



Rijksinstituut voor Volksgezondheid
en Milieu
*Ministerie van Volksgezondheid,
Welzijn en Sport*

Beoordeling mogelijke **risico's** van **chemische stoffen** en **plastic** **deeltjes** van windturbines **op zee**

Beoordeling mogelijke risico's van chemische stoffen en plastic deeltjes van windturbines op zee

RIVM-briefrapport 2022-0241

Colofon

© RIVM 2023

Delen uit deze publicatie mogen worden overgenomen op voorwaarde van bronvermelding: Rijksinstituut voor Volksgezondheid en Milieu (RIVM), de titel van de publicatie en het jaar van uitgave.

Het RIVM hecht veel waarde aan toegankelijkheid van zijn producten. Op dit moment is het echter nog niet mogelijk om dit document volledig toegankelijk aan te bieden. Als een onderdeel niet toegankelijk is, wordt dit vermeld. Zie ook www.rivm.nl/toegankelijkheid.

DOI 10.21945/RIVM-2022-0241

M. Hof (auteur), RIVM
J. Bakker (auteur), RIVM
N. Spanbroek (auteur), RIVM

Contact:
Matthias Hof
Veilige technologische Innovaties en Circulaire economie
matthias.hof@rivm.nl

Dit onderzoek werd verricht in opdracht van Staatstoezicht op de Mijnen (SodM) in het kader van opdracht RIVM 2020 Programma 42 (ad-hoc opdracht).

Dit is een uitgave van:
**Rijksinstituut voor Volksgezondheid
en Milieu**
Postbus 1 | 3720 BA Bilthoven
Nederland
www.rivm.nl

Publiekssamenvatting

Beoordeling mogelijke risico's van chemische stoffen en plastic deeltjes van windturbines op zee

Windenergie is belangrijk om de overgang van fossiele naar duurzame energie mogelijk te maken. Daarom zullen er in de toekomst onder andere veel meer windturbines op zee komen. Zogeheten epoxy coatings en 'opofferingsmetalen' kunnen worden gebruikt om windturbines te beschermen tegen corrosie. Uit deze materialen kunnen chemische stoffen vrijkomen. Het RIVM heeft uitgezocht of dit schadelijk kan zijn voor mens en milieu. Daarnaast is een inschatting gemaakt hoeveel plastic deeltjes vrijkomen door slijtage van de turbinebladen.

Op dit moment is niet bekend of bij Nederlandse windturbines op zee daadwerkelijk epoxy coatings en opofferingsmetalen worden gebruikt. Het RIVM heeft daarom een denkbeeldig scenario doorgerekend om inzicht te krijgen in mogelijke schadelijke effecten als ze worden gebruikt. Om deze effecten niet te onderschatten heeft het RIVM gerekend met de ongunstigste aannames over de hoeveelheid stoffen die vrijkomen.

Zeker is dat de uitstoot van zink, indium, lood en cadmium uit opofferingsmetalen bij windturbines op zee niet schadelijk zijn voor mens en milieu. Het gebruik van epoxy coatings kan mogelijk wel schadelijk zijn. Of dit in de praktijk ook echt zo is, hangt sterk af van de gebruikte coating. Het verschilt namelijk per coating hoeveel en welke stoffen er uit kunnen vrijkomen. Het is daarom belangrijk om een beter beeld te krijgen welke coatings bij de huidige windturbines op zee worden gebruikt. Ook beveelt het RIVM aan om bij nieuwe windturbines uit voorzorg coatings te gebruiken waar geen of weinig stoffen uit weglekken.

Er is nog weinig informatie beschikbaar over hoeveel plastic deeltjes door slijtage van turbinebladen in de omgeving terecht komen. Het RIVM schat dat de hoeveelheid plastic deeltjes die hierdoor in de zee komt kleiner is dan via andere bronnen, zoals de Nederlandse scheepvaart. Er bestaan tegenwoordig technieken om die slijtage zo veel mogelijk tegen te gaan. De precieze hoeveelheid deeltjes hangt onder andere sterk af van de gebruikte techniek.

Dit onderzoek is uitgevoerd in opdracht van het Staatstoezicht op de Mijnen (SodM). Het is een vervolg op een quickscan uit 2022 waarin verschillende aandachtspunten zijn benoemd.

Kernwoorden: windturbines, wind op zee, stoffen, emissie, microplastics, risico's, coatings

Synopsis

Assessment of potential risks of chemicals and plastic particles from offshore wind turbines

Wind energy is important to facilitate the transition from fossil fuels to sustainable energy. For this reason, many more offshore wind turbines will be installed in the future. Epoxy coatings and 'sacrificial metals' can be used to protect wind turbines against corrosion. These materials may release chemicals. RIVM has investigated whether this could be harmful to human health and the environment. It has also made an estimate of the amount of plastic particles released due to wear and tear of the turbine blades.

At present, it is unknown whether epoxy coatings and sacrificial metals are actually used in Dutch offshore wind turbines. RIVM therefore used a hypothetical scenario to gain insight into the potential harmful effects if these materials are indeed used. To avoid underestimating these effects, RIVM based its calculations on the most unfavourable assumptions about the amount of substances released.

What is certain is that the release of zinc, indium, lead and cadmium from sacrificial metals on offshore wind turbines is not harmful to human health and the environment. However, the use of epoxy coatings may be harmful. Whether this is actually the case in practice depends largely on the coating used, as the amounts and types of substances that may be released vary from one coating to the next. It is therefore important to obtain a clearer picture of which coatings were used on existing offshore wind turbines. As a precaution, RIVM also recommends using coatings on new wind turbines that cause little to no release of substances.

Little information is available about how many plastic particles end up in the environment due to wear and tear of turbine blades. RIVM estimates that the amount of plastic particles that end up in the sea this way is lower than from other sources, such as the Dutch shipping industry. Modern techniques minimise this wear and tear. The precise amount of particles released is highly dependent on factors such as the technique used.

This study was commissioned by the Dutch State Supervision of Mines (SodM). It is a follow-up to a quick scan from 2022 in which various points for attention were identified.

Keywords: wind turbines, offshore wind, substances, emissions, microplastics, risks, coatings

Inhoudsopgave

Samenvatting — 9

1 Inleiding — 11

2 Afbakening en werkwijze — 13

2.1 Afbakening — 13

2.2 Werkwijze — 14

2.2.1 Risicobeoordeling van epoxy coatings en opofferingsmetalen ter bescherming van de monopile — 14

2.2.2 Berekening van de verwachte concentratie van stoffen in water (PEC) — 14

2.2.3 Keuze van de toetsnorm (PNEC) — 16

2.2.4 Emissie van plastic deeltjes door slijtage van coatings — 17

3 Emissies en risico's van stoffen uit epoxy coatings en opofferingsmetalen — 21

3.1 Risicobeoordeling van uitloging van BPA, 4-tbp en BADGE uit epoxy coatings — 21

3.2 Risicobeoordeling van emissie van zink, indium, lood en cadmium door gebruik van opofferingsmetalen — 23

4 Emissie van plastic deeltjes door slijtage van de turbinebladen — 25

5 Conclusies en aanbevelingen — 27

5.1 Conclusie risico's door uitloging van BPA, 4-tbp en BADGE uit epoxy coatings — 27

5.2 Conclusie risico's door emissies van zink, indium, lood en cadmium bij gebruik van opofferingsmetalen — 28

5.3 Conclusie emissie van plastic deeltjes door slijtage van de turbinebladen — 28

5.4 Aanbevelingen — 28

6 Literatuur — 31

7 Bijlagen — 33

7.1 Informatievraag producenten (Engels) — 33

7.2 Overige bijlagen — 35

Samenvatting

Windenergie speelt een grote rol in de energietransitie en de verwachting is dat het aantal windparken en windturbines op zee sterk toe zal nemen de komende decennia. Staatstoezicht op de Mijnen (SodM) heeft aan het RIVM gevraagd om meer inzicht te geven in mogelijke risico's van chemische stoffen die gebruikt worden bij windturbines op zee. Het RIVM heeft in 2022 een quickscan gepubliceerd waarin verschillende aandachtspunten zijn benoemd. Het huidige onderzoek is een vervolg op deze quickscan. In dit rapport wordt op basis van modelberekeningen een beoordeling gemaakt van de mogelijke risico's voor mens en milieu door emissies van stoffen uit epoxy coatings en opofferingsmetalen. Ook wordt een inschatting gemaakt van de hoeveelheid plastic deeltjes dat vrijkomt door slijtage van de turbinebladen.

Er ontbreekt op dit moment een overzicht van welke corrosie beschermende middelen worden gebruikt bij de Nederlandse windparken op zee. Via de Nederlandse WindEnergie Associatie is om informatie gevraagd over gebruikte coatings, opofferingsmetalen en emissie van stoffen hieruit voor specifiek de Nederlandse windparken. Deze informatie was helaas niet beschikbaar. Daarom is gebruik gemaakt van gegevens uit de literatuur. Hieruit blijkt dat er grote verschillen in uitloging van stoffen kan zitten tussen verschillende epoxy coatings. Om de mogelijke risico's niet te onderschatten is in de huidige risicobeoordeling gerekend met de hoogst gevonden waarden.

