



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

Inzicht in emissies van *chemische stoffen* bij *windturbines op zee*

Resultaten quickscan



Inhoud

1. Aanleiding en doel van het onderzoek	3
2. Aanpak en stappen quickscan	3
3. Scope van de quickscan	4
4. Inventarisatie	5
5. Verdieping en analyse	10
6. Resultaten en aandachtspunten	12
7. Conclusie	13
8. Aanbevelingen vervolgonderzoek	13

1. Aanleiding en doel van onderzoek

Windenergie is een alternatief voor energie die wordt opgewekt uit fossiele brandstoffen. Daarmee is het een middel om uitstoot van koolstofdioxide te verminderen en de klimaatdoelstellingen te behalen.

De routekaart 'windenergie op zee 2030' voorziet een toename van wind op zee tot een totale capaciteit opgewekte windenergie op zee van 11,5 GW. Op dit moment staan er 773 turbines op zee, met 10 substations. Er wordt voor de nabije toekomst meer dan een verdubbeling voorzien. Recent heeft het kabinet nog drie nieuwe gebieden aangewezen voor windparken op zee. Daarmee is de totale geplande capaciteit verhoogd tot 21 GW.

Staatstoezicht op de Mijnen (SodM) heeft het RIVM gevraagd om inzicht te geven in de mogelijke impact van (de milieu-emissies van) de stoffen die in de levenscyclus van windturbines op zee gebruikt worden.

Hiervoor heeft het RIVM een quickscan uitgevoerd, waarbij het doel was om inzicht te geven in te volgende vragen:

- Is het mogelijk dat er stoffen vrijkomen bij winning van windenergie op zee?
- Wat is daarbij het mogelijke risico?
- Welke (preventieve) maatregelen zijn mogelijk?

2. Aanpak van het onderzoek

Er is een quickscan uitgevoerd om inzicht te krijgen op de kans op emissies van stoffen bij windturbines op zee. Dit is gedaan door middel van literatuuronderzoek, bestaande uit life cycle assessments (LCA) en interviews met experts.

3. Expert judgement: in welke levensfase is er het meeste risico op emissies.
4. Conclusie en aanbevelingen: Is er vervolgonderzoek nodig? Zo ja, waarnaar en wat voor onderzoek moet dit zijn?

De vier stappen van de quickscan

Voor het uitvoeren van de quickscan zijn de volgende stappen doorlopen:

1. Inventarisatie: van het type windturbines, levensloop, materiaalgebruik in relatie tot aanwezigheid van stoffen.
2. Analyse: van het gebruik van (zorgwekkende) stoffen in relatie tot gevaareigenschappen en potentiële blootstelling.

