



Universiteit
Leiden
The Netherlands

Environmental assessment and guidance for the future offshore wind energy development

Li, C.

Citation

Li, C. (2023, November 29). *Environmental assessment and guidance for the future offshore wind energy development*. Retrieved from <https://hdl.handle.net/1887/3665462>

Version: Publisher's Version

License: [Licence agreement concerning inclusion of doctoral thesis in the Institutional Repository of the University of Leiden](#)

Downloaded from: <https://hdl.handle.net/1887/3665462>

Note: To cite this publication please use the final published version (if applicable).

Samenvatting

De snelle uitbreiding van offshore wind farms (OWFs) en offshore wind energy (OWE), windmolenparken en windenergie op zee, speelt een grote rol in de decarbonisatie van ons energiesysteem en het verminderen van de uitstoot van broeikasgassen. Door het benutten van het volle potentieel van windenergie op zee kan tot wel 11 keer aan de toekomstige wereldwijde vraag aan elektriciteit worden voldaan. Dit komt door de grote hoeveelheid wind op zee en de grootte van het beschikbare oppervlakte voor windenergie. De OWE sector is de afgelopen decennia opmerkelijk hard gegroeid, door een consistente vermindering in de gemiddelde kosten van windenergie. In 2019 had OWE een totale capaciteit van 23 GW, en daarmee een aandeel van 0.3% in de wereldwijde energieopwekking. Voor 2040 wordt echter een geïnstalleerde capaciteit van 342-560 GW verwacht. Het realiseren van zulke grootschalige OWE ontwikkelingen vereist grote hoeveelheden aan materialen. De winning en productie hiervan zal leiden tot impact op het klimaat, de biodiversiteit en het milieu. OWE technologieën zullen continu worden verbeterd, onder andere door het vergroten van turbines, het verlengen van de levensduur, en het optimaliseren van de verschillende onderdelen. Bovendien zal windenergie op zee steeds vaker op grotere afstand van de kust worden gerealiseerd om meer wind te kunnen vangen, waardoor de windmolens in dieper water moeten worden gebouwd. Deze factoren spelen allemaal een rol in de ecologische voetafdruk van OWE ontwikkeling.

Deze thesis behandelt de OWE-gerelateerde impact op het milieu. Dit leidt tot de volgende onderzoeksvraag (OV): wat is de milieu-impact van OWE ontwikkeling? De hoofdvraag bestaat uit de volgende vier subvragen (SV):

SV1: Wat is de toekomstige materiaalbehoefte voor wereldwijde OWE ontwikkeling? (Hoofdstuk 2)

SV2: Wat is de wieg-tot-graf milieu-impact van wereldwijde OWE ontwikkeling? (Hoofdstuk 3)

SV3: Welke gevolgen heeft OWE ontwikkeling voor de mariene biodiversiteit? (Hoofdstuk 4)

Sv4: Hoe kan de milieu-impact van OWE ontwikkeling worden verminderd door optimale ruimtelijke planning en technische innovatie, geïllustreerd met het voorbeeld van de Noordzee? (Hoofdstuk 5)

We beantwoorden de genoemde onderzoeksvragen door het gebruiken of ontwikkelen van verschillende methoden. We gebruiken dynamic material flow analysis (dMFA) om de materiaalbehoefte voor het produceren van OWE infrastructuur te kwantificeren. Dit combineren we met prospective life cycle assessment (LCA) om de wieg-tot-graf milieu-impact van toekomstige OWE ontwikkeling te evalueren. We ontwikkelen characterization factors (CFs) voor life cycle impact assessment (LCIA) om de veranderingen in mariene biodiversiteit door OWFs te berekenen. Verder integreren we dMFA en prospective LCA berekeningen op een ruimtelijk expliciete manier. We kijken naar de invloed van geografische factoren zoals windsnelheid, afstand tot de kust, en diepte van de zee op de materiaalbehoefte en milieu-impact van de levenscyclus van een windturbine, per geproduceerde MWh elektriciteit. We illustreren deze benadering met een case studie van de Noordzee.

In Hoofdstuk 2 ontwikkelen we een dMFA model (rekening houdend met capaciteit, technologie en materiaal) om de primaire materiaalbehoefte en secundaire materiaaltoevoer van wereldwijde OWE ontwikkeling te onderzoeken. Het gaat hierbij bijvoorbeeld aan bulkmaterialen, zeldzame aardmetalen, en andere materialen voor het produceren van windturbines op zee. We berekenen de nieuw te bouwen (inflow) en af te breken (outflow) windturbines in termen van de aangenomen ontwikkeling van capaciteit, technologieën en materialen die in gebruik zijn, en de verwachte levensduur daarvan. Onze resultaten laten zien dat er substantiële hoeveelheden materiaal nodig zijn voor OWE ontwikkeling van 2020 tot 2040. Het gaat b.v. om 129-235 Mt staal, 8.2-14.6 Mt ijzer, 3.8-25.9 Mt beton, 0.5-1.0 Mt koper en 0.3-0.5 Mt aluminium. Onze bevindingen geven weer dat de massa-intensiteit (kg/MW) over de tijd zal toenemen (van 365.2 t/MW in 2020 tot 559.6 t/MW in 2040). Laag gelegeerd staal is verantwoordelijk voor het grootste aandeel in de vraag naar materiaal voor toekomstige OWE