Er worden geen risico's voor mens of milieu verwacht door emissies van zink, indium, lood en cadmium als gevolg van het gebruik van opofferingsmetalen bij windturbines op zee. Wel zijn er mogelijk risico's voor mens en milieu door uitloging van BPA en 4-tbp bij windparken waar gebruik wordt gemaakt van epoxy coatings om de monopile te beschermen. Omdat deze risicobeoordeling is gedaan op basis van worst-case aannames moeten deze resultaten vooral gezien worden als een indicatie dat risico's voor mens of milieu door uitloging van stoffen uit coatings niet bij voorbaat uit te sluiten zijn.

Over de emissie van plastic deeltjes door slijtage van turbinebladen is nog zeer weinig informatie beschikbaar. In het huidige rapport is op basis van informatie van producenten en beschikbare informatie in wetenschappelijke literatuur een ruwe schatting gemaakt. De daadwerkelijke hoeveelheid hangt onder andere sterk af van de effectiviteit en mate waarin technieken worden gebruikt om slijtage te verminderen. De emissie van plastic deeltjes door slijtage van turbinebladen van alle Nederlandse windparken in 2030 (met een verwacht 21 GW aan windturbines) wordt geschat op maximaal 38.000 kg. Dit getal ligt ongeveer 5 keer lager dan schattingen van emissies van plastic deeltjes door slijtage van coatings gebruikt in de Nederlandse scheepvaart.

Op basis van de resultaten in het huidige onderzoek worden de volgende aanbevelingen gedaan:

- Voor nieuwe windparken gebruik maken van coatings die geen of zo min mogelijk gevaarlijke stoffen bevatten, of indien noodzakelijk gebruik maken van coatings waar gevaarlijke stoffen zo min mogelijk uitlogen.
- Voor bestaande windparken in kaart brengen welke coatings er gebruikt zijn en welke stoffen hieruit kunnen vrijkomen, met name bij windparken met plannen voor aquacultuur of visvangst.
- Per windpark een nauwkeurigere inschatting maken van de risico's voor mens en milieu door uitloging van stoffen uit coatings. Hiervoor is per windpark informatie over de gebruikte coatings en de uitloging van stoffen uit deze coatings noodzakelijk.
- Op basis van de nauwkeurigere risicobeoordelingen kan besloten worden of aanvullende metingen in water, sediment of organismen nodig zijn om de blootstellingsschattingen te verfijnen.
- Onderzoek naar de daadwerkelijke emissie van plastic deeltjes door slijtage van de turbinebladen, onder andere door inzicht te krijgen in de effectiviteit en het gebruik van slijtageverminderende technieken bij windparken op zee.

1 Inleiding

Windenergie speelt een aanzienlijke rol in de lopende energietransitie. Op dit moment staan er 671 windturbines op zee (tabel 1). Om de klimaatdoelstellingen te halen en de uitstoot van koolstofdioxide te verminderen, is er de ambitie om het aantal turbines op zee sterk uit te breiden en in 2030 21 GW op te wekken met windturbines op zee. De verwachting is dat ook na 2030 de hoeveelheid turbines op zee blijft groeien en dat er in 2050 voor 38 tot 72 GW aan turbines op zee zullen staan (RVO, bezocht op 21-03-2023). Met het oog op deze ontwikkelingen heeft Staatstoezicht op de Mijnen (SodM) het RIVM gevraagd om inzicht te geven in de milieurisico's van stoffen binnen de levenscyclus van windmolenparken op zee. Hiervoor heeft het RIVM in 2021 een quickscan uitgevoerd waarbij in beeld is gebracht welke stoffen omgaan in de levenscyclus van windturbines, van welke stoffen er een kans is op emissies, en welke (preventieve) maatregelen er mogelijk zijn (RIVM, 2022).

In de eerder uitgevoerde quickscan naar emissies van stoffen bij windturbines op zee zijn verschillende aandachtspunten geïdentificeerd. Dit betrof de uitloging van de Zeer Zorgwekkende Stoffen bisfenol A (BPA) en 4-tert-butylfenol (4-tbp) uit coatings op basis van epoxy. Coatings van epoxy kunnen gebruikt worden op de monopile (het deel van de turbine dat onder water staat) om het staal tegen corrosie te beschermen. Naast epoxy coatings kan er ook gebruikt gemaakt worden van andere beschermende middelen om de monopile te beschermen, zoals opofferingsmetalen of "impressed current cathodic protection" (ICCP). Omdat de functie van opofferingsmetalen is om te corroderen in plaats van het beschermde materiaal, is in de quickscan ook de emissie van metalen bij gebruik van opofferingsmetalen aangestipt als aandachtspunt. Een derde aandachtspunt in de quickscan was de slijtage van de turbinebladen. De voorkant van de bladen kan sterk slijten door wrijving met bijvoorbeeld regen of stofdeeltjes, waarbij de coating op de bladen als plastic deeltjes in het milieu terecht kan komen.

Geëmitteerde stoffen bij windturbines op zee kunnen in het omliggende water terecht komen, waarbij afhankelijk van de daaruit voortvloeiende concentraties er effecten op organismen in het milieu kunnen plaatsvinden. Ook zijn er plannen voor aquacultuur of visvangst bij windparken op zee. Hierdoor zouden er ook risico's voor de mens kunnen zijn door consumptie van vis of andere zeeorganismen die gekweekt of gevangen zijn bij windturbines op zee.

Om de risico's van een stof in te kunnen schatten moet de (verwachte) concentratie in het milieu vergeleken worden met een norm of grenswaarde waaronder er geen nadelige effecten door een stof verwacht worden. Oftewel, de blootstelling ten opzichte van hoe gevaarlijk een stof is. Omdat de quickscan een verkennend onderzoek betrof waren er nog geen inschattingen gemaakt van de omvang van de emissies van stoffen uit epoxy coatings, metalen uit opofferingsmetalen, of plastic deeltjes door slijtage van de bladen. In het huidige rapport worden op

basis van beschikbare data inschattingen gemaakt van de omvang van deze emissies en wordt vervolgens op basis van modelberekeningen een inschatting gemaakt van de risico's voor (organismen in) het milieu en ook de mens via consumptie van vis.

Daarbij worden binnen dit onderzoek de volgende vragen behandeld:

- 1) In welke mate worden er emissies van stoffen uit coatings van epoxy en offeringsmetalen verwacht bij gebruik ter bescherming van de monopile van windturbines op zee?
- 2) Wat zijn de verwachte concentraties van deze stoffen in water in het gebied van een windpark op zee?
- 3) Wat zijn de risico's door emissies van deze stoffen voor organismen in het milieu en de mens bij consumptie van vis gekweekt of gevangen bij windparken op zee?
- 4) In welke mate worden er emissies van plastic deeltjes door slijtage van turbinebladen verwacht bij windturbines op zee?

Tabel 1 Overzicht van windparken en aantal windturbines op zee.

Windpark		Aantal turbines	Vermogen per turbine (MW)	Totaal vermogen (MW)	In operatie vanaf	Oppervlakte (km ²)
Operationele windparken						
Borssele	I en II	94	8,0	752	2020	344
	III en IV	77	9,5	731,5	2020	
	V	2	9,5	19	2021	
Gemini Windpark		150	4	600	2016	70
Luchterduinen		43	3	129	2015	16
Prinses Amalia Windpark		60	2	120	2008	14
Egmond aan Zee		36	3	108	2007	27
Hollandse Kust Zuid (excl. Luchterduinen) ¹		140	11	1520	2023/2024	214
Hollandse Kust Noord (excl. Prinses Amalia Windpark) ¹		69	11	759	2023/2024	92

¹ Hollandse Kust zuid en Hollandse Kust Noord zijn in aanbouw en op het moment nog niet volledig operationeel.

2 Afbakening en werkwijze

2.1 Afbakening

Het huidige rapport is een vervolg op de eerder uitgevoerde quickscan "Inzicht in emissies van chemische stoffen bij windturbines op zee". In dit rapport worden meerdere aandachtspunten uit de quickscan nader bekeken. Het gaat hier om het uitlogen van BPA en 4-tbp uit epoxy coatings, emissie van metalen door gebruik van opofferingsmetalen, en emissies van plastic deeltjes door slijtage van de turbinebladen.

Voor het onderzoek heeft het RIVM informatie opgevraagd aan Staatstoezicht op de Mijnen, Rijkswaterstaat en producenten van windturbines via de Nederlandse WindEnergie Associatie (NWEA) over het gebruik van coatings, opofferingsmetalen en de slijtage van turbinebladen bij windturbines op zee (vragenlijst in bijlagen, H7.1). De verkregen informatie hieruit was beperkt en bestond uit schattingen van emissies van microplastics en enkele voorbeelden van gebruikte coatings op turbinebladen. Er is geen informatie verkregen over gebruikte coatings op de monopile en uitloging van stoffen uit deze coatings. Het is dus niet bekend of er bij Nederlandse windparken gebruik wordt gemaakt van epoxy coatings. Ook is er geen overzicht van bij welke windparken er nog gebruik wordt gemaakt van opofferingsmetalen². Dit kan per windpark verschillen.

Vanwege het gebrek aan informatie over de praktijk bij Nederlandse windparken op zee is een toxicologische risicobeoordeling uitgevoerd op basis van een doorgerekend scenario. Dit scenario bestaat uit een windpark met 200 turbines waarbij gebruik wordt gemaakt van coatings van epoxy en opofferingsmetalen om de onder water staande delen van de turbines te beschermen. Voor de emissie van stoffen uit deze materialen is uitgegaan van worst-case data uit de literatuur. Er zijn dus geen metingen verricht binnen dit onderzoek. De risicobeoordeling gaat in op zowel risico's voor organismen in het milieu als risico's voor de mens door consumptie van vis of mosselen gekweekt in de windparken.

