



BUNDESAMT FÜR  
SEESCHIFFFAHRT  
UND  
HYDROGRAPHIE



# Stoffliche Emissionen aus Offshore-Windenergieanlagen

Zusammenfassung des Projekts „OffChEm“





# INHALTSVERZEICHNIS

---



Zusammenfassung	04
Einleitung	06
Infografik	08
Projekt	11
Ergebnisse	12
Schlussfolgerung	22
Anhänge	24





Indium, Gallium, Blei und Cadmium. Die Elemente Indium und Gallium können dabei als Tracer für Opferanoden verwendet werden, da sie natürlicherweise kaum im Meer vorkommen und bisher keine weiteren Quellen auf offener See bekannt sind.

Insgesamt wurden vier Schiffskampagnen im Bereich von Offshore-Windparks in der Ausschließlichen Wirtschaftszone der Deutschen Bucht durchgeführt. Die gewonnenen Daten zeigen, dass sich die Konzentrationen der ausgewählten Elemente sowohl im Wasser als auch im Sediment im Rahmen der für das Untersuchungsgebiet bekannten Variabilität bewegen. Bei bestimmten Wetterlagen konnten jedoch lokale Konzentrationserhöhungen für die Elemente Indium, Gallium, Zink und Aluminium im Wasser beobachtet werden. Lokale Konzentrationserhöhungen waren auch im Sediment insbesondere für Blei erkennbar.

## ZUSAMMENFASSUNG

Im Rahmen des Projektes „Stoffliche Emissionen aus Offshore-Windenergieanlagen“ (OffChEm) wurden Methoden entwickelt, um mögliche stoffliche Emissionen aus dem Korrosionsschutz von Windenergieanlagen zu erfassen. So konnte erstmals ein umfangreicher Datensatz zur derzeitigen Belastungssituation in der Nordsee erstellt werden.

Die Forschungsarbeiten wurden von 2017 bis 2021 in Kooperation mit dem Bundesamt für Seeschifffahrt und Hydrographie vom Helmholtz-Zentrum

Hereon (ehemals Helmholtz-Zentrum Geesthacht) durchgeführt.

Mit Hilfe der entwickelten Methoden können Spurenmetalle im Meerwasser und im Sediment quantifiziert werden. In Laborstudien wurden die Bestandteile von galvanischen Anoden, sogenannten Opferanoden, analysiert, die häufig als Korrosionsschutz bei Offshore-Windenergieanlagen verwendet werden. Die folgenden Elemente wurden für die nähere Untersuchung im Rahmen von Feldstudien identifiziert: Aluminium, Zink,



Basierend auf diesen Daten und den vorherrschenden Verdünnungs- und Verteilungsprozessen, sind derzeit noch keine unmittelbaren Auswirkungen durch den Einsatz von Opferanoden erkennbar. Durch den Ausbau der Offshore-Windenergie werden allerdings auch die stofflichen Emissionen aus dem Korrosionsschutz weiter zunehmen. Daher unterstützt das Bundesamt für Seeschifffahrt und Hydrographie die Entwicklung und Nutzung möglichst umweltschonender Verfahren. In zukünftigen Verfahren sollen nach Möglichkeit Fremdstromsysteme eingesetzt werden, da diese nur mit sehr geringen stofflichen Emissionen in die Meeresumwelt verbunden sind.



# EINLEITUNG

---

Der Ausbau der Offshore-Windenergie in Nord- und Ostsee ist ein wichtiger Bestandteil der Energiewende. Heutzutage sind in deutschen Meeresgewässern bereits mehr als 1500 Windenergieanlagen und 30 Umspann- und Konverterplattformen vorhanden. Die aktuellen Ziele der Bundesregierung verdeutlichen einen erheblichen weiteren Ausbaubedarf, insbesondere in der Ausschließlichen Wirtschaftszone der Nordsee. Jede Offshore-Anlage stellt jedoch einen Eingriff in die Meeresumwelt dar.

Die Frage ist, ob Offshore-Anlagen eine relevante Quelle für stoffliche Emissionen in die Meeresumwelt darstellen und somit zur weiteren Belastung beitragen.

## Auswirkungen der Offshore-Windenergie

In der Vergangenheit wurden bereits umfassende Untersuchungen zu verschiedenen Auswirkungen von Windenergieanlagen durchgeführt. Diese beschäftigten sich zum Beispiel mit der Entstehung von Unterwasserlärm, der Veränderung von Lebensräumen und dem Einfluss auf Strömungsmuster. Im Gegensatz dazu gibt es nur sehr wenige Informationen über die stofflichen Emissionen von Windenergieanlagen, wie zum Beispiel organische Stoffe und Metalle, sowie deren möglichen Auswirkungen. Aufgrund der starken

korrosiven Bedingungen in der Meeresumwelt, müssen die Offshore-Anlagen vor Korrosion geschützt werden. Dies ist für die bauliche Integrität und die Standsicherheit der Anlagen unabdingbar. Für den Korrosionsschutz werden jedoch Techniken eingesetzt, die mit langfristigen stofflichen Emissionen in die Meeresumwelt verbunden sein können. Häufig werden im Unterwasserbereich der Anlagen galvanische Anoden, sogenannte Opferanoden, verwendet. Diese werden auch im Wasserbau und in der Schifffahrt eingesetzt.