technologieën (~82% van de totale massa). Het meeste van dit laag gelegeerde staal is nodig voor de fundering van de windturbines, met een cumulatief aandeel van 84-85% van 2020 tot 2040. Closed-loop recycling en het verlengen van de levensduur kunnen bijdragen aan het verminderen van de materiaalbehoefte voor OWE, Het gaat om verminderingen met 3% tussen 2020 en 2030 en met 12% tussen 2030 en 2040.

In Hoofdstuk 3 creëren we een prospective LCA model om de huidige en toekomstige milieu-impact van OWE ontwikkeling op een wereldwijde schaal te kwantificeren tot 2040. In het hoofdstuk ontwikkelen we dynamische geparametriseerde life cycle inventories (LCIs), met hoge technologische resolutie en gedetailleerde aanvoerketens. We kijken hierbij naar de installatie, gebruik en onderhoud, het ontmantelen en end of life (EOL) recycling van OWE. We passen de LCIs voor een specifiek jaar tussen 2020 tot 2040 aan op basis van diverse trends, zoals het vergroten van de turbines, het plaatsen van turbines verder van de kust, het toepassen van nieuwe technologieën en het ontwikkelen van closed-loop EOL recycling. Verder zijn de LCA resultaten berekend op basis van achtergrond-data die rekening houden met toekomstige ontwikkelingen, zoals het verlagen van de koolstofemissies uit het elektriciteitssysteem. Onze resultaten laten zien dat de intensiteit van broeikasgassen (per MWh geïnstalleerde capaciteit) met ~21% afneemt van 2020 tot 2040. Soortgelijke dalingen vinden plaats voor mariene ecotoxiciteit (~25% daling), mariene eutrofiëring (~22% daling), en de uitputting van metalen (~16% daling). De toepassing van OWE zal cumulatief (van 2020-2040) leiden tot een bijdrage van 2.6-3.6 Gt CO₂-eq aan klimaatverandering. Als dezelfde hoeveelheid elektriciteit met de wereldwijde elektriciteitsmix van 2020 zou worden geproduceerd, zou dit echter leiden tot de uitstoot van 124-207 Gt CO₂-eq (48-58 keer zoveel). De productie van OWE is verantwoordelijk voor het grootste gedeelte (~75%--95%) aan de cumulatieve milieu-impact tussen 2020 en 2040, gevolgd door het gebruik en onderhoud. Rond de 6-9% van de cumulatieve OWE-gerelateerde milieu-impact kan worden verminderd door EOL recycling en het vervangen van primaire materialen.

In Hoofdstuk 4 gebruiken we monsters met infauna bevattend sediment epifauna bevattende harde ondergrond, genomen rondom OWFs en controleplekken zonder OWFs in Denemarken, Duitsland, Nederland en België, om de gevolgen van OWE op mariene biodiversiteit te kwantificeren. OWFs zorgen met name voor drie interventies. Ze bedekken de zeebodem, vormen kunstmatige riffen, maar vermijden ook de sleepnetvisserij. Het hoofdstuk ontwikkelt drie karakteristatiefactoren (CFs), gebaseerd op het verschil in biodiversiteit bepaald uit monsters rond OWFs en de controleplekken. Door middel van de ontwikkelde CFs laten we zien dat de soortenrijkdom en -overvloed op harde ondergrond veel groter is dan op zacht sediment, en bovendien zal toenemen gedurende de tijd na het bouwen van OWFs. Er zijn geen netto negatieve gevolgen op de benthische gemeenschap gedurende het gebruik van OWFs. Hoewel het bedekken van de zeebodem zal leiden tot beperkte biodiversiteitsverliezen in het zachte sediment, kunnen kunstmatige riffen leiden tot een verdubbeling van de soortenrijkdom en een toename van soortenovervloed van twee ordes van grootte. Ons onderzoek dient als een eerste stap naar een beter begrip van de impact op mariene biodiversiteit veroorzaakt door OWE ontwikkeling, en helpt bij een duurzaam management van OWFs. Toekomstig onderzoek waar in verschillende plekken onder verschillende omstandigheden worden gemonitord is nodig om nog meer inzicht te verkrijgen in de gevolgen voor de mariene biodiversiteit van OWE ontwikkeling.