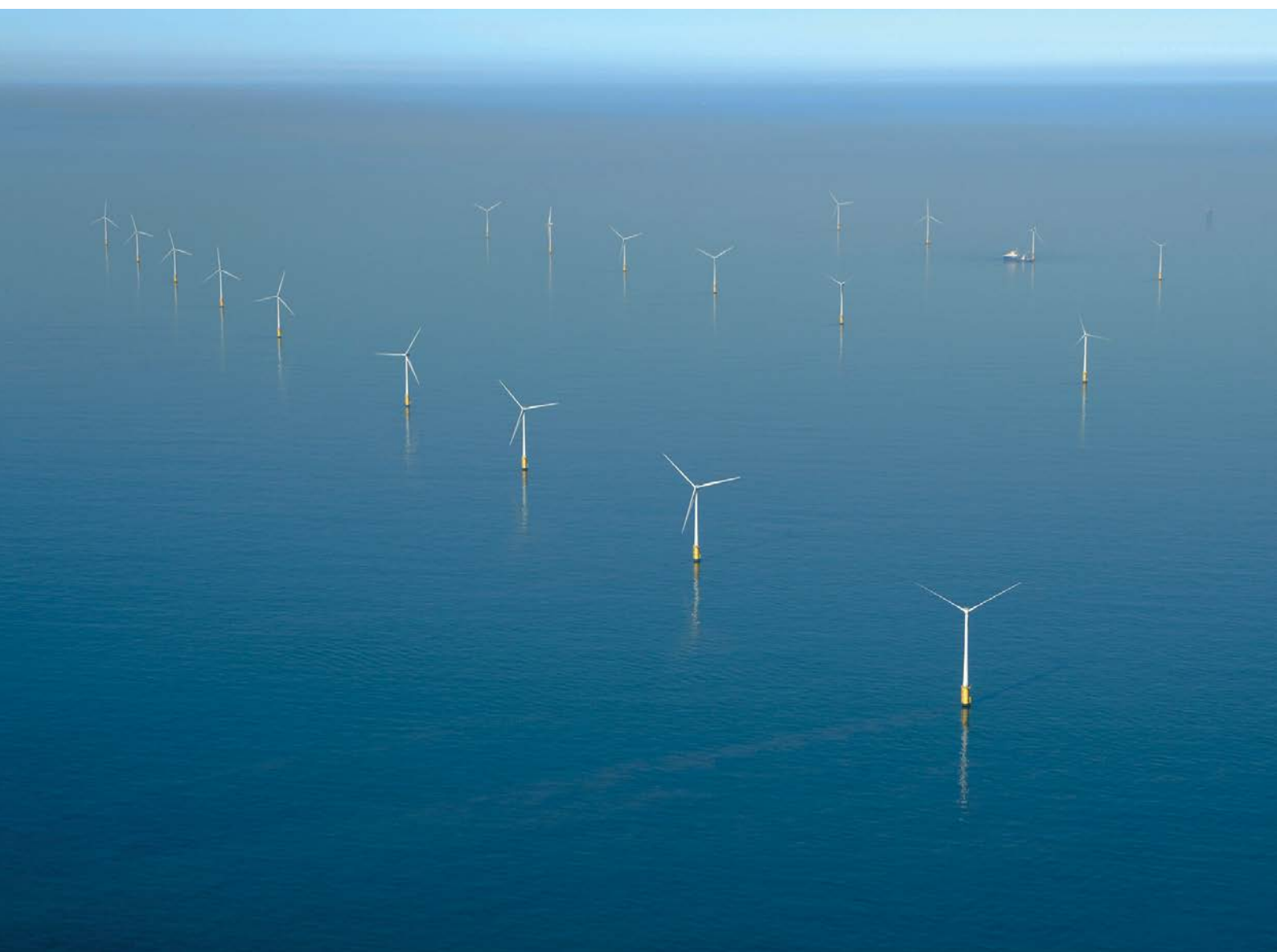
3. Scope van de quickscan

In deze quickscan is gekeken naar mogelijke emissies tijdens meerdere delen van de levenscyclus van wind op zee. Met name de installatie van het windpark, de gebruiksfase of operationele fase, en de buitengebruikstelling van windturbines. Denk hierbij aan mogelijke recycling, storten of verbranden van afval van windparken.

Binnen een windpark zijn niet alleen de windturbines, maar ook de bijbehorende substations of transformatoren onderzocht. Elk windpark heeft een transformator waar de energie van alle windturbines samenkomt en vanaf daar wordt getransporteerd naar land.

Binnen de quickscan lag de focus op mogelijke emissies van chemische stoffen naar het milieu, bijvoorbeeld stoffen uit coatings. Broeikasgassen zijn hierbij niet meegenomen, met uitzondering van SF₆. Dit is een broeikasgas wat wordt gebruikt als isolator bij midden- en hoogspanningstoepassingen.

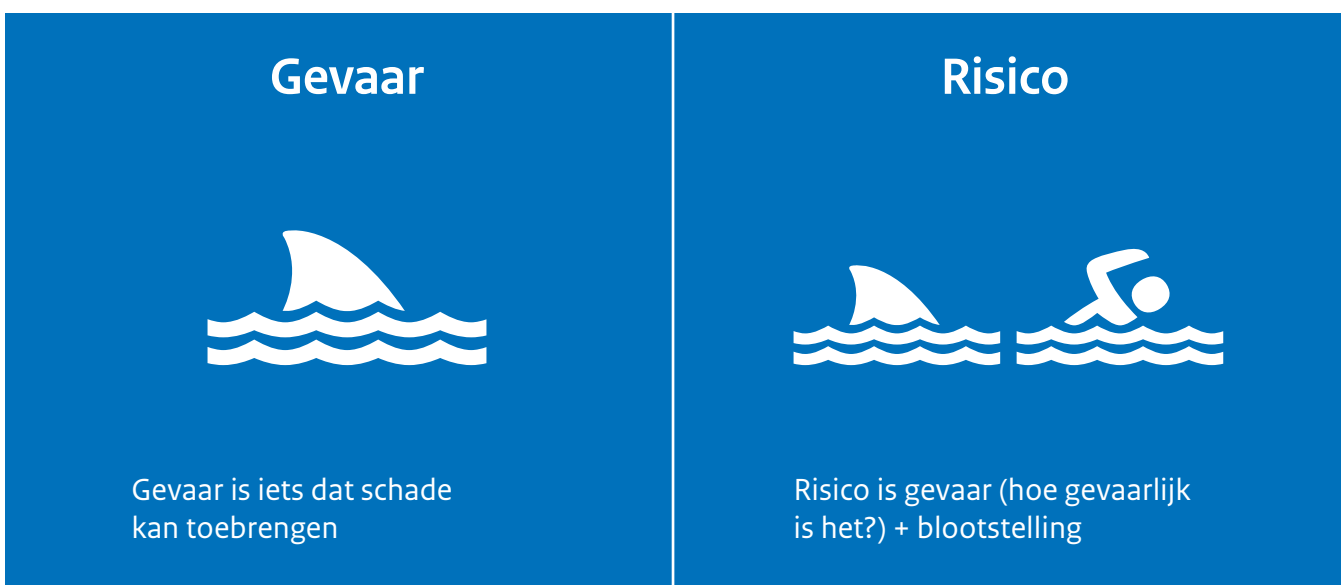
Uitgangspunt van de quickscan is normaal gebruik, dat wil zeggen dat er niet is gekeken naar mogelijke emissies bij calamiteiten.



Risicobeoordeling

Risico's voor mens en milieu worden bepaald door de combinatie van gevaar (in dit geval gevaareigenschappen van een chemische stof) en de blootstelling daaraan. Een klassiek voorbeeld is dat er een gevaar is als er bij het strand een haai in de zee zwemt. Het is echter pas een risico als je ook daadwerkelijk in de zee gaat zwemmen. Op dat moment ben je blootgesteld aan de haai. Ook de mate van blootstelling maakt uit voor het risico op nadelige effecten.