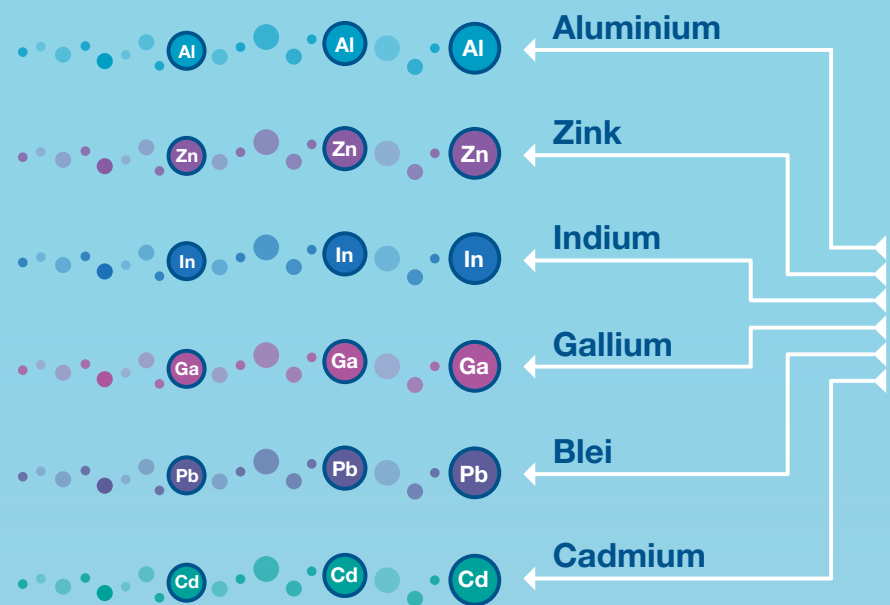
# INFOGRAFIK

## Funktionsweise von Opferanoden

Eine Opferanode (galvanische Anode) ist ein Stück Metall, das die hochwertigeren Bauteile unter Wasser vor Korrosion schützt, indem es sich selbst auflöst ("opfert"). Dies führt allerdings dazu, dass Bestandteile der Opferanode in die Meeresumwelt gelangen. Je nach Gründungsstruktur und deren Beschichtung sowie den Umweltbedingungen werden unterschiedliche Mengen freigesetzt.

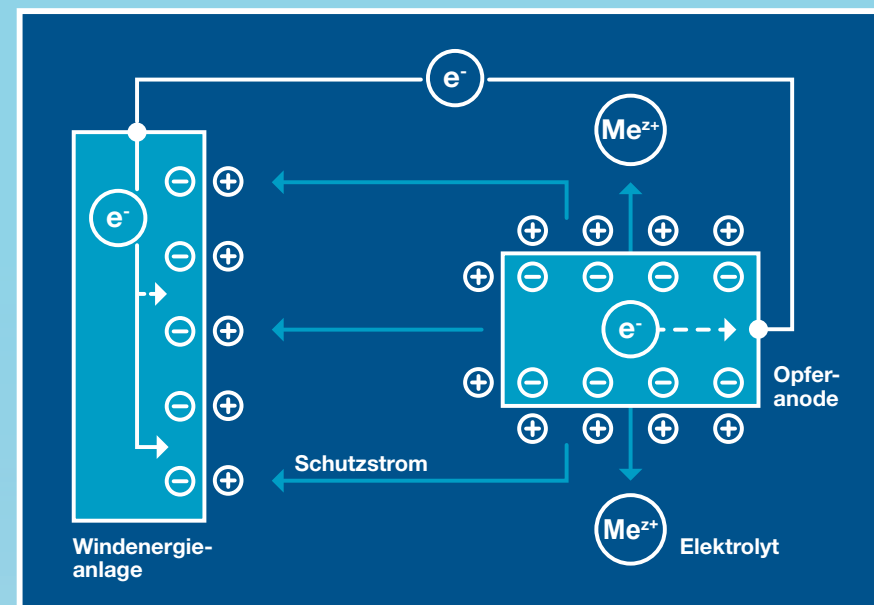
Nach aktuellen Erfahrungen gelangen etwa 150 bis 750 Kilogramm des Anodenmaterials pro Anlage und Jahr in die Meeresumwelt.

Windenergieanlage



Opferanode

Schematischer Aufbau





## Korrosionsschutz: Eintrag von Metallen

Der generierte Schutzstrom schützt zum einen die Stahl-Konstruktionen vor Korrosion, führt jedoch durch das gleichzeitige und allmähliche Auflösen der eingesetzten unedleren Metalle, wie zum Beispiel Aluminium oder Zink, zu einem anhaltenden Eintrag des Anodenmaterials in die Meeresumwelt. Die für eine Nutzungsdauer von 25 Jahren benötigte Anodenmasse variiert je nach Gründungsstruktur, Bauwerktyp und den örtlichen Umweltbedingungen.