De risicobeoordeling beperkt zich tot epoxy coatings en opofferingsmetalen op de monopile van windturbines. De emissie van stoffen uit coatings van andere onderdelen van de turbine zijn in dit onderzoek buiten beschouwing gelaten. Bovenwater wordt over het algemeen gebruik gemaakt van polyurethaan coatings omdat deze beter bestand zijn tegen verwerking door zonlicht dan epoxy coatings (Momber & Marquardt, 2018). Polyurethaan bevat geen BPA of 4-tbp, en vooralsnog lijken er ook geen andere stoffen uit te logen met schadelijke effecten op organismen (Bell et al., 2020).

Voor de emissie van plastic deeltjes was niet voldoende informatie beschikbaar om een kwantitatieve risicobeoordeling uit te voeren. Hiervoor is wel een schatting gemaakt van de omvang van de emissie en is dit in perspectief geplaatst.

² Staatstoezicht op de Mijnen heeft aangegeven dat voor zover bekend er bij modernere windparken gebruik wordt gemaakt van "Impressed Current Cathodic Protection" in plaats van opofferingsmetalen.

In de quickscan is ook genoemd dat er mogelijk gebruik wordt gemaakt van PFAS bij windturbinebladen. In de hierboven genoemde vragenlijst aan de NWEA is daarom gevraagd naar het eventuele toepassen van PFAS. Dat heeft niet geleid tot aanvullende informatie. Vanwege gebrek aan informatie is in dit rapport niet verder in gegaan op de mogelijke aanwezigheid van PFAS. Dit blijft een aandachtspunt.

De werkwijze wordt per onderdeel in de volgende sectie in detail toegelicht.

2.2 Werkwijze

2.2.1 *Risicobeoordeling van epoxy coatings en opofferingsmetalen ter bescherming van de monopile*

Om de risico's van een bepaalde stof in te schatten is het belangrijk om de blootstelling aan die stof te vergelijken met de mate van gevaarlijkheid van deze stof. In dit geval gaat het dan om de concentratie van een stof in (zee)water en een grenswaarde waaronder deze stof als veilig wordt gezien.

In het huidige rapport zijn de risico's van de stoffen bepaald door de verwachte opgeloste concentratie van een stof in water ("Predicted Environmental Concentration": PEC) te berekenen en vervolgens te vergelijken met de concentratie waaronder de stof veilig geacht wordt voor zowel organismen in het milieu als de mens ("Predicted No Effect Concentration": PNEC). Dit wordt gedaan door de PEC te delen door de PNEC, wat resulteert in een inschatting van het risico voor die stof (RCR, "Risk Characterisation Ratio"). Als voor een stof geldt dat de RCR lager is dan 1 dan wordt er geen risico verwacht voor het milieu door die stof.

Formule 1: Berekening van de "Risk Characterisation Ratio"

$$RCR = \frac{PEC}{PNEC}$$

2.2.2 *Berekening van de verwachte concentratie van stoffen in water (PEC)*

Voor de berekening van verwachte concentraties in het omliggende zeewater van Bisfenol A (BPA), 4-tert-butylfenol (4-tbp) en de metalen van opofferingsmetalen is het model MAMPEC gebruikt (versie 3.1.0.5). MAMPEC is een door Deltares onderhouden model dat oorspronkelijk is ontwikkeld voor de berekening van verwachte concentraties van stoffen die uitlogen uit coatings voor boten. Voor het huidige rapport zijn de windturbines en bijbehorend substations gemodelleerd als stilstaande "boten" met een bepaalde oppervlakte. Een substation is een centrale installatie waar de opgewekte elektriciteit verzameld en omgezet wordt naar een hogere spanning.

2.2.2.1 Scenario

Voor de risicobeoordeling is uitgegaan van een model windpark bestaande uit 200 turbines en 1 substation in een gebied van 200 km². Voor de oppervlakte van een monopile is uitgegaan van 1500 m². Deze oppervlakte is representatief voor turbines met een monopile van ongeveer 7-8 m en een waterdiepte van 40 m en is inclusief de binnenkant van de monopile. Voor de substation is uitgegaan van een aan water blootgesteld oppervlakte van 12.000 m². Deze getallen zijn

representatief voor modernere windparken zoals windpark Borssele (Tabel 1). Voor het scenario is er vanuit gegaan dat er bij het model windpark gebruik wordt gemaakt van epoxy coatings en opofferingsmetalen om de monopile van de turbines tegen corrosie te beschermen. Verder is voor het omgevings-scenario uitgegaan van de standaardwaarden voor open zee in MAMPEC. Deze waarden zijn gebaseerd op de Noordzee. Een overzicht van alle gebruikte waarden is te vinden in de bijlagen, tabel S1. Voor de stoffeigenschappen van de gemodelleerde stoffen is uitgegaan van de waarden zoals vermeld in de REACH registratie dossiers (Tabel S2 en S3 in de bijlagen).

2.2.2.2 Emissies van BPA, 4-tbp en BADGE uit epoxy coatings

Om de verwachte concentraties in water te kunnen berekenen is het van belang om inzicht te hebben in hoeveel van een bepaalde stof geëmitteerd wordt. Voor BPA en 4-tbp geldt dat deze in het milieu terecht komen door uitloging uit epoxy coatings. Daarbij is de uitlogings-snelheid per oppervlakte coating in water van belang. Deze data is niet beschikbaar voor specifieke coatings gebruikt bij windturbines op zee. Daarom is gebruikt gemaakt van data over de uitloging van deze stoffen van epoxy coatings voor op staal in het algemeen (tabel 2). Uit deze literatuur blijkt dat de mate van uitloging van een stof sterk per coating kan verschillen. Om de mogelijke risico's niet te onderschatten is voor de huidige risicobeoordeling gerekend met de hoogst gevonden waarde per stof (tabel 2). Naast BPA en 4-tbp is ook de stof Bisfenol-A-diglycidyl- ether (BADGE) meegenomen in de risicobeoordeling, omdat deze stof in de literatuur ook werd aangetroffen in uitlogingsvloeistof van epoxy coatings.

Tabel 2 overzicht van de bandbreedte in uitlogings-snelheden van BPA, 4-tbp en BADGE uit epoxy coatings voor op staal. De gebruikte waarde in de risicobeoordeling is dikgedrukt.

Stof	Aantal geteste coatings	bandbreedte uitloging ($\mu\text{g}/\text{m}^2/\text{dag}$)	Opmerkingen	Bronnen
Bisfenol A (BPA)	16	onder detectielimiet tot $1,5 \times 10^4$	1 van de 16 coatings met uitloging van $1,5 \times 10^4$ $\mu\text{g}/\text{m}^2/\text{dag}$, de rest minder dan 53 $\mu\text{g}/\text{m}^2/\text{dag}$	Vermeirssen et al., 2017; Bruchet et al., 2014; Bae et al., 2002; Cantoni et al., 2021; Bell et al., 2020; Bell et al., 2021
Bisfenol A diglycidyl ether (BADGE)	7	onder detectielimiet tot $3,8 \times 10^2$		Vermeirssen et al., 2017; Bell et al., 2020
4-tert-butylphenol (4tBP)	3	$6,4 \times 10^2$ tot $3,2 \times 10^4$		Bell et al., 2020; Bell et al., 2021

2.2.2.3 Emissies van metalen uit opofferingsmetalen

Voor kathodische bescherming van windturbines en substations bij windparken op zee kan gebruik worden gemaakt van aluminium als

opofferingsmetaal. Per turbine betreft dit 13 ton aan opofferingsmetaal en nog eens 150 ton voor een substation (Kircheorg et al., 2018). Naast aluminium bevat dit opofferingsmetaal ook sporen van andere metalen, waaronder zink, indium, lood en cadmium (Reese et al., 2020). Doordat de functie van het opofferingsmetaal is om te corroderen in plaats van het staal wat het beschermt, vinden hier emissies van plaats. In de huidige studie zijn verwachte concentraties berekend van zink, indium, lood en cadmium. Aluminium is een metaal wat als niet gevaarlijk voor het milieu wordt gezien en van nature veel voorkomt. Hierom worden er bij voorbaat geen risico's voor het milieu verwacht door emissie van aluminium, en zijn er geen verwachte concentraties van berekend.

Om de mate van emissie van metalen te schatten is er van uitgegaan dat de volledige hoeveelheid gebruikte materiaal erodeert gedurende de levensduur van de windturbines (tabel 3). Voor de modellering in MAMPEC is deze emissie per jaar vertaald naar een gemiddelde emissie per oppervlakte per dag, vanwege de manier van invoer die vereist is bij gebruik van het model (tabel 4). Omdat de metalen zink, lood en cadmium ook van nature voorkomen, is voor deze stoffen een achtergrondwaarde in water meegenomen in de modellering (tabel S3). De achtergrondwaarde is overgenomen van de RIVM risico's van stoffen database (<https://rvszoekstestem.rivm.nl/>).