In deze quickscan is alleen gekeken naar mogelijke emissies van (gevaarlijke) stoffen bij wind op zee. Vervolgens is een eerste inschatting van de bijhorende risico's gemaakt. Om de daadwerkelijke risico's te bepalen, moet er een risico-beoordeling uitgevoerd worden. Hierbij worden voorspelde concentraties in het milieu bepaald (de mate van blootstelling), om die vervolgens te vergelijken met concentraties waarbij mens of milieu nadelige effecten ondervinden (het gevaar).



Figuur 1. Gevaar, risico en blootstelling

4. Inventarisatie

Levensloop

De levensloop van windturbines bestaat uit 4 stappen:

1. Opbouw op zee
2. Gebruik en onderhoud
3. Ontmanteling
4. Recycling en afvalfase

Gebruikte materialen en LCA-inzichten

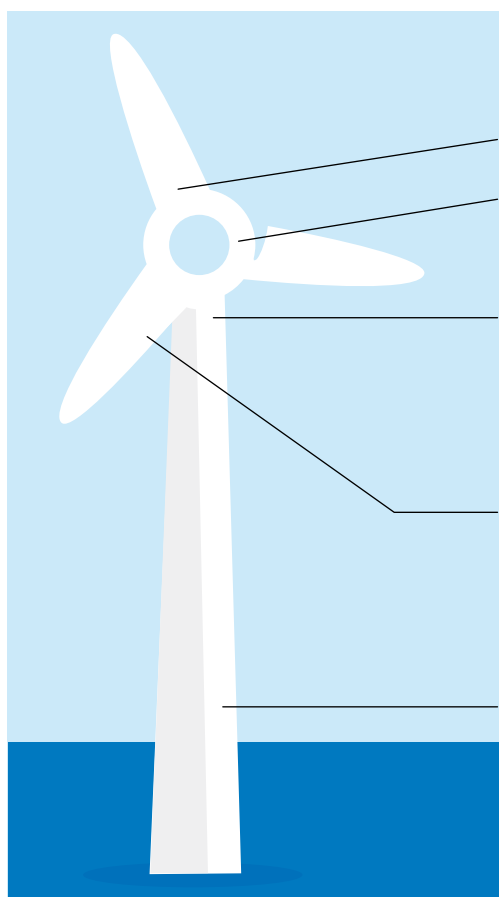
Life Cycle Assessments (LCA) zijn studies die de gehele levenscyclus van producten in kaart trachten te brengen.

Deze geven goed inzicht in gebruikte materialen voor turbines (tabel 1).

Toxiciteit wordt vaak meegenomen in LCA's: dan gaat het met name om emissies bij productie van materialen, energie en transport. Emissies van de turbine onderdelen zelf tijdens gebruik of hergebruik komen niet terug in LCA's.

Op basis van informatie over recycling en afvalverwerking van wind op land is er enig inzicht in deze levensfase. Er is echter maar weinig informatie die specifiek gericht is op wind op zee.

Tabel 1. Overzicht van onderdelen turbine, voornaamste materialen en wat er mee gebeurt aan het einde van de levensloop van het product.



Onderdeel turbine	Voornaamste materialen	Omgang bij einde levensloop
Hub/middelpunt	IJzer	Gerecycled
Overkapping	Glasvezel, epoxy of staal	Gerecycled, verbrand of gestort
Gondel (bevat o.a. generator en tandwielkast)	Staal, permanente magneten, elektronische printplaat, batterijen	Gerecycled (als vuller), verbrand of gestort
Platformen en ladders	Aluminium	Gerecycled
Bladen	Glasvezel, epoxy, hout	Gerecycled (als vuller), verbrand of gestort
Kabels en stroomrails	Plastic, koper, aluminium	Gerecycled
Mast/toren	Staal	Gerecycled
Overige	Smeermiddelen, verf, rubber, plastic	Gerecycled, verbrand of gestort

End-of-life

Hieronder zijn de belangrijkste LCA-inzichten weergegeven.

- Het is aannemelijk dat metaalcomponenten van monomaterialen (delen die uit één materiaal bestaan), bijvoorbeeld de toren, voor 98% worden gerecycled.
- Voor andere onderdelen, zoals de generator, tandwielkast en kabels is het aannemelijk dat deze voor 95% gerecycled worden.

- Windbladen zijn slecht tot niet recyclebaar. Deze worden gestort.
- Naar schatting wordt 95% van SF₆ teruggewonnen bij einde levensduur (BRON: Garret and Klaus, 2015)).

Voor de mate van recycling van andere onderdelen die hierboven niet eerder genoemd zijn, is een overzicht gemaakt in tabel 2.