Galvanische Anoden im Bereich der Offshore-Windenergie bestehen typischerweise aus Aluminium-Zink-Indium Legierungen (ca. 95% Aluminium; 2,5 bis 5,75% Zink; 0,015 bis 0,04% Indium). Grundsätzlich können die galvanischen Anoden produktionsbedingt in geringen Mengen auch besonders umweltschwermetalle, wie zum Beispiel Cadmium, Blei und Kupfer enthalten, die im Laufe der Betriebszeit ebenfalls in die Meeresumwelt gelangen.

Nach aktuellem Kenntnisstand existieren bisher keine Feldstudien, die eine metallbezogene Bestandsaufnahme in Offshore-Windparks erlauben. Eine Einschätzung, ob Offshore-Anlagen einen signifikanten Beitrag zur bereits vorliegenden Metallbelastung der Nordsee leisten können, sowie eine Bewertung der möglichen zukünftigen Auswirkungen auf die Meeresumwelt ist somit derzeit nur sehr eingeschränkt möglich.

# PROJEKT

## Stoffliche Emissionen aus Offshore-Wind- energieanlagen

Im Rahmen des Projektes „Stoffliche Emissionen aus Offshore-Windenergieanlagen“ (OffChEm) wurden daher Methoden entwickelt, um mögliche stoffliche Emissionen aus dem Korrosionsschutz von Windenergieanlagen zu erfassen. So konnte erstmals ein umfangreicher Datensatz zur derzeitigen Belastungssituation im Umfeld der in der Nordsee betriebenen Anlagen erstellt werden. Die Forschungsarbeiten wurden von 2017 bis 2021 in Kooperation mit dem Bundesamt für Seeschifffahrt und Hydrographie vom Helmholtz-Zentrum Hereon (ehemals Helmholtz-Zentrum Geesthacht) durchgeführt.





# ERGEBNISSE

## Methode, Laborstudie und Feldstudie

Im Wasser und dem Sediment der Nordsee wurden kleinräumige Konzentrationserhöhungen mit verschiedenen Spurenmetallen festgestellt.



- Es wurden leistungsfähige Methoden entwickelt und validiert, um Spurenmetalle in Wasser, Sediment und Biota zu analysieren.
- Im Labor wurden unterschiedliche Anoden chemisch charakterisiert. So konnten die aus ökotoxikologischer Sicht besonders kritischen Bestandteile sowie mögliche Tracer für Emissionen aus dem Korrosionsschutz von Offshore-Anlagen identifiziert werden.
- Es wurden Feldstudien in der Nordsee durchgeführt, um erstmals eine umfangreiche Datenbasis zum Vorkommen und zur Verteilung von Spurenmetallen im Bereich von Offshore-Windenergieanlagen zu schaffen (im Wasser und im Sediment).
- Die gemessenen Konzentrationen von ausgewählten Elementen im Wasser und im Sediment liegen größtenteils im Rahmen der normalen Variabilität der Deutschen Bucht (siehe Tabelle 1 und 2 im Anhang).
- Es wurden vereinzelte und kleinräumige Konzentrationserhöhungen für Aluminium, Zink, Indium, Gallium (im Wasser) und für Blei (im Sediment) festgestellt.



Die Elemente Indium und Gallium sind typische Tracer für Opferanoden.

## LABORSTUDIE

### Analyse von Spurenmetallen

Es war eine Herausforderung, eine Methode zur verlässlichen Analyse von Spurenmetallen in den Meerwasser- und Sedimentproben aus der Nordsee zu entwickeln. Einerseits mussten die Elemente, die typisch für den Korrosionsschutz sind, von den natürlicherweise in der Meeresumwelt vorkommenden Elementen abgegrenzt werden.

Andererseits sind die Probeneigenschaften generell sehr komplex und die

untersuchten Elemente sind weitestgehend in nur sehr niedrigen Konzentrationen in der Meeresumwelt vorhanden.

Die entwickelten Methoden auf Basis der induktiv gekoppelten Plasma Tandem Massenspektrometrie (ICP-MS/MS) erlauben es nun bis zu 39 Elemente in Wasserproben und 73 Elemente in Sedimentproben sicher und mit den benötigten niedrigen Nachweisgrenzen zu quantifizieren.



### Bestandteile von Opferanoden

Die chemische Charakterisierung verschiedener Opferanoden auf Aluminium-Basis und Zink-Basis zeigte, dass diese neben ihren Hauptbestandteilen bis zu 15 Elemente (Zink-Anoden) bzw. 26 weitere Elemente (Aluminium-Anoden) enthalten können (Reese et al. 2020). Die Elementgehalte entsprachen im Wesentlichen den Herstellerangaben.

Im Bereich der Offshore-Windenergie werden vor allem Anoden auf Aluminium-Basis verwendet, die hauptsächlich aus Aluminium, Zink und Indium bestehen. Umweltkritische Schwermetalle, wie Blei und Cadmium, wurden nur in sehr geringen Mengen gefunden. Anoden auf Zink-Basis enthielten dagegen höhere Gehalte an Blei und Cadmium.