Tabel 3 Schatting totale emissie van opofferingsmetaal per jaar voor een windpark met 200 turbines.

	massa opofferingsmetaal (kg)	Aantal	Opper-vlakte per eenheid (m²)	levensduur (jaar)	Emissie per jaar (kg/jaar)
Monopile turbine	1.30E+4	200	1,5E+3	25	1,04E+5
Onderstel substation	1.50E+5	1	1,2E+4	25	6,00E+3
Totaal					1,10E+5

Tabel 4 Gebruikte waarden voor de emissie van zink, indium, lood en cadmium in MAMPEC.

Stof	Fractie van metaal in totale massa opofferingsmetaal	emissie per jaar omgerekend naar µg/m²/dag
Zink	2,62E-2	2,20
Indium	1,43E-4	1,20E-2
Lood	6,70E-6	5,63E-4
Cadmium	2,55E-7	2,14E-5

2.2.3 Keuze van de toetsnorm (PNEC)

Voor de waarde van de PNEC is in eerste instantie uitgegaan van bestaande wettelijke normen in het Besluit kwaliteitseisen en monitoring water 2009. Deze normen zijn afgeleid op basis van het meest gevoelige eindpunt (e.g. ecotoxiciteit, doorvergiftiging, humane toxiciteit) en zijn dekkend voor risico's voor zowel organismen in het milieu als voor de mens door bijvoorbeeld consumptie van vis of mosselen. Niet alle stoffen die onderzocht zijn in dit onderzoek hadden een wettelijk vastgestelde norm. In dat geval is eerst gekeken of er (Europese)

normvoorstellen beschikbaar waren voor deze stoffen. Indien dit niet het geval was, is gebruik gemaakt van de PNEC uit het REACH registratiedossier van de stof. Deze laatste PNEC is bedoeld voor effecten op organismen in het milieu, en dus niet voor de mens. Om ook risico's in te kunnen schatten voor de mens door consumptie van vis of andere zeeorganismen, is een indicatieve norm afgeleid volgens de Europese richtlijnen. Vervolgens is de laagste waarde gebruikt voor de risicobeoordeling. Tabel 5. geeft een overzicht van de gebruikte PNEC van elke stof en de geraadpleegde bron.

Tabel 5 Overzicht van gebruikte toetsnormen (PNEC) voor de risicobeoordeling. De gebruikte normen zijn afgeleid voor het mariene milieu.

Stof	PNEC (µg/l)	Type norm
BPA	3,40E-5	Europees normvoorstel
4-tbp	1,00E-4	Concept normvoorstel RIVM
BADGE	1,00	PNEC uit REACH registratie dossier
Zink	3	Wettelijk vastgestelde norm
Indium	40,6	PNEC uit REACH registratie dossier
Lood	1,3	Wettelijk vastgestelde norm
Cadmium	0,2	Wettelijk vastgestelde norm

Voor cadmium, lood en zink zijn er wettelijke normen. Voor BPA, 4-tbp, BADGE, en indium zijn er geen wettelijk vastgestelde normen. Voor BPA en 4-tbp zijn wel normvoorstellen beschikbaar, die voor dit rapport overgenomen zijn. Voor BPA betreft dit een Europees normvoorstel dat is opgenomen in de concept-dochterrichtlijn Prioritaire Stoffen onder de Kader Richtlijn Water van de Commissie. Het gevoeligste eindpunt waar de norm op gebaseerd is betreft risico's voor de mens door consumptie van bivalven (bijv. mosselen). Voor 4-tbp betreft het een indicatieve norm die door het RIVM is afgeleid, deze norm wacht nog op wetenschappelijke goedkeuring. Het gevoeligste eindpunt waar de normafleiding van 4-tbp is gebaseerd is ecotoxiciteit. Het is bekend dat vissen gevoelig zijn voor alkylfenolen (waaronder 4-tbp) vanwege de hormoon verstorende werking van deze stoffen. Van BADGE en Indium waren alleen PNEC-waardes voor organismen in het milieu beschikbaar in het REACH registratie dossier. Voor BADGE was er voldoende informatie in het dossier om een indicatieve norm af te leiden ter bescherming van de mens blootgesteld via consumptie van vis of andere zeeorganismen. Deze norm was hoger dan de PNEC voor organismen in het milieu (1,96 mg/l ten opzicht van 1,00 µg/l). Voor de risicobeoordeling is de laagste waarde, de PNEC uit het registratiedossier, gekozen. Voor indium was onvoldoende informatie beschikbaar om een indicatieve norm af te leiden ter bescherming van de mens blootgesteld via consumptie van vis of andere zeeorganismen en is de beschikbare PNEC uit het registratiedossier gebruikt.

2.2.4

Emissie van plastic deeltjes door slijtage van coatings

Voor zover bekend is er geen wetenschappelijke literatuur beschikbaar over de mate van emissie van plastic deeltjes door de slijtage van turbinebladen van windturbines. Wel wordt in een factsheet van Norwea, de Noorse branchevereniging van de windenergie sector, over de slijtage van turbinebladen een getal van 150 gram per turbine per jaar genoemd. Voor het huidige onderzoek is aan producenten van

windturbines om inzicht gevraagd in de erosie van turbinebladen. Van één producent (van de 2 producenten actief op het Nederlandse deel van de Noordzee) is antwoord gekregen dat dit geschat wordt op 35,8 kg per turbine over de levensduur van een turbine (25 jaar) voor turbines zonder zogenaamde Leading Edge Protection (LEP), en nog maar 78 gram per turbine over de levensduur van een turbine met LEP. LEP zijn speciaal ontwikkelde coatings of materialen ter bescherming van de bladen tegen slijtage, waar tegenwoordig veel ontwikkeling op plaatsvindt. Deze getallen zijn doorgerekend naar het totale (verwachte) aantal van turbines op zee in 2023 en 2030 om tot een schatting te komen van de totale emissie van plastic deeltjes door slijtage van turbinebladen op zee. Voor het geschatte aantal turbines in 2030 is uitgegaan dat dit turbines van 11 MW betreft. Het is mogelijk dat het aantal MW per turbine in de toekomst nog hoger zal zijn, waardoor het totale aantal turbines in 2030 lager uit zal vallen dan hier geschat.

Omdat er onvoldoende inzicht is in hoe representatief de getallen uit de sector zijn voor alle windturbines op zee, heeft het RIVM ook een eigen grove schatting gemaakt. Dit is gedaan op basis van afbeeldingen van erosie uit de wetenschappelijke literatuur en bekende dichtheden van coatings op turbinebladen (Shankar Verma et al., 2021a: figuur 1B). Verder is bekend dat de lengte van het blad dat gevoelig is voor slijtage afhangt van de ashoogte van de turbine, de lengte van het blad, de tipsnelheid en het vermogen van de turbine (Shankar Verma et al., 2021b). Bij de schatting van de slijtage zijn twee scenario's berekend: een "hoog" scenario waarbij aangenomen is dat de gehele lengte van het blad slijt in een periode van 3 jaar, en een "laag" scenario waarbij slechts een deel van het blad slijt over een periode van 8 jaar (tabel 6). Het deel van het blad dat slijt in het lage scenario is geschat op basis van figuren in Shankar Verma et al. en de lengte en het vermogen van de turbines (tabel 7).

Het huidige rapport beperkt zich tot een inschatting van de omvang van de emissie van plastic deeltjes door slijtage van de bladen van windturbines op zee. In tegenstelling tot chemische stoffen zijn er tot op heden geen gevaarsclassificaties of milieukwaliteitsnormen voor microplastics of andere plastic deeltjes. Ook is er nog te weinig bekend over de deeltjesgrootte van de plastic deeltjes die van turbinebladen afslijten, en hoe deze zich verspreiden in het milieu. Om deze reden wordt er nog geen uitspraak gedaan over mogelijke risico's door emissie van plastic deeltjes bij windturbines op zee.

Tabel 6 Overzicht van scenario's voor de schatting van slijtage van de turbinebladen

Scenario schatting	Dikte coatingsysteem (µm)	Breedte slijtage (m)	Dichtheid coatings (kg/m³)	Lengte slijtage	Periode slijtage (jaar)
hoog	600	0.200	1500	volledige lengte blad (zie tabel 7)	3
laag	600	0.200	1500	deel van lengte blad (zie tabel 7)	8

Tabel 7 Waarden over aantal turbines, vermogen, lengte bladen, en inschatting van lengte blad gevoelig voor erosie zoals gebruikt in de emissieschattingen van plastics door slijtage van de bladen.

Windpark	Aantal turbines	Vermogen	Lengte blad	Lengte blad gevoelig voor leading edge erosie
Borssele I en II	94	8	80	20
Borssele III en IV	77	9,5	80	20
Borssele V	2	9,5	80	20
Gemini Windpark	150	4	65	15
Luchterduinen	43	3	56	15
Prinses Amalia Windpark	60	2	40	10
Egmond aan Zee	36	3	45	10
Hollandse Kust zuid	140	11	94	25
Hollandse Kust Noord	69	11	97	25
Bijkomende turbines tot aan 2030	1700	11	95	25

3 Emissies en risico's van stoffen uit epoxy coatings en opofferingsmetalen

3.1 Risicobeoordeling van uitloging van BPA, 4-tbp en BADGE uit epoxy coatings

Van de getoetste stoffen worden van BPA en 4-tbp concentraties verwacht die de toetsnormen overschrijden (tabel 8). Deze stoffen kunnen uitlogen uit coatings op basis van epoxy. Ook kan de stof BADGE uitlogen uit epoxy. Van BADGE ligt de geschatte maximale concentratie wel meer dan 10.000 keer onder de toetsnorm met een RCR van $7,71E-5$. De verwachte maximale concentraties van BPA en 4-tbp in water zijn respectievelijk 18,4 en 16,1 keer hoger dan de concentraties waaronder er geen effecten verwacht worden. Op basis van de huidige berekeningen zouden er dus risico's voor mens en of het milieu kunnen zijn bij gebruik van epoxy coatings ter bescherming van de monopile van windturbines.