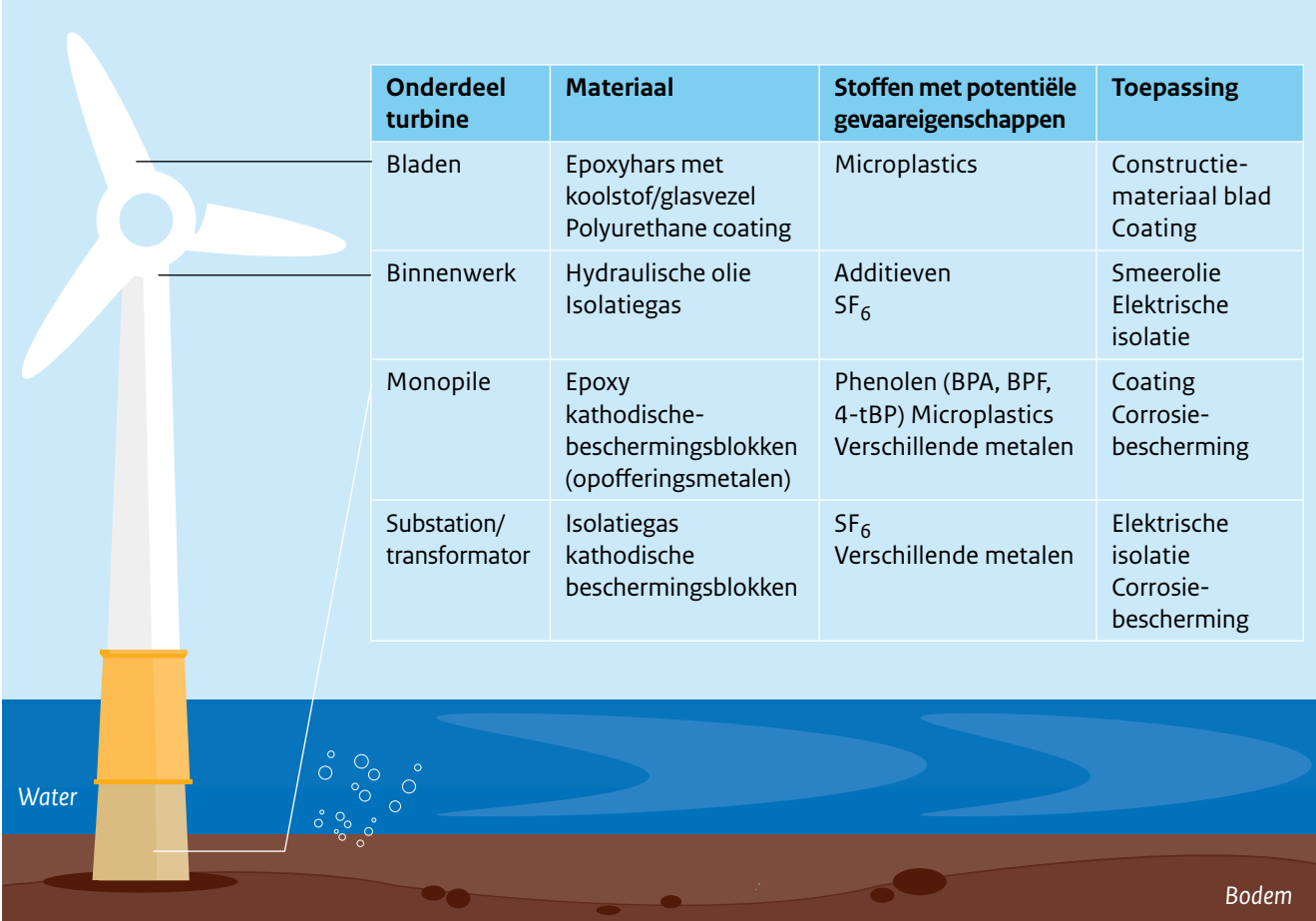
Tabel 2. Omgang bij einde levensloop van materialen in windturbines (Garret and Klaus, 2015)

Materiaal	Omgang
Staal	92% gerecycled, 8% gestort
Aluminium	92% gerecycled, 8% gestort
Koper	92% gerecycled, 8% gestort
Polymeren	50% verbrand, 50% gestort
Smeermiddelen	100% verbrand
Overige materialen	100% gestort

Materiaal en toepassing van de stoffen

In onderstaande tabel is weergegeven welke materialen en stoffen er in de onderdelen van de turbine zitten. Daarbij zijn ook de potentiële gevaareigenschappen benoemd.

Tabel 3. Materiaal en bijbehorende stoffen met potentiële gevaareigenschappen



Onderdeel turbine	Materiaal	Stoffen met potentiële gevaareigenschappen	Toepassing
Bladen	Epoxyhars met koolstof/glasvezel Polyurethane coating	Microplastics	Constructie-materiaal blad Coating
Binnenwerk	Hydraulische olie Isolatiegas	Additieven SF ₆	Smeerolie Elektrische isolatie
Monopile	Epoxy kathodische-beschermingsblokken (opofferingsmetalen)	Phenolen (BPA, BPF, 4-tBP) Microplastics Verschillende metalen	Coating Corrosie-bescherming
Substation/transformator	Isolatiegas kathodische beschermingsblokken	SF ₆ Verschillende metalen	Elektrische isolatie Corrosie-bescherming

Hotspots voor emissie op zee

In onderstaande tabel is weergegeven waar de meeste emissies verwacht worden per levensfase van de turbine, inclusief het substation.