Für die Feldstudien in Offshore-Windparks wurden Elemente identifiziert, die mindestens eine der folgenden Kriterien erfüllten: (1) hoher Mengenanteil in den Anoden, (2) hohe Toxizität, (3) Vorhandensein von Vergleichsdaten oder Bewertungskriterien, (4) Möglichkeit der Quellenzuordnung (sogenannte Tracer).

Basierend auf diesen Kriterien wurden die Elemente Aluminium, Zink, Indium, Gallium, Blei und Cadmium ausgewählt. Die Elemente Indium und Gallium können dabei als typische Tracer für Opferanoden verwendet werden, da sie natürlicherweise kaum im Meer vorkommen und bisher keine weiteren menschlichen Quellen auf See bekannt sind.



# FELDSTUDIE

## Untersuchungen in der Nordsee

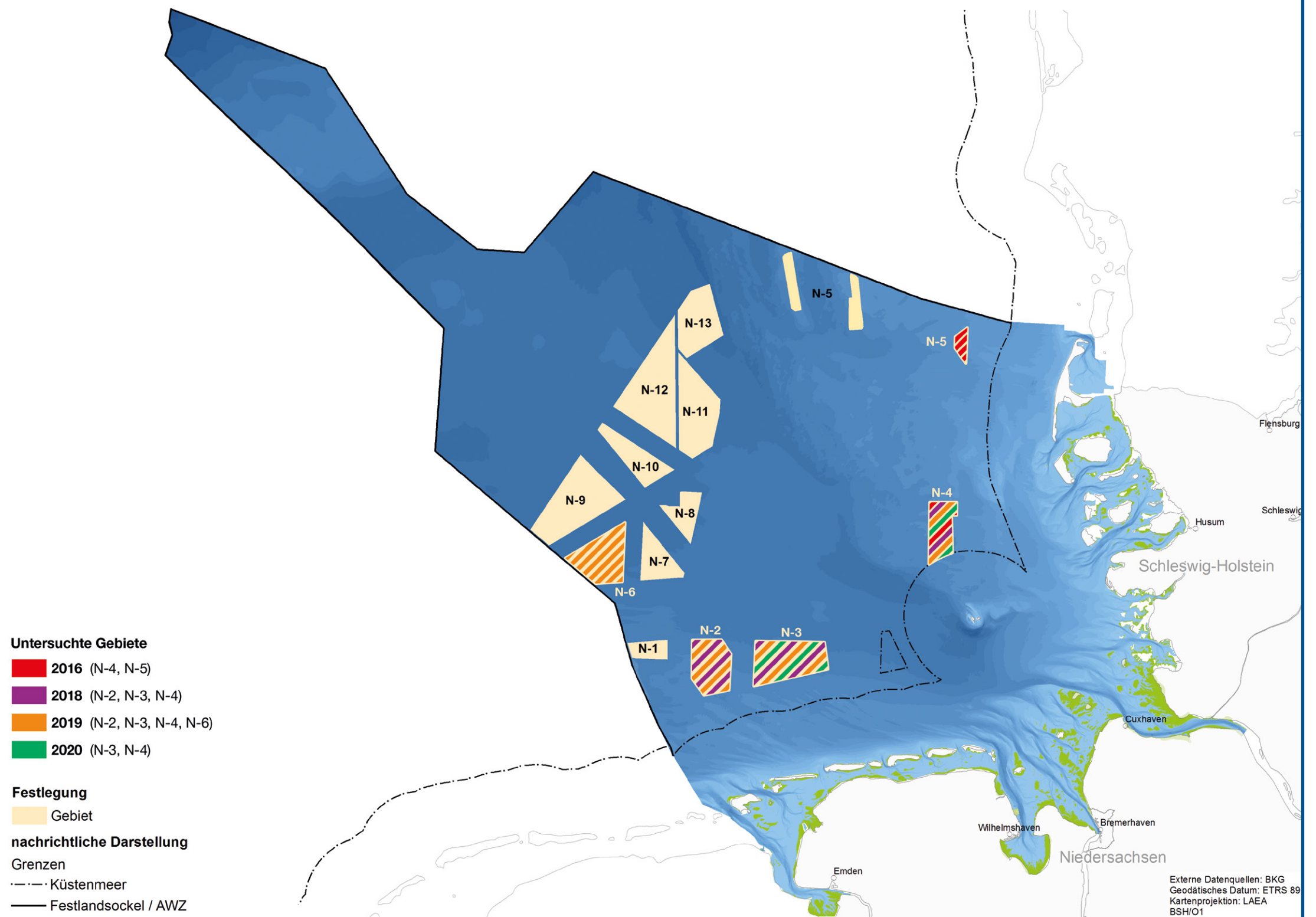
In den Jahren 2016, 2018, 2019 und 2020 wurden insgesamt vier Schiffskampagnen im Bereich von Offshore-Windparks in der Ausschließlichen Wirtschaftszone der Deutschen Bucht mit den Forschungsschiffen LUDWIG PRANDTL (Hereon) und ATAIR (BSH) durchgeführt.

