



TNO innovation
for life

Offshore windpark decommissioning

EEN ORIËNTATIE VAN MOGELIJKE ECONOMISCHE
ACTIVITEIT IN DE REGIO ZUID-HOLLAND EN HET
HAVENGEBIED ROTTERDAM

smartport.nl



SmartPort is a joint venture between the Port of Rotterdam Authority, Deltalinqs, the Municipality of Rotterdam, TNO, Deltares, Marin, Erasmus University and Delft University of Technology. By inspiring, initiating and forming alliances SmartPort stimulates and finances scientific research for and by the companies in the port of Rotterdam in collaboration with knowledge institutes.

It is about developing knowledge, share and use it from one collective ambition. The transition onto the best and smartest port can only become successful when all parties involved jointly provide solutions to changes the future will bring. We are convinced that the most impact in developing knowledge is based on specific questions from the market and that the best results arise when the optimal benefit is gained from joined forces of trade and industry, authorities, and science.

www.smartport.nl | [LinkedIn: smartportrdam](#) | [Twitter: SmartPortRdam](#) | [Instagram: smartportrdam](#)

SMARTPORT PARTNERS



WITH CONTRIBUTION





OFFSHORE WINDPARK DECOMMISSIONING

Auteurs: Thomas Hajonides van der Meulen (TNO), Ton Bastein (TNO), Siddharth Krishna Swamy (TNO), Novita Saraswati (TNO), Jelle Joustra (TU Delft)



INHOUD

01 De uitdaging van grootschalige offshore windpark verwijdering	6
1.1 Situatieschets	6
1.2 De uitdaging	7
1.3 Onderzoeksvragen en rapportstructuur	8
1.4 Toelichting op de documentstructuur	9

02 Offshore windpark materiaalstromen op de Noordzee	11
2.1 Systeembeschrijving en aannames	11
2.2 Te verwijderen offshore windparken en bijbehorende materiaalstroom	15

03 Regelgeving en decommissioning van offshore windparken	20
3.1 Afspraken in Nederlandse en buitenlandse tenderprocedures	20
3.2 Afvalwerkingsrichtlijnen	21

04 De waardeketen en kosten-baten verdeling	22
4.1 Activiteiten en stakeholders	22
Decommissioning assessment (D1):	23
4.2 Economische bedrijvigheid	26
4.2.1 Verwijdering en transport van WTG, support structure en inter-array cables (D3-5)	26
4.2.2 Hergebruik van systemen (EOL4A)	29
4.2.3 Recycling van materialen (EOL4B) en Storten/verbranden van composiet (EOL4C)	29
4.2.4 Verdieping: windturbineblad recycling	31
4.2.5 Verdieping: hergebruik van permanente magneten	34
4.3 Verdeling kosten en baten	35

05 Impact van ontwikkelingen in de offshore windpark-technologie	38
5.1 Ontwikkelingen met een invloed op decommissioning en end-of-life	38
5.2 Implementatie van ontwikkelingen binnen de huidige OWF keten	42

06 Conclusies en call-to-action	43
6.1 Conclusies en afhankelijkheden per fase	45
6.2 Welke ontwikkelingen kunnen impact hebben op marktontwikkeling?	47
6.3 Actielijnen	48
6.4 De rol van de regio en de haven Rotterdam: regionale invulling van actielijnen	50

07 Dankwoord	53
---------------------	-----------

De uitdaging van grootschalige offshore windpark verwijdering

Windenergie wordt in Nederland in belangrijke mate door offshore windparken opgewekt op zee. In de komende decennia zal het aantal windparken opgeschaald worden in lijn met de huidige energietransitie- en verduurzamingsdoelstellingen. Wat gebeurt er met deze windturbines wanneer ze aan het einde van de operationele levensduur zijn gekomen? Met welke volumes aan materiaal dienen we rekening te houden? Hoe voorkomen we een ongewenste milieu-impact van deze ontmanteling? Welke vormen van economische bedrijvigheid kunnen er ontstaan uit deze verwijderingsopgave? In dit hoofdstuk wordt de context van deze vragen toegelicht en worden tevens de onderzoeksvragen en structuur van het document beschreven.

1.1 Situatieschets

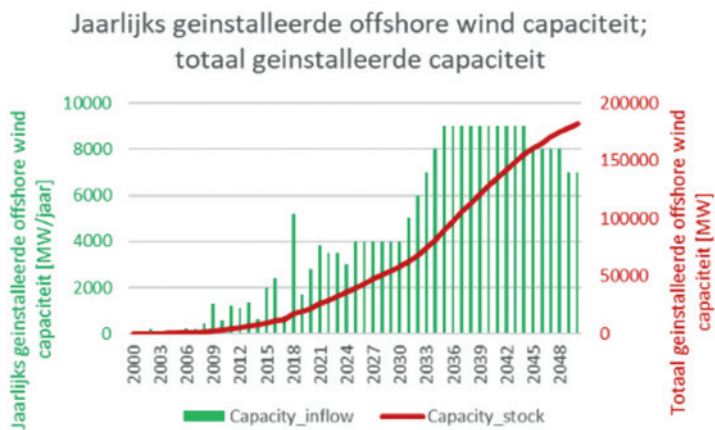
De transitie naar een energiesysteem op basis van hernieuwbare energiebronnen is in volle gang. Op de Nederlandse, Belgische, Britse, Duitse en Deense Noordzee wordt nu en in de toekomst volop gebouwd aan offshore windparken om bij te dragen aan de verduurzaming van de energiemix. Europese beleidsstukken schetsen tot 2050 een toename van de capaciteit van offshore wind elektriciteitsproductie tot 174 GW in de zuidelijke Noordzee¹. In Figuur 1 is de verwachte toename van de installatiecapaciteit per jaar weergegeven. Deze toename zal leiden tot een groot aantal windturbines en aanverwante offshore-systemen in de sub-regio's NL01, BE01, DE01, DK01, UK03 en UK04 van de Noordzee (zie Figuur 2²). De beoogde operationele levensduur van een offshore windfarm (OWF) is 20-30 jaar, waarna het windpark uit bedrijf genomen, ontmanteld en verwijderd wordt³. Deze activiteiten tezamen wordt decommissioning genoemd. Offshore windpark decommissioning levert tussen 2020 en 2050 een sterk groeiende hoeveelheid materiaal op die van zee terug naar land gebracht zal moeten worden. Deze restmateriaalstroom dient vervolgens op verantwoorde wijze te worden verwerkt in de end-of-life fase om negatieve ecologische impact te minimaliseren.