De overschrijding van de veilig geachte concentratie door BPA en 4-tbp wordt niet in het gehele gebied van het windpark verwacht. Met het model MAMPEC wordt het gemodelleerde gebied opgedeeld in "grids", waarbij voor elk grid een verwachte concentratie wordt berekend. Voor BPA en 4-tbp was het 95% percentiel van de verwachte concentraties ook hoger dan de toetsnorm, met respectievelijk verwachte concentraties van $5,22E-4$ µg/l en $1,30E-3$ µg/l en toetsnormen van respectievelijk $3,40E-5$ en $1,00E-4$ (tabel S4 in bijlagen). Dit betekent dat in minstens 5% van het gebied een risico verwacht wordt. De mediane verwachte concentratie was daarentegen voor beide stoffen dusdanig laag dat het model een concentratie van 0,00 µg/l weergeeft. Dit betekent dat er in minstens de helft van het gebied geen risico verwacht wordt door BPA en 4-tbp. Ook buiten het directe gebied rondom een windpark worden er geen risico's verwacht door uitloging van deze stoffen, vanwege de mate van verdunning op grotere schaal en omdat BPA en 4-tbp geen persistente stoffen zijn.

De toetsnormen voor BPA en 4-tbp zijn respectievelijk $3,40E-5$ µg/l en $1,00E-4$ µg/l. Beide toetsnormen zijn gekozen op basis van (concept) normvoorstellen en nog niet wettelijk bepaald. Voor BPA was het eindpunt menselijke blootstelling via consumptie van bivalven (bijv. mosselen of oesters) leidend voor het voorstel van de norm. Deze route is gezien de plannen voor meervoudig gebruik in de vorm van aquacultuur of visvangst rondom windturbines zeer relevant. Indien dit gebeurt rondom windturbines waarbij gebruikt wordt gemaakt van epoxy coatings zou dit dus kunnen leiden tot gezondheidsrisico's voor de mens. In het voorstel van BPA zijn ook grenswaarden afgeleid puur ter bescherming van organismen in het milieu. De laagste waarde hiervan (eindpunt predatoren door middel van doorvergiftiging) lag een stuk hoger dan de grenswaarde voor de mens via consumptie van vis of andere zeeorganismen, namelijk 1,2 µg/l in plaats van $3,40E-5$ µg/l. Omdat de geschatte maximale concentratie van BPA lager ligt dan de laagste grenswaarde voor organismen in het milieu, worden er geen

ecotoxicologische risico's verwacht door uitloging van BPA ($RCR_{\text{predatoren}} = 5,23E-4$). Voor 4-tbp geldt het tegenovergestelde: bij de afleiding van de norm in het concept normvoorstel voor deze stof bleek de ecotoxiciteit van deze stof bepalend. De voorgestelde grenswaarde ter bescherming van de menselijke gezondheid door blootstelling via consumptie van vis of andere zeeorganismen van 4-tbp was orde-groottes hoger dan de grenswaarde ter bescherming van organismes in het milieu, namelijk $31 \mu\text{g/l}$ ten opzichte van $1,00E-4 \mu\text{g/l}$. De maximale geschatte concentratie van 4-tbp ligt meer dan 10.000 keer lager dan de grenswaarde voor humaan via consumptie van vis of andere zeeorganismen ($RCR = 5,03E-5$). Voor 4-tbp geldt dus dat hoewel er risico's verwacht worden voor organismen in het milieu door uitloging uit epoxy coatings, er geen risico's verwacht worden voor de mens via consumptie van vis of andere zeeorganismen gekweekt of gevangen bij windparken op zee. Voor BPA geldt juist dat er wel risico's verwacht worden voor de mens via consumptie van vis, mosselen of oesters, en niet voor organismen in het milieu.

Het is op basis van de huidige informatie niet te zeggen of deze risico's er in de praktijk ook daadwerkelijk zijn bij windturbines op zee. Ten eerste zijn er meerdere mogelijke methoden, naast coatings van epoxy, om monopiles te beschermen tegen corrosie, zoals opofferingsmetalen of zogenaamde "impressed current cathodic protection". Uit een review naar beschermende coatings voor windturbines op zee in Duitsland bleek dat van de 34 bekeken commercieel gespecificeerde coating systemen om de monopiles te beschermen, er slechts 3 het gebruik van epoxy coatings specificeren (Momber & Marquardt, 2018). Er is op dit moment geen overzicht of en in welke mate er gebruik wordt gemaakt van epoxy coatings bij Nederlandse windparken op zee. Als er bij een windpark geen gebruik wordt gemaakt van epoxy coatings worden hier uiteraard ook geen risico's door uitloging van BPA of 4-tbp verwacht. Het is dus noodzakelijk om hier beter inzicht in te krijgen, voornamelijk bij windparken waar plannen zijn voor meervoudig gebruik zoals aquacultuur, visvangst of natuurontwikkeling. Ook is er geen data over het uitloggen van stoffen uit coatings specifiek gebruikt voor windturbines op zee. De huidige berekening zijn uitgevoerd op basis van worst-case data uit de literatuur over epoxy coatings in het algemeen. Uit deze literatuur blijkt dat de mate van uitloging sterk per product kan verschillen. Om een accurate berekening te maken voor windturbines op zee zou deze informatie beschikbaar moeten zijn voor de daadwerkelijk gebruikte coatings. Ook metingen van BPA en 4-tbp in water of in gekweekte of gevangen organismen bij windturbines op zee zouden bij kunnen dragen aan een betere inschatting van de risico's. Gezien de zeer lage getallen van de toetsnormen van BPA en 4-tbp is het daarbij wel van belang dat er meetmethoden beschikbaar en gebruikt worden die accuraat deze concentraties kunnen meten.

Tabel 8 Verwachte maximale concentraties van BPA, 4tbp, BADGE en metalen zink, lood, cadmium en indium in water rondom windturbines op zee vergeleken met concentraties waarbij geen effecten op het milieu verwacht worden (PNEC). Bij een RCR <1 worden er geen effecten op het milieu verwacht.

Stof	Achtergrond-concentratie (µg/l)	PNEC water (µg/l)	Maximum opgeloste concentratie in water (µg/l)	RCR achtergrond	RCR water
BPA	0	3.40E-05	6.27E-04	0.00E+00	1.84E+01
4tbp	0	1.00E-04	1.61E-03	0.00E+00	1.61E+01
BADGE	0	1.00E+00	7.71E-05	0.00E+00	7.71E-05
zink	0.15	3.00E+00	1.51E-01	5.00E-02	5.04E-02
indium	0	4.06E+01	6.08E-06	0.00E+00	1.50E-07
lood	0.02	1.30E+00	2.00E-02	1.54E-02	1.54E-02
cadmium	0.02	2.00E-01	2.00E-02	1.00E-01	1.00E-01

3.2 Risicobeoordeling van emissie van zink, indium, lood en cadmium door gebruik van opofferingsmetalen

Ondanks de hoeveelheid materiaal dat vrijkomt bij het gebruik van opofferingsmetalen, leidt dit gebruik niet of nauwelijks tot verhogingen in verwachte concentraties in water van de metalen zink, lood, en cadmium ten opzichte van de al aanwezige achtergrondconcentratie (tabel 8). De RCR wordt voor deze stoffen daardoor bepaald door de al aanwezige achtergrondconcentratie, en blijft daarnaast voor alle metalen onder de 1. Ook voor indium, een metaal dat niet of nauwelijks van nature aanwezig is, wordt slechts een maximale concentratie verwacht van 5.98E-6 µg/l, ten opzichte van een norm van 40,6 µg/l. In Duitsland zijn recent metingen verricht naar deze metalen rondom windturbines op zee om een inschatting te maken van het effect van het gebruik van opofferingsmetalen bij windturbines op zee (BSH & Hereon, 2022). Ook uit dit onderzoek bleek dat er geen metalen werden aangetroffen in concentraties hoger dan concentraties die van nature verwacht werden. Dit bevestigt de schattingen in het huidige rapport. Omdat voor alle metalen de verwachte concentraties onder de toetsnorm blijven, en het gebruik van opofferingsmetalen niet of nauwelijks invloed lijkt te hebben op de concentraties van deze metalen in het milieu, worden er geen schadelijke (toxicologische) effecten verwacht op het milieu door het gebruik van opofferingsmetalen bij windturbines op zee.

4 Emissie van plastic deeltjes door slijtage van de turbinebladen

Om een bandbreedte van de mogelijke emissie van plastic deeltjes in te schatten is er een schatting gemaakt op basis van informatie in de wetenschappelijke literatuur en informatie opgevraagd bij producenten van windturbines. Met de eigen berekeningen wordt geschat dat de totale emissie van plastic deeltjes van alle turbines op zee op het moment $8,46E+2$ tot $8,98E+3$ kg per jaar kan betreffen. Door de verwachte groei in het aantal windparken op zee kan dit oplopen tot $3,71E+3$ tot $3,80E+4$ kg per jaar in 2030. Per turbine wordt, afhankelijk van het formaat en vermogen van de turbine, een verlies van 0,675 tot 17,5 kg per jaar geschat (tabel 9).