Die Untersuchungsgebiete waren die Windparks im Gebiet N-4 nördlich von Helgoland sowie in den Gebieten N-3 und N-2 nördlich der ostfriesischen Inseln. Zusätzlich wurden punktuelle Untersuchungen in den Gebieten N-5/N-6 sowie an weiteren Stationen im Bereich des Küstenmeeres durchgeführt. Die Untersuchungsgebiete sind in Abbildung 1 dargestellt.

Während der Schiffskampagnen wurden Wasserproben mit Kranzwasserschöpfern sowie Sedimentproben von der Oberfläche des Meeresbodens mit Kastengreifern genommen. Die Wasserproben wurden, soweit möglich, auf den Schiffen aufbereitet und filtriert.

Die Sedimentproben wurden eingefroren und im Labor des Helmholtz-Zentrums Hereon gesiebt (< 20 µm Fraktion). Im Anschluss daran wurden die Metallgehalte der Proben mit der Hilfe der entwickelten Methode im Labor des Helmholtz-Zentrums Hereon analysiert.

Abbildung 1: Übersicht der untersuchten Windparkgebiete in der Nordsee.





# Spurenmehalle im Wasser

Die Ergebnisse der Messungen von Aluminium, Zink, Indium, Gallium, Blei und Cadmium in den Wasserproben sind in Tabelle 1 dargestellt (siehe Anhang).

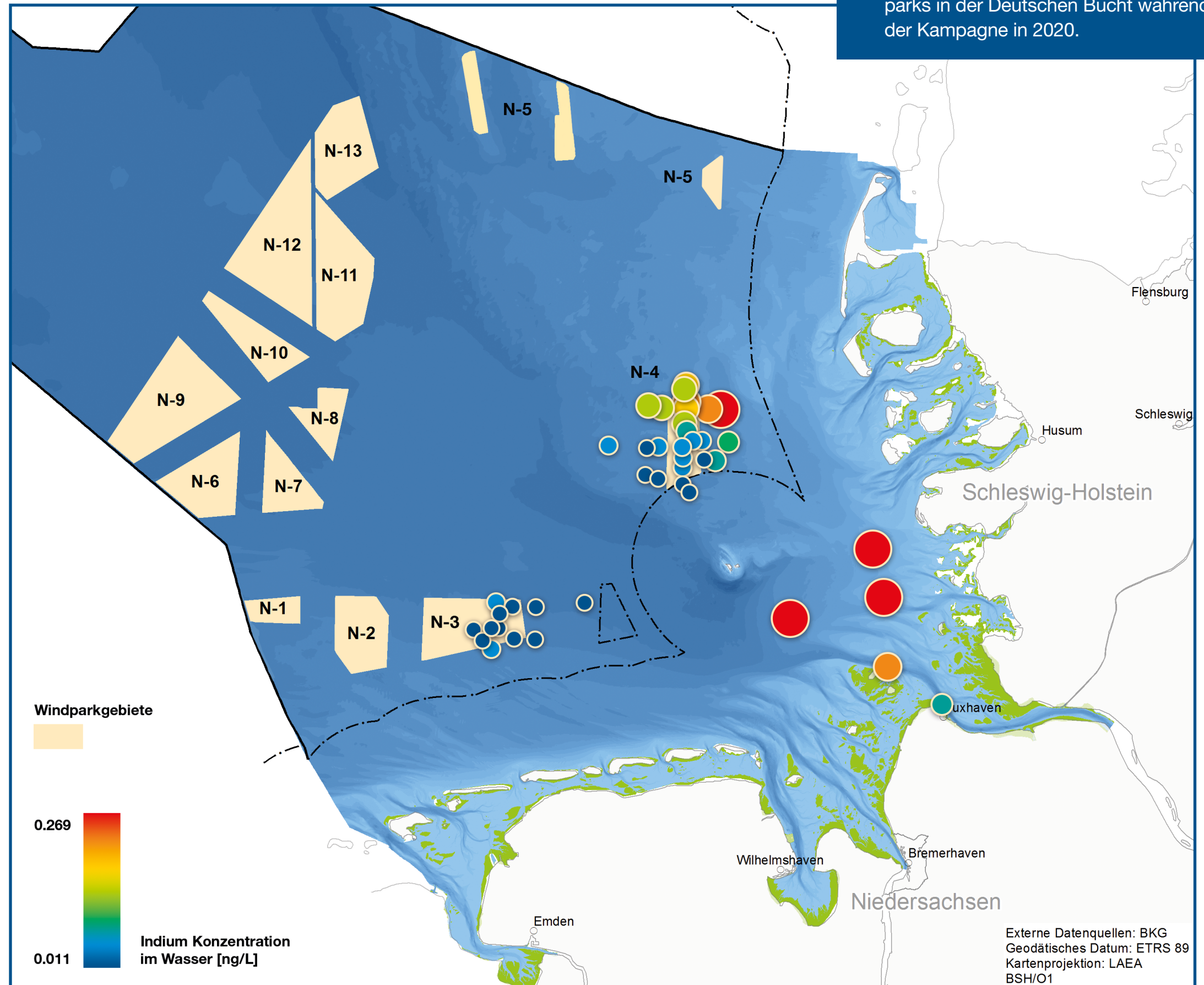
Zum Vergleich dienen die Konzentrationen der Elemente aus der langjährigen Meeresumweltüberwachung des Bundesamts für Seeschiffahrt und Hydrographie. Da Aluminium nicht im Rahmen der Meeresumweltüberwachung gemessen wird, wurden hierfür Vergleichsdaten aus Literaturstudien herangezogen.

