

[urn=urn:nbn:se:norden:org:diva-5872](http://urn.kb.se/resolve?urn=urn:nbn:se:norden:org:diva-5872), Accessed 4th Nov 2021

[Google Scholar](#)

[ECHA, 2021](#)

ECHA

Perfluoroalkyl chemicals (PFAS) - ECHA

<https://echa.europa.eu/hot-topics/perfluoroalkyl-chemicals-pfas> (2021), Accessed 15th Nov 2021

[Google Scholar](#)

[Inutsuka et al., 2013](#)

M. Inutsuka, N.L. Yamada, K. Ito, H. Yokoyama

High density polymer brush spontaneously formed by the segregation of amphiphilic diblock copolymers to the polymer/water interface

ACS Macro Lett., 2 (2013), pp. 265-268, [10.1021/mz300669q](https://doi.org/10.1021/mz300669q)

[View PDF](#)[View Record in Scopus](#)[Google Scholar](#)

[PPG, 2021](#)

PPG

PPG SIGMAGLIDE 1290 | Marine Coatings | PPG

Protective & Marine Coatings

<https://www.ppgpmc.com/marine/featured-products/ppg-sigmaglide-1290> (2021), Accessed 15th Nov 2021

[Google Scholar](#)

[IMO, 2005](#)

IMO

**MEPC 53/24/Add.1 Annex 24: Resolution MEPC.136 (53)
Adopted on 22 July 2005 -Designation of the Baltic Sea
Area as a Particularly Sensitive Sea Area**

(2005)

[Google Scholar](#)

[Thomas et al., 2004](#)

J. Thomas, S.-B. Choi, R. Fjeldheim, P. Boudjouk

**Silicones containing pendant biocides for antifouling
coatings**

Biofouling, 20 (2004), pp. 227-236, [10.1080/08927010400011229](#)

[View PDFView Record in ScopusGoogle Scholar](#)

[Hempel, 2021](#)

Hempel

Hempaguard - Hempel

<https://www.hempel.com/products/brand/hempaguard/>

[explore \(2021\)](#)

[Google Scholar](#)

[Radenovic et al., 2014](#)

J. Radenovic, K.F. Sørensen, D.M. Yebra, A. Blom, D. Hillerup, S.M.
Olsen

**New technology for fouling defense: fusion of biocide and
hydrogel-based technologies**

thesis

OnePetro (2014)

[Google Scholar](#)

[Lloyd's Register, 2019](#)

Lloyd's Register

Recognised TBT-free anti-coatings

Compliance With the IMO International Convention on the Control
of Harmful Anti-fouling Systems on Ships (2019)

[Google Scholar](#)

[CMP, 2014](#)

CMP

Brochure, CMP Bioclean Plus

Chugoku Marine Paints, Ltd. (2014)

[https://www.cmp-chugoku.com/library/global/pdf/brochure/
cmp_bio_plus.pdf#zoom=80](https://www.cmp-chugoku.com/library/global/pdf/brochure/cmp_bio_plus.pdf#zoom=80)

[Google Scholar](#)

[Silva et al., 2019](#)

E.R. Silva, O. Ferreira, P.A. Ramalho, N.F. Azevedo, R. Bayón, A. Igartua, J.C. Bordado, M.J. Calhorda

Eco-friendly non-biocide-release coatings for marine biofouling prevention

Sci. Total Environ., 650 (2019), pp. 2499-2511, [10.1016/j.scitotenv.2018.10.010](#)

[ArticleDownload PDFView Record in ScopusGoogle Scholar](#)

[Ferreira et al., 2020](#)

O. Ferreira, P. Rijo, J.F. Gomes, R. Santos, S. Monteiro, C. Vilas-Boas, M. Correia-da-

Silva, S. Almada, L.G. Alves, J.C. Bordado, E.R. Silva

Biofouling inhibition with grafted Ectocarpus biocide: toward a nonreleasing eco-friendly multiresistant antifouling coating

ACS Sustain. Chem. Eng., 8 (2020), pp. 12-17, [10.1021/acssuschemeng.9b04550](#)

[View PDFView Record in ScopusGoogle Scholar](#)

[Silva et al., 2021](#)

E.R. Silva, A.V. Tulcidas, O. Ferreira, R. Bayón, A. Igartua, G. Mendoza, F.J.M. Mergulhão, S.I. Faria, L.C. Gomes, S. Carvalho, J.C.M. Bordado

Assessment of the environmental compatibility and antifouling performance of an innovative biocidal and foul-release multifunctional marine coating

Environ. Res., 198 (2021), Article 111219, [10.1016/j.envres.2021.111219](#)

[ArticleDownload PDFView Record in ScopusGoogle Scholar](#)

[Sandgren, 2021](#)

J. Sandgren

Personal communication, Joakim Sandgren, Yacht Sales Manager - Northern Europe at Hempel A/S

(2021)

[Google Scholar](#)

[Lepoša, 2017](#)

N. Lepoša

The emergence of ambivalent leisure consumers – the case of boating along the Swedish West Coast

J. Clean. Prod., 145 (2017), pp. 35-44, [10.1016/j.jclepro.2017.01.002](https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.01.002)
[ArticleDownload](#) [PDFView](#) [Record in Scopus](#)[Google Scholar](#)
[Watermann & Thomsen, 2018](#)

B. Watermann, A. Thomsen

**Field Tests With Foul Release Coatings on Sail- And Motor
Boats Along the German Baltic Sea Coast 2015 - 2017**

Limnomar, Hamburg (2018)

[Google Scholar](#)