De schattingen van het RIVM liggen hoger dan de getallen genoemd in een factsheet van Norwea (0,150 kg per turbine per jaar; Norwea, 2021). De lagere schatting komt wel overeen met de getallen verkregen van een producent voor bladen zonder leading edge protection (LEP) (Tabel 9; 1,43 kg per turbine per jaar). Uit literatuur blijkt dat factoren zoals formaat van de bladen, ashoogte, vermogen, en locatie uitmaken voor de mate van erosie, waarbij bij grotere turbines met een hoger vermogen meer erosie verwacht wordt (Shankar Verma et al., 2021b). Ook wordt er meer erosie verwacht op zee en aan de kust dan meer landinwaarts (Shankar Verma et al., 2021a). Het is niet bekend hoe representatief de getallen uit de branche daarbij zijn voor de (veelal grotere ten opzichte van land) turbines op zee. Voor een betere inschatting van de daadwerkelijke emissie zou meer informatie beschikbaar moeten zijn, zoals metingen van de daadwerkelijke emissie van plastic deeltjes(in massa en aantal deeltjes) onder verschillende weersomstandigheden of metingen van concentraties (in massa en aantal deeltjes) in het omliggende water en sediment.

In de huidige schattingen is geen rekening gehouden met de mate van gebruik en de effectiviteit van LEP op de turbinebladen. Uit de informatie verkregen van een producent over één vorm van LEP lijkt het erop dat toepassing van de juiste techniek tot sterke vermindering van de emissie van plastic deeltjes kan leiden met een gerapporteerd verlies per turbine van 3,12 gram per jaar. Als dit voor alle turbines op zee in 2023 het geval zou zijn zou de emissie van plastic deeltjes 2,09 kg per jaar betreffen. Het zou bevorderlijk zijn om meer inzicht in de effectiviteit en het gebruik van technieken om erosie te beperken te verkrijgen, en het gebruik van effectieve methoden zo veel mogelijk te stimuleren.

De totale emissie van microplastics naar de Noordzee vanuit Europese rivieren wordt geschat op 1,1 miljoen kg (Siegfried et al., 2017). Uitgaande van de hoge schatting van het RIVM zou de bijdrage hieraan van Nederlandse windturbines op zee 0,82% in 2023 tot 3,46% in 2030 kunnen zijn. Meegenomen dat Nederland niet het enige land is met (plannen voor) windturbines op de Noordzee, is deze hoeveelheid niet bij voorbaat verwaarloosbaar. Windturbines zijn niet de enige bron van

microplastics naar de zee door slijtage van coatings: dit is bijvoorbeeld ook het geval voor de scheepvaart (Faber et al., 2021; MEPC, 2021). De hoeveelheid microplastics dat door slijtage en onderhoud van coatings binnen de Nederlandse scheepvaart in de zee terecht komt wordt geschat op $2,00E+5$ kg (Verschoor et al., 2016). Dit is 20 (schatting 2023) tot 5 (schatting 2030) keer hoger dan de maximale schatting voor windturbines door slijtage van de bladen. Hier moet wel bij vermeld worden dat ook sprake kan zijn van slijtage van coatings op andere onderdelen van de turbine. Dit is in de huidige schatting niet meegenomen.

Vanwege de nog grote onzekerheid in de hoeveelheid in kg en deeltjesgrootte van de geëmitteerde plastic deeltjes, maar ook in wetenschappelijke consensus over de concentraties waarbij risico's verwacht worden, is het nog niet mogelijk een uitspraak te doen over de risico's van de emissie van plastic deeltjes door slijtage van turbinebladen. Gezien de plannen voor viskweek of -vangst bij windparken op zee is het ook van belang om beter inzicht te krijgen of en in welke mate plastic deeltjes in organismen bedoeld voor consumptie terecht komen.

Tabel 9 Mogelijke emissies van (micro)plastics door slijtage van de leading edge van windturbinebladen.

bron	verlies per turbine (kg/jaar)	aantal turbines 2023	aantal turbines 2030	totale emissie turbines op zee 2023 (kg/jaar)	totale emissie turbines op zee 2030 (kg/jaar)
schatting RIVM (hoog)	7,20 tot 17,5	671	2.371	$8,98E+3$	$3,80E+4$
schatting RIVM (laag)	0,675 tot 1,69	671	2.371	$8,46E+2$	$3,71E+3$
Norwea	0,150	671	2.371	$1,01E+2$	$5,56E+2$
producent, zonder LEP	1,43	671	2.371	$9,60E+2$	$3,39E+3$
producent, met LEP	$3,12E-3$	671	2.371	2,09	7,40

5 Conclusies en aanbevelingen

Dit onderzoek is uitgevoerd als vervolg op de eerder uitgevoerde quickscan naar gebruik en mogelijke emissies van gevaarlijke stoffen bij windturbines op zee (RIVM, 2022). In het huidige onderzoek is op basis van modelberekeningen een (eco)toxicologische risicobeoordeling uitgevoerd voor de emissie van stoffen uit epoxy coatings en opofferingsmetalen bij windturbines op zee. Dit zijn twee technieken die toegepast kunnen worden ter bescherming van de monopile tegen corrosie. Daarnaast is er een inschatting gemaakt van de emissie van plastic deeltjes door slijtage van de turbinebladen.

5.1 Conclusie risico's door uitloging van BPA, 4-tbp en BADGE uit epoxy coatings

Voor de risicobeoordeling van de stoffen BPA, 4-tbp en BADGE was geen specifieke informatie beschikbaar over de uitloging van deze stoffen voor coatings gebruikt bij windturbines op zee. Zowel vanuit SodM als RIVM is via Nederlandse WindEnergie Associatie (NWEA) getracht de samenstelling en informatie over de uitloging van stoffen van gebruikte coatings te achterhalen. Helaas heeft dit niet tot de gevraagde informatie geleid. Voor de risicobeoordeling is daarom gebruikt gemaakt van worst-case data over uitloging van deze stoffen uit epoxy coatings op staal uit de wetenschappelijke literatuur: de hoogste uitloging van BPA was bijvoorbeeld 280 keer hoger dan het eerstvolgende getal en er werden ook coatings zonder meetbare uitloging van BPA gerapporteerd. Hieruit blijkt dat uitloging van BPA en 4-tbp uit epoxy coatings op monopiles van windturbines op zee kan leiden tot concentraties in het water waarbij respectievelijk risico's voor mens, via consumptie van vis (RCR van 18,4), of milieu niet kunnen worden uitgesloten (RCR van 16,1). Voor BPA betreft dit risico's voor de mens via consumptie van vis, mosselen of oesters, en voor 4-tbp risico's voor organismen in het milieu. Dit was het geval voor minstens 5% van de oppervlakte van het gebied van het windpark in het model. Voor BADGE worden geen risico's verwacht op basis van de huidige berekeningen (RCR van 7,71E-5).

Zoals eerder benoemd zijn de huidige berekeningen gebaseerd op worst-case aannames voor de uitloging van stoffen uit de coatings. Omdat er op zee sprake is van een grote maat van verdunning, door de grote hoeveelheid (stromend) water waar de stoffen in terecht komen, was het aannemelijk dat zelfs bij de worst-case aannames er geen sprake van een risico voor mens of milieu zou zijn. Op basis van de huidige berekeningen is dit niet het geval, waarbij de resultaten voornamelijk geïnterpreteerd moeten worden als een indicatie dat risico's voor mens of milieu door uitloging van gevaarlijke stoffen uit coatings op windturbines niet bij voorbaat uit te sluiten zijn. Omdat niet bekend is in welke mate er gebruik wordt gemaakt van epoxy coatings bij Nederlandse windparken op zee, de mate van uitloging van stoffen sterk per coating kan verschillen, en data over uitloging van stoffen uit coatings gebruikt bij wind op zee vooralsnog niet beschikbaar is, is het nog onduidelijk of de berekende risico's in de praktijk ook daadwerkelijk optreden.

5.2 **Conclusie risico's door emissies van zink, indium, lood en cadmium bij gebruik van opofferingsmetalen**

Voor de risicobeoordeling van opofferingsmetalen is gekeken naar de metalen zink, indium, lood en cadmium. Deze stoffen zitten in sporen in het gebruikte materiaal en kunnen vrijkomen tijdens het gebruik. Er worden geen risico's verwacht voor mens of milieu door het gebruik van opofferingsmetalen bij windturbines op zee. De verwachte maximale concentraties van zink, indium, lood en cadmium in water liggen onder de concentratie waarbij deze stoffen veilig geacht worden (RCR van respectievelijk $5,04E-02$, $1,50E-07$, $1,54E-02$ en $1,00E-01$). Ook veranderen de verwachte concentraties niet of nauwelijks ten opzichte van de achtergrondconcentraties door het gebruik van opofferingsmetalen. Deze uitkomsten komen overeen met metingen verricht rondom windparken op zee in Duitsland, waarbij ook geen verhoging in de concentraties van deze metalen werd gevonden bij windparken op zee.