In dem Gebiet N-4 zeigte sich insbesondere in 2018 und 2020 ein Süd-Nord Gradient in Bezug auf erhöhte Konzentrationen von Aluminium, Zink, Indium und Gallium im Wasser (siehe Abbildung 2). Dies könnte auf eine mögliche Anreicherung entlang der vorherrschenden Süd-Nord-Strömung entlang der Küste hinweisen.

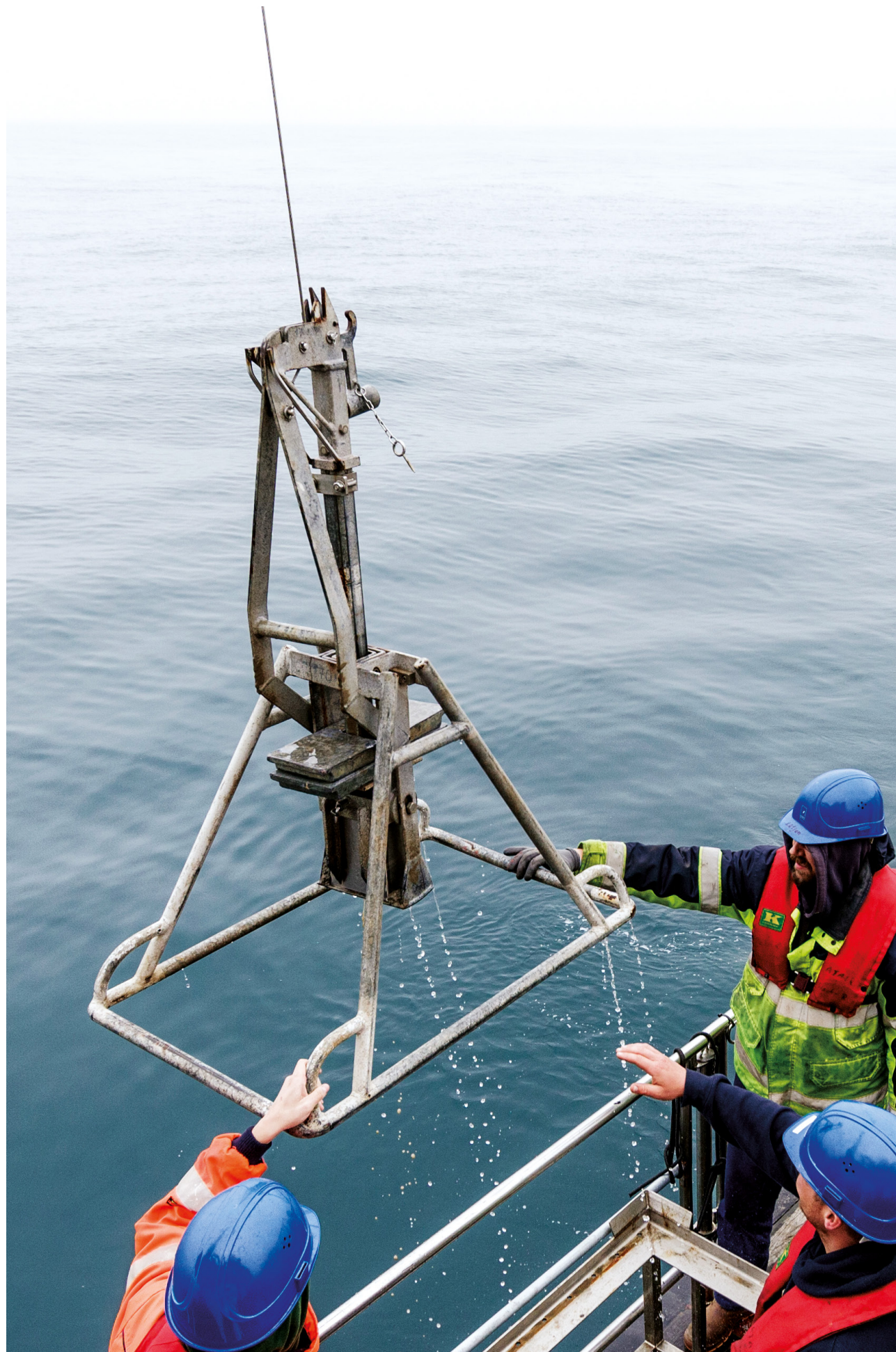
Zudem zeigte sich für Zink eine starke saisonale Abhängigkeit. Im Gegensatz dazu wurden für die toxiologisch besonders relevanten Elemente Cadmium und Blei keine Konzentrationserhöhungen nachgewiesen.