Tabel 4. Voorziene emissies van stoffen per levensfase windpark

Onderdeel turbine	Installatie	Gebruik en onderhoud	Ontmanteling	Recycling/ afvalverwerking
Bladen	Geen significante emissies voorzien	PFAS Microplastics	Geen significante emissies voorzien	Onbekend
Binnenwerk	Hydraulische olie	Hydraulische olie SF ₆	SF ₆	Onbekend
Monopile	Geen significante emissies voorzien	Fenolen (BPA, BPF, 4-tBP) Microplastics Metalen van kathodische bescherming	Geen significante emissies voorzien	Onbekend
Substation	Cement	SF ₆ Metalen van kathodische bescherming	Geen significante emissies voorzien	Onbekend

Verschil oudere en nieuwe windparken

Oudere windparken bestaan uit turbines die in principe ontworpen zijn voor wind op land. Daardoor is er een hogere kans op emissies. Dit betreft windparken: Gemini, Luchterduinen, Prinsen Amalia en Egmond aan Zee.

De nieuwere windparken zijn beter ontworpen voor de omstandigheden op open zee. Ook maken ze bijvoorbeeld gebruik van Direct Drive, waardoor er geen gebruik meer wordt gemaakt van een tandwielkast. Daardoor is er minder kans op emissie van oliën. Verder is het kavel en waterbesluit geldig voor windparken.





5. Verdieping en analyse van gevonden hotspots

Hieronder wordt de verdieping en analyse van emissie beschreven voor de eerder benoemde hotspots.

Installatiefase

- In de installatiefase worden emissies van cement en hydraulische olie verwacht.
- De precieze samenstelling van cement(vloeistof) is onduidelijk, maar er worden geen emissies van schadelijke stoffen naar het milieu door verwacht.
- Voor hydraulische olie is een procedure tegen lekken. Ook zijn de voornaamste componenten niet geïdentificeerd voor milieu en weinig milieubelastend. Wel kan er eventueel sprake zijn van additieven, zoals zinkstabilisatoren (<0,1%). Zink dialkyl(C3-C6)dithiofosfaat staat op de lijst zeer zorgwekkende stoffen.

Expert judgement: Geen vervolgonderzoek nodig voor emissies bij de installatiefase.

Corrosiebeschermingssystemen

- De monopile (een enkele grote heipaal die onder water staat) wordt beschermd door epoxy/polyurethaan coating.
- Er is beperkte literatuur aanwezig, maar emissies van zorgwekkende stoffen zijn aannemelijk bij monopile coatings.
- Organische stoffen BPA en BPF (Kirchgeorg et al., 2018), qtbp (Bell et al., 2020), en microplastics
- qtbp en BPA staan op lijst zeer zorgwekkende stoffen (ZZS).
- Er zijn grote verschillen in uitloging van stoffen tussen coatings. Er zijn mogelijkheden in samenstelling/keuze van de coating.
- De monopile wordt ook beschermd tegen erosie door opofferingsmetalen (galvanische anode kathodische bescherming). Daarbij wordt gebruik gemaakt van een metaal wat oplost in plaats van het staal van de monopile. Dit leidt tot hoge emissie (kg tot ton) van voornamelijk aluminium.
- In plaats van opofferingsmetalen wordt ook steeds meer gebruik gemaakt van stroomopdrukssystemen (impressed current cathodic protection). Hierbij is de hoeveelheid opgelost materiaal vele malen lager dan bij gebruik van opofferingsmetaal.

Tabel 5. Overzicht van corrosiebeschermingssystemen en potentiële emissies bij wind op zee (Kircheorg et al. 2018)

Type bescherming	Materiaal	Bevat stoffen	Mate van jaarlijkse emissies bij Wind op Zee
Opofferingsmetaal	Aluminium-Zink-Indium	Al (95-98%), Zn(2,5-5,75%), In (0,015-0,05%), sporen van Cd, Mn, Fe, Si, Pb en Cu	Hoog (Kg tot t)
Stroomopdrukstelsysteem	Titanium, iridium, iridium/ruthenium-MOX, niobium en tantaal	Ti, Ir, Ru, Ni, Ta	Laag (mg tot g)
Coating	Epoxyhars, Polyurethaan	Organische stoffen zoals BPA en andere fenolen, kleine deeltjes (bv microplastics)	Onbekend
Marge corrosie monopile	Structureel staal	Fe (98%), C, Si, Mn, P, S, Cr, Co, Ni, Mo, V, Al, Cu in totaal 0,01-1,65%	Laag

Erosie van turbinebladen

- Er is sprake van erosie van de “leading edge”, de voorste kant van de turbinebladen tijdens gebruik. Hierbij is emissie van microplastics, maar de mate van emissie is onbekend/onzeker. Het is onduidelijk of PFAS gebruikt wordt in coatings van de bladen.
- Erosie vindt vooral plaats bij oudere turbines, tegenwoordig bestaat de mogelijkheid tot gebruik van “leading edge protection”. Dit voorkomt grotendeels erosie.
- Recycling van windbladen is een probleem. Dit is tot nu toe niet mogelijk. Deze worden gestort.