5.3 **Conclusie emissie van plastic deeltjes door slijtage van de turbinebladen**

Op basis van schattingen van de emissie van plastic deeltjes door slijtage van de turbinebladen wordt verwacht dat dit in 2030 7,40 kg tot 38.000 kg per jaar voor alle Nederlandse turbines op de Noordzee kan betreffen. Het is lastig om de emissie van plastic deeltjes te koppelen aan milieueffecten. Hiervoor mist zowel informatie om de blootstelling goed in te schatten, zoals de deeltjesgrootte van de plastic deeltjes en de verspreiding in het milieu, maar ook wetenschappelijke consensus over concentraties waarbij effecten verwacht worden.

De geschatte hoeveelheid plastic die in de zee terecht komt door slijtage van turbinebladen van de Nederlandse turbines op zee is $<0,001\%$ tot $3,46\%$ van de geschatte emissie van microplastics uit alle Europese rivieren naar de Noordzee. Ook de Nederlandse scheepvaart maakt gebruik van beschermende coatings waarbij door slijtage plastic deeltjes in het milieu terecht komen. Dit wordt geschat op 200.000 kg per jaar: grofweg 5 keer meer dan de worst-case schatting voor windturbines in 2030. De werkelijke hoeveelheid plastic deeltjes die door slijtage van de bladen in de Noordzee terecht komt is zeer onzeker. Dit hangt onder andere af van de mate van gebruik van methoden en materialen om de erosie tegen te gaan, en ook de effectiviteit daarvan.

5.4 **Aanbevelingen**

De bevindingen in dit rapport leiden tot de volgende aanbevelingen om risico's voor mens en milieu uit te sluiten bij windturbines op zee:

Aanbevelingen om in de praktijk risico's van coatings uit te sluiten of verminderen

In dit rapport is geconcludeerd dat mogelijke risico's voor mens en milieu door de uitloging van gevaarlijke stoffen uit epoxy coatings niet uit te sluiten zijn. Hoewel dit rapport zich beperkte tot coatings op basis van epoxy, zijn de volgende aanbevelingen in principe van toepassing op elk type coating.

Coatings op de monopile van windturbines worden voor installatie voor de gehele levensduur van een turbine aangebracht. Het is aanbevolen om bij nieuwe windparken waar mogelijk coatings te gebruiken die geen of zo min mogelijk gevaarlijke stoffen bevatten. Als het gebruik van gevaarlijke stoffen noodzakelijk is, is het goed om coatings te gebruiken waar deze stoffen zo min mogelijk uit vrijkomen. Uit de literatuur blijkt dat de mate van uitloging sterk per product kan verschillen.

Voor bestaande windparken is de aanbeveling om in kaart te brengen welke coatings er gebruikt zijn. Op basis hiervan kan per windpark besloten worden of een realistischere inschatting van de risico's gewenst is. Met name bij windparken waar plannen zijn voor meervoudig gebruik is dit gewenst. Dat wil zeggen windparken waarbij plannen zijn voor natuurontwikkeling, visserij of aquacultuur bij en rondom het windpark. Voor natuurontwikkeling lijkt de uitloging van 4-tbp uit epoxy coatings een mogelijk risico te zijn. Bij aquacultuur of visserij rondom bij windparken zouden er risico's voor de menselijke gezondheid kunnen zijn door uitloging van BPA uit epoxy coatings. BPA kan vervolgens in producten bedoeld voor humane consumptie terecht komen, zoals vissen of mosselen.

Voor een realistischere inschatting van de risico's door uitloging van stoffen uit coatings moet bekend zijn welke coatings er daadwerkelijk gebruikt worden, welke stoffen er uit deze coatings kunnen logen en in welke mate deze stoffen uitlogen (massa per oppervlakte per tijdseenheid). Ook het uitvoeren van bioassays met uitlogingsvloeistof van gebruikte coatings zou bij kunnen dragen aan beter inzicht in de te verwachten effecten op het milieu. Omdat coatings aangebracht worden voor de gehele levensduur van een turbine (25 jaar), is het belangrijk om bij het toetsen van de mate van uitloging van coatings ook verschillen in de tijd en mate van verwerking mee te nemen. Op basis van deze informatie kan per windpark een realistischere (dan de worst-case benadering in het huidige rapport) inschatting van de risico's berekend worden. Omdat er grote verschillen zijn in de uitloging van stoffen uit coatings, waarbij bijvoorbeeld bij sommige epoxy coatings helemaal geen uitloging van BPA gemeten is, is het goed mogelijk dat op basis van deze realistische inschattingen er geen risico's voor mens en milieu verwacht worden. Als dit niet het geval is zouden er vervolgens metingen verricht kunnen worden naar schadelijke stoffen in het water bij windparken of in organismen bestemd voor humane consumptie. Om mogelijke risico's uit te kunnen sluiten is het daarom belangrijk om snel inzicht te verkrijgen in de daadwerkelijk toegepaste coatings bij windturbines op zee.

Opofferingsmetalen

Er worden geen toxicologisch risico's verwacht door het gebruik van aluminium opofferingsmetalen bij windturbines op zee. Vanuit toxicologisch perspectief volgen hierom geen aanbevelingen om het verbruik hiervan te verminderen. Dit neemt niet weg dat gezien het grote materiaalverbruik het alternatief van "impressed current cathodic protection" vanuit duurzaamheids-perspectief voordeliger kan zijn dan het gebruik van opofferingsmetalen.

Slijtage van de turbinebladen

In dit rapport wordt er geconcludeerd dat er sprake is van slijtage van de turbinebladen en dat daardoor plastic deeltjes in het milieu terecht komen. De daadwerkelijke hoeveelheid plastic deeltjes is zeer onzeker en hangt onder andere af van de mate van slijtage-verminderende technieken dat wordt toegepast. De aanbeveling is om inzicht te krijgen in het gebruik van slijtage-verminderende technieken en materialen op turbinebladen bij Nederlandse windparken op zee, in relatie tot de daadwerkelijke emissies van plastic deeltjes door slijtage van turbinebladen. Denk hierbij aan de deeltjesgrootte van vrijkomende plastic deeltjes en de totale massa en aantal deeltjes dat vrijkomt over een bepaalde tijdsperiode. Daarnaast zouden metingen van plastic deeltjes in water en sediment bij windparken op zee bij kunnen dragen aan beter inzicht in de slijtage van turbinebladen. Microplastics zijn persistent in het milieu, en het is wenselijk om emissie hiervan zo veel mogelijk te voorkomen of tot een minimum te beperken.

6 Literatuur

- Bae, B., Jeong, J., & Lee, S. (2002). The quantification and characterization of endocrine disruptor bisphenol-A leaching from epoxy resin. *Water Science and Technology*, 46(11-12), 381-387.
- Bell, A. M., Baier, R., Kocher, B., Reifferscheid, G., Buchinger, S., & Ternes, T. (2020). Ecotoxicological characterization of emissions from steel coatings in contact with water. *Water research*, 173, 115525.
- Bell, A. M., Keltsch, N., Schweyen, P., Reifferscheid, G., Ternes, T., & Buchinger, S. (2021). UV aged epoxy coatings–Ecotoxicological effects and released compounds. *Water Research X*, 12, 100105.
- Bruchet, A., Elyasmino, N., Decottignies, V., & Noyon, N. (2014). Leaching of bisphenol A and F from new and old epoxy coatings: Laboratory and field studies. *Water Science and Technology: Water Supply*, 14(3), 383-389.
- BSH, & Hereon. (2022). *Chemical Emissions from Offshore Wind Farms - Summary of the Project OffChEm*.
- Cantoni, B., Riguzzi, A. C., Turolla, A., & Antonelli, M. (2021). Bisphenol A leaching from epoxy resins in the drinking water distribution networks as human health risk determinant. *Science of The Total Environment*, 783, 146908.
- Faber, M., Marinković, M., de Valk, E., & Waaijers-van der Loop, S. (2021). Paints and microplastics. Exploring the possibilities to reduce the use and release of microplastics from paints. Feedback from the paint sector.
- Kirchgeorg, T., Weinberg, I., Hörnig, M., Baier, R., Schmid, M., & Brockmeyer, B. (2018). Emissions from corrosion protection systems of offshore wind farms: Evaluation of the potential impact on the marine environment. *Marine pollution bulletin*, 136, 257-268.
- MEPC, M. E. P. C. (2021). *FOLLOW-UP WORK EMANATING FROM THE ACTION PLAN TO ADDRESS MARINE PLASTIC LITTER FROM SHIPS* (Microplastics from anti-fouling paints – an overlooked source of marine plastic litter, Issue. <https://seas-at-risk.org/wp-content/uploads/2021/11/MEPC-77-8-1-Microplastics-from-anti-fouling-paints-an-overlooked-source-of-marine-plastic-litter-FOEI-Greenpeace-Internat....pdf>
- Momber, A. W., & Marquardt, T. (2018). Protective coatings for offshore wind energy devices (OWEAs): a review. *Journal of Coatings Technology and Research*, 15(1), 13-40.
- Norwea. (2021). *FAKTAARK: VINDKRAFT, PLAST OG BISFENOL A*. Retrieved 30-11-2022 from <https://norwea.no/norwea-mener/2021/3/26/faktaark-vindkraft-plast-og-bisfenol-a>
- 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*, 257, 127182.
- RIVM. (2022). *Inzicht in emissies van chemische stoffen bij windturbines op zee*. https://www.rivm.nl/sites/default/files/2022-06/Chemische_stoffen_bij_windturbines_op_zee_TG.pdf