Zudem wurde festgestellt, dass es im Umfeld von Windparks bei bestimmten Wetterlagen zu statischen Bedingungen kommen kann, welche den Austausch und die Durchmischung des Wassers minimieren. Dies führt wiederum dazu, dass sich die Konzentrationen von korrosionsschutztypischen Elementen lokal erhöhen können.

Abbildung 2: Konzentration von Indium im Oberflächenwasser in/um Offshore-Windparks in der Deutschen Bucht während der Kampagne in 2020.







Im Sediment wurden vereinzelt erhöhte Metallkonzentrationen gemessen.

## Spurenmehalle im Sediment

Es ist anzumerken, dass die im Sediment beobachteten Konzentrationserhöhungen für Indium, Cadmium, und Blei auch dem Gebiet N-4 zugeordnet werden können. In Verbindung mit den für die Wasserproben beobachteten Konzentrationserhöhungen könnte dies auf eine besondere Quellsituation in

diesem Gebiet hinweisen. Dabei ist aber anzumerken, dass die beobachteten Konzentrationserhöhungen lediglich für Blei vereinzelt über der bekannten Variabilität der Deutschen Bucht liegen. Ursachen hierfür sind bislang nicht eindeutig identifizierbar.



# SCHLUSSFOLGERUNG

## Bestandteile von Opferanoden in Nordsee nachweisbar

Die gewonnenen Daten zeigen, dass sich die Konzentrationen der ausgewählten Elemente sowohl im Wasser als auch im Sediment im Wesentlichen im Rahmen der für das Untersuchungsgebiet bekannten Variabilität bewegen. Für die Tracer Indium und Gallium konnten erstmals Daten für die Deutsche Bucht gewonnen werden.

Aufgrund der bei bestimmten Wetterlagen beobachteten statischen Bedingungen bzw. Süd-Nord Strömungen konnten vereinzelte lokale Konzentrationserhöhungen für die Elemente Aluminium, Zink, Indium und Gallium beobachtet werden. Lokale Konzentrationserhöhungen waren auch im Sediment vor allem für Blei erkennbar. Insbesondere die hohe Dynamik und der damit verbundene großräumige Wasseraustausch trägt dazu bei, dass sich die gemessenen Konzentrationen größtenteils im Rahmen der für die Deutsche Bucht bekannten Variabilität bewegen.

Basierend auf diesen Daten und den vorherrschenden Verdünnungs- und Verteilungsprozessen, sind derzeit keine unmittelbaren Auswirkungen durch den Einsatz von Opferanoden erkennbar. Durch den Weiterbetrieb und Ausbau



Eine umweltfreundlichere Alternative zu Opferanoden sind Fremdstromsysteme.

der Offshore-Windenergie werden allerdings auch die stofflichen Emissionen aus dem Korrosionsschutz weiter zunehmen.

Die Projektergebnisse werden dem BMDV-Expertenetzwerk zur Verfügung gestellt, wo sie zu dem Themenfeld „Umwelt und Verkehr“ und dem Schwerpunktthema „Bau- und bauwerksbedingte Emissionen“ beitragen.

Weitere Untersuchungen können dazu beitragen, mögliche mittel- bis langfristigen Auswirkungen von derartigen stofflichen Emissionen in die Meeresumwelt besser abschätzen zu können. Durch ein langfristiges Monitoring, insbesondere der toxikologisch relevanten Elemente, können mögliche, zukünftige Anreicherungen aus dem Korrosionsschutz von Offshore-Anlagen überwacht und bewertet werden. Im Rahmen des Projekts OffChEm II wird die Forschung zu stofflichen Emissionen aus Offshore-Anlagen fortgeführt. Hierbei liegt der Schwerpunkt nun auf der Ostsee.

Zudem unterstützt das Bundesamt für Seeschifffahrt und Hydrographie die Entwicklung und Nutzung möglichst umweltschonender Verfahren. In zukünftigen Verfahren sollen nach Möglichkeit vermehrt Fremdstromsysteme eingesetzt werden, da diese nur mit sehr geringen stofflichen Emissionen in die Meeresumwelt verbunden sind.



## Anhang - Daten

**Tabelle 1:** Gemessene Metallkonzentrationen des Oberflächenwassers in Windparkproben der Kampagnen 2016 bis 2020 im Vergleich mit Daten der Meeresumweltüberwachung des BSH aus der Nordsee (2010 bis 2014, Zn = Zink, Cd = Cadmium, Pb = Blei, In = Indium, Ga = Gallium) bzw. im Vergleich mit Daten aus der Literatur (Kremling et al. 1999, Al = Aluminium).