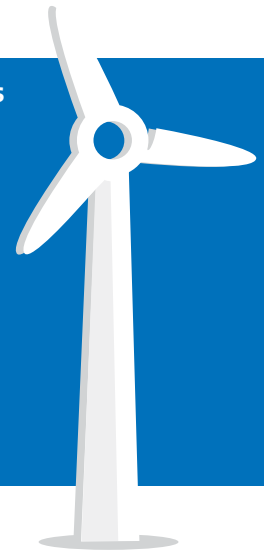
Emissie van SF6

- SF6 is een isolatiegas tegen stroomvonken. Het gebruik van isolatiegas is een veiligheidseis.
- SF6 is ook een sterk broeikasgas. Het heeft 28000 keer de global warming potential (GWP) van CO₂.
- Het verlies wordt geschat tussen de 0,1% per jaar (geschat door industrie) en 2,6% per jaar (geschat door IPCC).
- Een kleine switchgear met relatief laag voltage bevat ~6 kg SF6. Voor turbines is een alternatief mogelijk.
- Een substation heeft een groter voltage en dus meer SF6 ~ 100 kg. Hierdoor is een alternatief moeilijker.
- Het elektriciteitsnet heeft een boekhoudingsysteem voor emissies van SF6.

Voorbeeldberekening: Impact van emissie SF6 bij wind op zee in vergelijking met auto's

- 1 kg SF6 heeft 22,800 x GWP (global warming potential) van CO₂
- 1 kg SF6 staat gelijk aan 2736 km met de auto (verbrandingsmotor stoot gemiddeld 112 gram CO₂ / km uit: $0,12 * 22,800 = 2736$)
- IPCC schatting lekkage: 2,6% per jaar
 - 7 kg per turbine, 100 kg per substation
 - 773 turbines in Noordzee, 10 substations ($7 * 773 + 100 * 10$) * 0,026 = 167 kg SF6 p/j
- $167 * 2736 = 396,000$ km met de auto per jaar
- Gemiddeld rijdt een auto in NL 13,000 km per jaar

Conclusie: SF6 emissie van wind op zee heeft dezelfde GWP als ongeveer 30 auto's per jaar



Mogelijke maatregelen voor het beperken van emissie van SF6

1. Nieuwe turbines: voorkom gebruik van SF6.
 - Voor turbines is veel ontwikkeling in alternatieven voor SF6.
 - Voor substations is dit (nog) niet mogelijk, doordat het voltage te hoog is.
2. Bestaande windparken: monitoren met boekhoudings-systeem voor SF6 zoals bij elektriciteitsnet.
3. Volg ontwikkelingen alternatieven (e.g. via EU, of F-gassenregulatie)
 - Bij aanbesteding SF6 bijhouden in bestaand systeem.
4. Recycling: afvangen en borgen (ook opnemen in banking system).

6. Resultaten en aandachtspunten gebaseerd op quickscan en expert judgement

Aandachtspunten

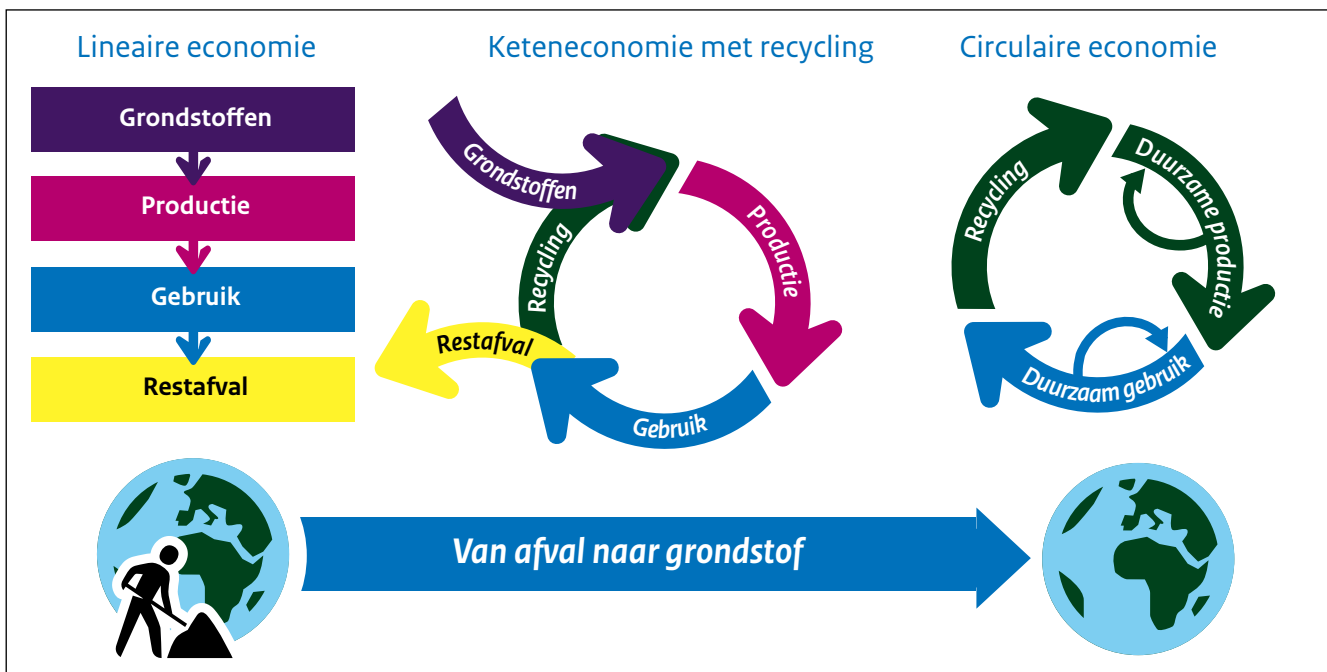
- Mogelijke uitloging ZZS (fenolen) bij coatings van de monopile.
- Emissie van deeltjes/microplastics bij erosie van de bladen.
- Onzekerheden bij einde levensduur, voornamelijk bij de windbladen.
- Er zijn plannen voor meervoudig gebruik (multi-use) van windparken, bijvoorbeeld voor aquacultuur. De (eco) toxicologische risico's van stoffen bij wind op zee in combinatie met andere toepassingen zijn vooralsnog onbekend.
- Voor SF₆ zijn maatregelen en alternatieven beschikbaar. De GWP per jaar door lekken SF₆ alle Nederlandse windparken op de Noordzee is evenveel als CO₂ van 30 auto's.