- RVO. *Plannen windenergie op zee 2030-2050*. Retrieved 21-03-2023 from <https://www.rvo.nl/onderwerpen/windenergie-op-zee/plannen-windenergie-op-zee>
- Shankar Verma, A., Jiang, Z., Ren, Z., Caboni, M., Verhoef, H., van der Mijle-Meijer, H., Castro, S. G., & Teuwen, J. J. (2021a). A probabilistic long-term framework for site-specific erosion analysis of wind turbine blades: A case study of 31 Dutch sites. *Wind Energy*, *24*(11), 1315-1336.
- Shankar Verma, A., Noi, S. D., Ren, Z., Jiang, Z., & Teuwen, J. J. E. (2021b). Minimum Leading Edge Protection Application Length to Combat Rain-Induced Erosion of Wind Turbine Blades. *Energies*, *14*(6), 1629.
- Siegfried, M., Koelmans, A. A., Besseling, E., & Kroeze, C. (2017). Export of microplastics from land to sea. A modelling approach. *Water research*, *127*, 249-257.
- Vermeirssen, E. L., Dietschweiler, C., Werner, I., & Burkhardt, M. (2017). Corrosion protection products as a source of bisphenol A and toxicity to the aquatic environment. *Water research*, *123*, 586-593.
- Verschoor, A., De Poorter, L., Dröge, R., Kuenen, J., & de Valk, E. (2016). Emission of microplastics and potential mitigation measures: Abrasive cleaning agents, paints and tyre wear.

7 Bijlagen

7.1 Informatievraag producenten (Engels)

In order to gain insight in emissions of (and subsequent potential environmental risks) of substances used in wind turbines in the Netherlands we are looking for the information listed below. We are focusing on emissions during the use-phase of the turbines, so not during production, installation, etc. We are looking for information on multiple types of turbine and are interested in both onshore and offshore turbines (as complete as possible). If this is not feasible, we would like the information for the most commonly used coatings for both land and sea. Furthermore we are interested in any differences in used material, maintenance, or emissions of substances:

- Between turbines on land and offshore
- Between generations (old vs new turbines)
- Between different sizes of turbines
- Between locations (e.g., leading edge erosion near coast or more inland)

We would also like to acknowledge that it might not be possible for every question to be answered in the level of detail requested, but any information that can be given will be very helpful. Preferably we would like to receive the information in digital form (e.g., excel sheet of product composition), and in level of detail according to the following hierarchy:

- Composition of used product
- Presence of substances of very high concern ([SVHC](#)) and their concentrations
- Safety data sheets
- Name of product

List of requested information

Material composition information on coatings of wind turbine blades

- What coatings are used?
- What is the layering of the coatings/in what order are the coatings applied on the blade?
- What is their material composition?
- Are any substances used that are listed on the ECHA candidate list of substances of very high concern (SVHC)
- If so, in what amounts?
- Are PFAS/fluoropolymers used in wind turbine blades? Where and in what amounts?

Leading Edge Erosion

We are interested in how much material is emitted due to leading edge erosion. So we are looking on information on the amount of weight over time, and which layers or substances erode/are emitted. Data on mass loss of wind turbine blades or data on how much new material is applied during maintenance could be of use for this.

- How much material (weight) is lost over time? Which layers are affected? (ideally weight loss per layer/time unit)
- Alternatively, information of thickness and density of the layers in addition to loss of volume can give an indication of mass loss.
- How often is maintenance performed and are coatings reapplied?
- How much material is reapplied during maintenance?

Material composition coatings mast and (for offshore turbines) monopile

- What coatings are used?
- What is the layering of the coatings/in what order are the coatings applied?
- What is their material composition?
- Are any substances used that are listed on the ECHA candidate list of substances of very high concern (SVHC)
- If so, in what amount are they in the final product?

Insight in emission rates

- Are there any available leaching rates for substances of very high concern out of the outer applied coatings (especially monopile coatings which are continuously exposed to seawater)?
Leaching data preferable in weight per surface area per time
- Data on material loss of coatings (weight loss/m² over time)
- Frequency of maintenance of masts
- How much product is reapplied during maintenance?

Internals

Hydraulic oil

- Does leakage of hydraulic oil occur? If so, in what amounts and how quickly?
- Are any substances used that are listed on the ECHA candidate list of substances of very high concern (SVHC)
- in what amounts are they in the final product?

Electronic systems (e.g., transformers and distribution (sub)stations, cooling equipment)

- How often are (parts of) electronic systems replaced? What SVHCs are present in those parts and in what amounts?
- What kind of wear and tear are electronic systems exposed to? What are expected emissions for these parts?
- What substances/formulations (mainly focused on SVHC-containing formulations) are used in maintenance activities of electronic systems?
- in what amounts are they in the final product?
- For cooling systems specifically: what coolants are used and is information available on leakage over time? Do coolants contain SF₆ or other F-gases?

Use of galvanic anode cathodic protection for offshore turbines

- Is galvanic anode cathodic protection still being used? Where?
- What and how much metal is used?
- What is the expected loss of material per year?

7.2 Overige bijlagen

Tabel S1 Invoerwaarden voor de omgevingsscenario's in het model MAMPEC.

Beschrijving (engels)	waarde	Eenheid
Tidal period	0	uur
Flow velocity	1	m/s
SPM concentration	5	mg/l
POC concentration	0,3	mg/l
DOC concentration	0,2	mg/l
Chlorophyll	3	µg/l
Salinity	34	psu
Temperature	15	°C
pH	8	-
Length	20.000	m
Width	10.000	m
Depth	40	40
Latitude	50	° (dec) NH
Cloud coverage	5	class [0-10]
Depth mixed sediment layer	0,1	m
Sediment density	1000	kg/m ³
Degr. Organic carbon in sediment	0	1/d
Nett sedimentation velocity	0,2	m/d
Fraction organic carbon in sediment	1,83E-2	-
Aantal turbines	200	-
Oppervlakte monopile turbines	1700	m ²
Aantal substation	1	-
Oppervlakte substation	12000	m ²

Tabel S2 Stoffeigenschaften van organische stoffen gebruikt bij de modelering in MAMPEC.

Stof	CAS-nummer	Molgewicht (g/mol)	Dampdruk bij 20 °C (Pa)	Oplosbaarheid in water (g/m ³ bij 20 °C)	Hydrolyse/ abiotische degradatie (halfwaarde in dagen)	Photolyse (halfwaarde in dagen)	Biodegradatie (halfwaarde in dagen)	Octanol-water partitie coëfficiënt (Log Kow)	Organische koolstof-water partitie coëfficiënt (Log Koc)	Smeltpunt (°C)	Henry-constante	Zuur-constante (pKa)
BPA	80-05-7	228	0	300	-	In water: 0,50 In sediment: -	In water: 2,60 In sediment: 14,5	3,40	2,88	155	3,12E-7	11,3
4-tbp	98-54-4	150	0,50	607	-	-	In water: 4,95 In sediment: 4,95	3,00	2,47 ^a	99,2	1,24 ^a	10,25
BADGE	1675-54-3	340	0	6,90	In water: 4,88 In sediment: -	-	-	3,24	2,65	30	0 ^a	14 ^a

a. Schatting bij gebrek aan data

Tabel S3 Gebruikte waarden voor stofeigenschappen van metalen gebruikt voor kathodische bescherming.

Stof	CAS-nummer	Molgewicht (g/mol)	Dampdruk bij 20 °C (Pa)	Oplosbaarheid in water bij 20 °C (g/m ³)	Sediment-water partitie coëfficiënt: Kd (m ³ /kg)	Natuurlijke achtergrond (µg/l)
Zink	7440-66-6	65,4	0	0,100	3,49E-3	0,15
Indium	7440-74-6	115	0	1,00E-3	5,10E-3	0,00
Lood	7439-92-1	207	0	185	4,57E+2	0,02
Cadmium	7440-43-9	112	0	2,30	6,17E-1	0,02

Tabel S4 Verdeling van geschatte concentraties van vrij opgeloste stoffen in water. MAMPEC verdeelt een gemodelleerd gebied in "grids". Per grid wordt er een verwachte concentratie berekend. De verdeling geeft de spreiding van verwachte concentraties in het gemodelleerde gebied aan.

	BPA	4-tbp	BADGE	Zink	Indium	Lood	Cadmium
Maximum concentratie (µg/l)	6.27E-04	1.61E-03	7.71E-05	1.51E-01	6.08E-06	2.00E-02	2.00E-02
95% concentratie (µg/l)	5.22E-04	1.30E-03	6.21E-05	1.51E-01	4.89E-06	2.00E-02	2.00E-02
Gemiddelde concentratie (µg/l)	7.00E-05	1.71E-04	8.16E-06	1.50E-01	6.41E-07	2.00E-02	2.00E-02
Mediaan concentratie (µg/l)	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	1.50E-01	0	2.00E-02	2.00E-02
Minimum concentratie (µg/l)	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	1.50E-01	0	2.00E-02	2.00E-02

Dit is een uitgave van:

**Rijksinstituut voor Volksgezondheid
en Milieu**

Postbus 1 | 3720 BA Bilthoven

Nederland

www.rivm.nl

juni 2023

De zorg voor morgen
begint vandaag