	Konzentrationsbereich [ng/L]	Konzentrationsbereich [ng/L]	Konzentrationsbereich [ng/L]	Konzentrationsbereich [ng/L]	Bekannte Variabilität Nordsee [ng/L]
<b>Jahr</b>	2016	2018	2019	2020	
<b>Zn</b>	306–795	440–2180	490–1860	247–841	63–3800
<b>Cd</b>	10–18	10–23	20–41	17–37	12–52
<b>Pb</b>	2–17	6–17	5–21	2–13	10–520
<b>Al</b>	78–292	170–530	210–670	< 450	8–1200
<b>In</b>	0,05–0,15	< 0,05	0,01–0,07	0,03–0,27	unbekannt
<b>Ga</b>	2–4	< 10	2–5	1–4	unbekannt

**Tabelle 2:** Gemessene Massenanteile der Metalle in Sedimenten (<20µm Fraktion) der Windparkproben der Kampagne 2016 bis 2020 im Vergleich mit Daten der Meeresumweltüberwachung des BSH (2010 bis 2016) aus der Nordsee.

	Bereich der Massenanteile [mg/kg]	Bereich der Massenanteile [mg/kg]	Bereich der Massenanteile [mg/kg]	Bereich der Massenanteile [mg/kg]	Bekannte Variabilität Nordsee [mg/kg]
<b>Jahr</b>	2016	2018	2019	2020	
<b>Zn</b>	200–790	151–532	108–817	160–780	128–1068
<b>Cd</b>	0,2–0,8	0,16–0,63	0,09–1,07	0,3–0,7	0,1–3,8
<b>Pb</b>	95–371	55–266	47–413	68–420	53–258
<b>Al</b>	keine Daten	2,2–5,9 %	1,3–9,0 %	5,8–9,0 %	5,4–8,9 %
<b>In</b>	0,08–0,19	0,08–0,14	0,065–0,187	0,11–0,27	unbekannt
<b>Ga</b>	16–27	14,5–19	11–22	8,6–19,6	unbekannt

## Anhang - Publikationen

[Kirchgeorg, T., Weinberg, I., Hörnig, M., Baier, R., Schmid, M.J., Brockmeyer, B. \(2018\): Emissions from corrosion protection systems of offshore wind farms: Evaluation of the potential impact on the marine environment. Marine Pollution Bulletin, Volume 136, 257-267, doi:10.1016/j.marpolbul.2018.08.058](#)

[Reese, A., Voigt, N., Zimmermann, T., Irrgeher, J., Pröfrock, D. \(2020\): Characterization of alloying components in galvanic anodes as potential environmental tracers for heavy metal emissions from offshore wind structures. Chemosphere, Volume 257, 127182, doi:10.1016/j.chemosphere.2020.127182](#)

[Zimmermann, T., von der Au, M., Reese, A., Klein, O., Hildebrandt, L., Pröfrock, D. \(2020\): Substituting HF by HBF<sub>4</sub> – an optimized digestion method for multi-elemental sediment analysis via ICP-MS/MS. Anal. Methods, 2020, doi:10.1039/D0AY01049A](#)

[Ebeling, A., Zimmermann, T., Klein, O., Irrgeher, J., Pröfrock, D. \(2022\): Analysis of Seventeen Certified Water Reference Materials for Trace and Technology-Critical Elements. Geostandards and Geoanalytical Research, 46, 2, 351 – 378, doi:10.1111/ggr.12422](#)

Investigation of potential environmental emissions from cathodic corrosion protection systems used in North Sea offshore wind farms - Part 1. Trace metal distribution in the water body, in Arbeit

Investigation of potential environmental emissions from cathodic corrosion protection systems used in North Sea offshore wind farms - Part 2. Trace metal distribution in the sediment, in Arbeit



# Impressum

**Bundesamt für Seeschifffahrt und Hydrographie  
in Kooperation mit dem Helmholtz-Zentrum Hereon**



## **Fachliche Ansprechpartner:**

Dr. Ingo Weinberg  
Bundesamt für Seeschifffahrt und Hydrographie  
Wüstland 2, 22589 Hamburg  
E-Mail: [ingo.weinberg@bsh.de](mailto:ingo.weinberg@bsh.de)  
Tel.: 040 3190-3308

Dr. Daniel Pröfrock  
Helmholtz-Zentrum Hereon  
Max-Planck-Straße 1, 21502 Geesthacht  
E-Mail: [daniel.proefrock@hereon.de](mailto:daniel.proefrock@hereon.de)  
Tel.: 04152 87-2846

## **Weitere Informationen:**

[BSH Projekt-Webseite](#)  
[Hereon Projekt-Webseite](#)

## **Redaktion:**

Sina Bold, BSH

## **Gestaltung:**

Nicole Howe, BSH

## **Bildnachweise:**

BSH/Claudia Thomsen (Titel, Seite 2, 10),  
BSH/Lisett Kretzschmann (Seite 4, 5, 12, 20, 21, 22),  
Hereon/Christian Schmid (Seite 14),  
Hereon/Nathalie Voigt (Seite 15),  
Pixabay/monika1607 (Seite 6)

© Bundesamt für Seeschifffahrt und Hydrographie (BSH) Hamburg und Rostock 2022  
[www.bsh.de](http://www.bsh.de)

Alle Rechte sind vorbehalten. Kein Teil dieses Werkes darf ohne ausdrückliche schriftliche Genehmigung des BSH reproduziert oder unter Verwendung elektronischer Systeme verarbeitet, vervielfältigt oder verbreitet werden.