In Hoofdstuk 5 analyseren we de ruimtelijke milieu-impact van OWE in de Noordzee, per geproduceerde MWh elektriciteit, over de gehele levenscyclus van OWE turbines (inclusief EOL). Hierbij kijken we naar materiaalbehoefte, impact op de biodiversiteit, en impact op klimaatverandering. Materiaalbehoefte omvat hierbij de productie van windturbines, de funderingen en transmissie componenten, en de life cycle impacts van CO₂ emissies op het klimaat. We berekenen de potentiële energie-opwekking van deze OWFs, waarbij we rekening hebben gehouden met technologische ontwikkelingen tussen 2020 en 2040. Onze bevindingen laten zien dat het vinden van de optimale locatie en het efficiënter maken van technologieën potentieel kunnen leiden tot een

halvering van de milieu-impacts over de levenscyclus van OWFs op de Noordzee. Om de totale milieu-impact te verlagen zullen toekomstige OWFs in noordelijke Noordzee gebieden moeten worden geplaatst. Gebieden in het centrum van de Noordzee moeten worden vermeden. De noordelijke gebieden zijn de optimale locatie, rekening houdend met de uitstoot van broeikasgassen over de gehele levenscyclus van de windturbines per MWh geproduceerde elektriciteit. Hoewel in dit gebied sprake is van dieper water, waardoor er meer staal nodig is voor de fundering van de OWFs, is er een grotere potentie voor elektriciteitsproductie door de betere windomstandigheden in dit gebied. De centrale Noordzee heeft een gemiddelde windsterkte, en dit in combinatie met een grote afstand tot de kust zorgt voor een hogere materiaalbehoefte en een hogere uitstoot van broeikasgassen gerelateerd aan de transmissie infrastructuur. Bovendien is er overlap met uitsluitingszones voor biodiversiteit. Om de ecologische voetafdruk verder te verminderen, onafhankelijk van de locatie van OWFs, is het cruciaal om te investeren in technologische verbetering van OWE. Hierbij is vooral het vergroten van de turbines van belang. Ook zijn drijvende fundering technologieën belangrijk om de hoge materiaalbehoefte van OWE in diep water met betere windcondities te verminderen.

Al met al zal de grootschalige ontwikkeling van OWE een substantiële hoeveelheid aan bulk en kritieke materialen vereisen, voor het produceren van OWFs, de bijbehorende funderingen en de transmissie-infrastructuur. Het produceren, installeren en gebruiken van OWFs heeft indirecte impact op het milieu, bijvoorbeeld door de uitstoot van broeikasgassen, of op mariene biodiversiteit. Dit komt onder andere door het produceren van de materialen, het bedekken van de zeebodem, en het transport van materiaal en personeel. Om materiaalgebruik te verminderen zouden innovaties moeten plaatsvinden op het gebied van het verlengen van de levensduur van turbines, het verbeteren van materiaal-efficiëntie, en het verbeteren en introduceren van nieuwe technologieën. Om de impact op het klimaat te verminderen zou vooral moeten worden gekeken naar het vergroten van turbines. Ook moet aandacht worden besteed aan het verminderen van emissies voor de productie van OWF, vooral aan het produceren van staal, vezels en andere belangrijke metalen. De productie hiervan zorgt voor het grootste aandeel in de milieu-impact. Impact in de gebruiks- en onderhoudsfase kan echter niet worden genegeerd, en zal waarschijnlijk toenemen als OWFs verder van de kust worden gebouwd in dieper water.

De toepassing van circulaire strategieën zoals het verlengen van de levensduur, circulair design, het hergebruiken van onderdelen en EOL materiaal recycling is cruciaal om de materiaalbehoefte en de gerelateerde milieu-impact te verminderen. De cumulatieve impact op biodiversiteit, en andere gevolgen voor het milieu, moeten worden meegenomen in de ontwikkeling van OWE. Bovendien is het essentieel om de belangrijkste hotspots in milieueffecten te identificeren en locaties te selecteren met de minste impact voor OWFs. Onze analyse kan dienen als inspiratie voor overheidsinstanties en de strategische planning van OWE-locaties stimuleren. Hierbij dient niet alleen de directe milieu-impact van OWE-locaties, zoals die op de biodiversiteit, te worden overwogen, maar ook de impact gedurende de gehele levenscyclus per geproduceerde MWh elektriciteit. Bovendien kunnen de bevindingen uit dit proefschrift helpen bij het identificeren van duurzaamheidskansen, zowel binnen de toeleveringsketens van OWE als in de ontwikkeling en optimalisatie van OWE-technologieën. Op deze manier wordt bijgedragen aan de voortgang en mogelijk zelfs versnellen van de energietransitie.