Transitie circulaire economie: risico of kans?

- De doelstelling van de Nederlandse overheid is een circulaire economie in 2050. In 2030 moet het gebruik van primaire grondstoffen gehalveerd zijn.
- Door de klimaattransitie komen er naar verwachting meer windturbines, wat leidt tot een grote(re) vraag naar materialen.
- De effecten tijdens de end-of-life fase van windturbines is onbekend, vooral van de bladen.

Aanbeveling

- Haak aan bij circulaire transitie, bijv. Circo track, TKI WoZ (Topconsortium Kennis & Innovatie Wind op Zee)
- Kans: Circulair wind op zee wordt opgepakt door EzK, o.a. via TKI WoZ. Er is ook een Circo-track geweest.
- Voer vervolgonderzoek uit naar de end-of-life onzekerheden, m.n. de bladen.



Figuur 2. Van lineaire economie naar circulaire economie

7. Conclusie

Het doel van de quickscan was inzicht te geven of er kans op emissies zijn van stoffen bij wind op zee. Daarnaast om een eerste inschatting van risico's te geven en te kijken welke (preventieve) maatregelen er mogelijk zijn.

Er is een kans op emissies van stoffen

Met name van corrosiebeschermings-systemen (coatings, opofferingsmetalen) van de monopile, slijtage van windbladen en SF6.

Preventieve maatregelen zijn mogelijk

- Keuze in (samenstelling van) coating en type kathodische bescherming maakt uit.
- Voorkomen van erosie windbladen door leading edge protection.
- Alternatieven SF6 zijn mogelijk voor turbines, daarnaast inzetten op monitoren van SF6.

Grootste impact verwacht bij multi-use scenarios van windparken

De risico-inschatting vergt verder onderzoek.

Aandacht nodig voor transitie naar circulaire economie

Met name omgang/recycling windbladen bij einde levensduur.

8. Aanbevelingen voor vervolgonderzoek

Op basis van de quickscan worden de volgende vervolgonderzoeken aangeraden:

- Toxicologische risicobeoordelingen van stoffen en deeltjes die vrijkomen tijdens de gebruiksfase van wind op zee bij multi-use scenario's door:
 - Emissie van BPA, BPF, qtpb uit coating monopile
 - Emissie van metalen uit kathodische bescherming monopile
 - Emissie van microplastics en stoffen (fenolen, PFAS) door slijtage leading edge windbladen

- Vervolgonderzoek naar de mogelijkheden en knelpunten voor recycling windturbines bij end-of-life, met name de windbladen.

NB. Het vervolgonderzoek naar toxicologische risico's bij multi-use van wind op zee wordt op moment van publicatie van deze quickscan uitgevoerd.

Literatuur

1. Abeliotis, K., & Pactiti, D. (2014). Assessment of the environmental impacts of a wind farm in central Greece during its life cycle. *International Journal of Renewable Energy Research (IJRER)*, 4(3), 580-585.
2. Alam, M. A., Sherif, E.-S. M., & Al-Zahrani, S. M. (2013). Fabrication of various epoxy coatings for offshore applications and evaluating their mechanical properties and corrosion behavior. *Int. J. Electrochem. Sci*, 8, 3121-3131.
3. Ameduri, B. (2018). Fluoropolymers: The right material for the right applications. *Chemistry—A European Journal*, 24(71), 18830-18841.
4. 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.
5. 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.
6. Bonou, A., Laurent, A., & Olsen, S. I. (2016). Life cycle assessment of onshore and offshore wind energy—from theory to application. *Applied Energy*, 180, 327-337.
7. Brand, S., Veith, L., Baier, R., Dietrich, C., Schmid, M. J., & Ternes, T. A. (2020). New methodical approaches for the investigation of weathered epoxy resins used for corrosion protection of steel constructions. *Journal of Hazardous Materials*, 395, 122289.
8. Bruchet, A., Elyasmno, 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.
9. Burges, K. D., Michael; Hussy, Charlotte; Rhiemeier, Jan-Martin; Franck, Christian; Rabie, Mohamed. (2018). *Concept for SF6-free transmission and distribution of electrical energy*. Retrieved from
10. Canesi, L., & Fabbri, E. (2015). Environmental effects of BPA: focus on aquatic species. *Dose-Response*, 13(3), 1559325815598304.
11. Chipindula, J., Botlaguduru, V. S. V., Du, H., Kommalapati, R. R., & Huque, Z. (2018). Life cycle environmental impact of onshore and offshore wind farms in Texas. *Sustainability*, 10(6), 2022.
12. Cortés, E., Sánchez, F., O'Carroll, A., Madramany, B., Hardiman, M., & Young, T. M. (2017). On the material characterisation of wind turbine blade coatings: the effect of interphase coating–laminar adhesion on rain erosion performance. *Materials*, 10(10), 1146.
13. da Silva Costa, R., Sainara Maia Fernandes, T., de Sousa Almeida, E., Tomé Oliveira, J., Carvalho Guedes, J. A., Julião Zocolo, G., . . . do Nascimento, R. F. (2021). Potential risk of BPA and phthalates in commercial water bottles: a minireview. *Journal of Water and Health*, 19(3), 411-435.
14. DVV-GL. (2016). Standard for Offshore substations. In.
15. European Commission. *Assessing the availability of alternatives to fluorinated greenhouse gases in switchgear and related equipment, including medium-voltage secondary switchgear*. (2020). Retrieved from https://ec.europa.eu/clima/system/files/2020-09/c_2020_6635_en.pdf
16. Gamesa, S. A clean energy solution - from cradle to grave. In *Environmental Product Declaration SG 8.0-167 DD*.
17. Garrett, P. R., Klaus. (2015). *Life Cycle Assessment of electricity production from an onshore V112-3.3 MW Wind Plant*. Retrieved from https://www.vestas.com/content/dam/vestas-com/global/en/sustainability/reports-and-ratings/lcas/Life%20cycle%20assessment_V112-3%203MW_Mk2c_Version_2_1_210915.pdf.coredownload.inline.pdf
18. Groenendijk, F. (2018). *Review on the risk assessment on transit and co-use of offshore wind farms in dutch coastal water*. Retrieved from
19. Haapala, K. R., & Prempreeda, P. (2014). Comparative life cycle assessment of 2.0 MW wind turbines. *International Journal of Sustainable Manufacturing*, 3(2), 170-185.
20. Kelfkens, G. v. d. R., J. (2018). *Verkenning van de milieuspecten van de activiteiten die onder het Staatstoezicht op de Mijnen vallen*. Retrieved from
21. 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.
22. Lago, C. P., Ana; Lechón, Yolanda; Oltra, Christian; Pullen, Angelika; Auer, Hans. (2009). *Wind energy - the facts - part V - Environmental issues*.
23. Lazakis, I., & Kougioumtzoglou, M. A. (2019). Assessing offshore wind turbine reliability and availability. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part M: Journal of Engineering for the Maritime Environment*, 233(1), 267-282.
24. Masterflow 928 Material Safety Data Sheet. (2006). In.
25. MasterFlow 9500 Technical Data Sheet. (2021). In.

26. Mishnaevsky Jr, L. (2019). Repair of wind turbine blades: Review of methods and related computational mechanics problems. *Renewable energy*, 140, 828-839.
27. Piasecka, I., Tomporowski, A., Flizikowski, J., Kruszelnicka, W., Kasner, R., & Mroziński, A. (2019). Life cycle analysis of ecological impacts of an offshore and a land-based wind power plant. *Applied Sciences*, 9(2), 231.
28. Razdan, P. G., Peter. (2015). *Life Cycle Assessment of electricity production from an onshore V110-2.0 MW wind plant*. Retrieved from
29. Razdan, P. G., Peter. (2017). *Life Cycle Assessment of electricity production from an Onshore V112-3.45 MW Wind Plant*. Retrieved from
30. Russ, M. R.-M., Lana. (2020). *Life Cycle Assessment of a Nordex Wind Farm with Delta4000 Turbines*. Retrieved from
31. Schmid, M. R., Nieves Gonzalez; Dierckx, Ann; Wegman, Thomas. (2020). *Accelerating wind turbine blade circularity*. Retrieved from <https://windeurope.org/wp-content/uploads/files/about-wind/reports/WindEurope-Accelerating-wind-turbine-blade-circularity.pdf>
32. Schreiber, A., Marx, J., & Zapp, P. (2019). Comparative life cycle assessment of electricity generation by different wind turbine types. *Journal of cleaner production*, 233, 561-572.
33. Shankar Verma, A., Jiang, Z., Ren, Z., Caboni, M., Verhoef, H., van der Mijle Meijer, H., . . . Teuwen, J. J. (2021). 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.
34. Simmonds, P. G., Rigby, M., Manning, A. J., Park, S., Stanley, K. M., McCulloch, A., . . . Arduini, J. (2020). The increasing atmospheric burden of the greenhouse gas sulfur hexafluoride (SF₆). *Atmospheric Chemistry and Physics*, 20(12), 7271-7290.
35. 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.
36. Westerbeek, R. A. (2020). *SF6-emissie Netbeheerders Elektriciteit 2019*. Retrieved from
37. Widger, P., & Haddad, A. M. (2018). Evaluation of SF₆ leakage from gas insulated equipment on electricity networks in Great Britain. *Energies*, 11(8), 2037.



Dit is een uitgave van:

**Rijksinstituut voor Volksgezondheid
en Milieu**

Postbus 1 | 3720 BA Bilthoven
www.rivm.nl

augustus 2021

De zorg voor morgen begint vandaag