Het ligt voor de hand dat bedrijfsmatige activiteiten die kunnen ontstaan in de decommissioning- en end-of-life fase plaats zullen vinden vanuit en/of rondom de havens die gelegen zijn aan de zuidelijke Noordzee. Een aantal havens zouden een rol kunnen gaan spelen in de toekomst, zoals de havens van Aberdeen (Schotland), Esbjerg (Denemarken), Sheerness en Kingston upon Hull (Engeland), Eemshaven, Amsterdam en Rotterdam. Vanwege de geografische positionering, de onshore logistieke faciliteiten en gevestigde offshore rederijen en andere offshore wind ketenpartijen van de Rotterdamse haven en de regio Zuid-Holland, is het relevant om te verkennen wat en hoe intensief de rol van Rotterdam zou kunnen zijn rondom decommissioning. In deze studie worden de bovengenoemde zes regio's beschouwd en wordt aangenomen dat de uiterste afstand tussen Rotterdam en een offshore windpark binnen de regio 500 kilometer bedraagt.

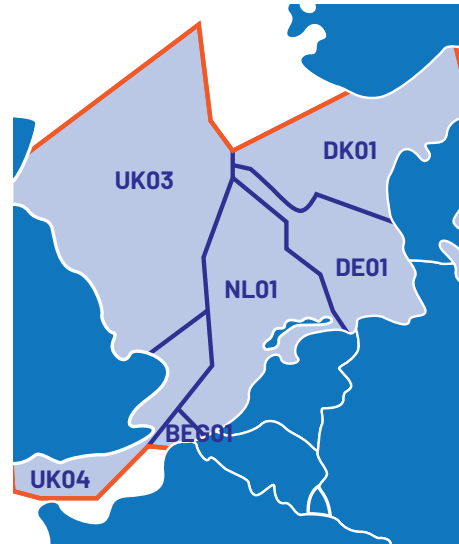
1 www.windeurope.org/wp-content/uploads/files/about-wind/reports/WindEurope-Our-Energy-Our-Future.pdf
www.ec.europa.eu/energy/sites/ener/files/documents/roadmap2050_ia_20120430_en_0.pdf

2 Adapted from WindEurope, BVG Associates (2019) Our Energy Our Future, p.14

3 Repowering en lifetime extension is geen onderwerp van onderzoek in deze verkenning



Figuur 1 Verwachte capaciteit van offshore windparken



Figuur 2 Sub-regio's in scope voor deze studie

1.2 De uitdaging

De operationele levensduur van offshore windparken is eindig. Het achterlaten van de windparken op zee is onwenselijk vanwege toekomstig gebruik van hetzelfde Noordzeegebied voor nieuwe windparken of andersoortige bedrijvigheid. Door de relatief recente ontstaansdatum van offshore windparken is mondiaal weinig praktijkervaring met decommissioning-activiteiten van dergelijke parken. Vanuit zowel maatschappelijk als economisch oogpunt is het relevant om te werken aan optimalisatie van de fysieke verwijdering van windturbines en de verwerking van de restmateriaalstroom (en dan met name nog niet goed te verwerken stromen zoals turbinebladen en permanente magneten). De volgende factoren maken grootschalige OWF-verwijdering in de komende decennia tot een uitdaging⁴:

- **Grote volumes:** er komt een aanzienlijke stroom systemen vrij in de komende decennia.
- **Gebrek aan ervaring:** er is slechts beperkt ervaring opgedaan met OWF decommissioning en deze verwijderingsactiviteiten waren kleinschalig in vergelijking met de toekomstige activiteiten, zowel qua aantal als qua grootte van turbines (zie Tabel 1⁵).

Tabel 1 Verwijderde OWF

Turbines/wind farms	Country	Number, turbine size	Foundation	Built	End of service	Removed
Nogersund/ Blekinge/Svante	Sweden	1x220kW	Tripod	1991	2004	2007
Yttre Stengrund	Sweden	5x2 MW	Drilled MP's	2001	2015	2015
Robin Rigg (2 of 60)	UK	2x3 MW	MP	2010		2015
WindFloat	Portugal	1x2 MW	Floating	2011	2016	2016
Hooksiel	Germany	1x5 MW	Tripile	2008	2011	2016
Lely	Netherlands	4x500 kW	MP	1994	2014	2016
Vindeby	Denmark	11x450 kW	GBS	1991	2016	2017

4 Topham et al (2019) Challenges of decommissioning offshore wind farms: Overview of the European experience

5 DNV-GL (2017) Decommissioning of Offshore Wind Installations - What we can learn

- **Vertraagde leercurve:** directe praktijkervaring zal slechts langzaam toenemen, aangezien de vroeg geïnstalleerde windparken bestaan uit relatief kleine turbines in ondiep en kalm water.
- **Gedeeltelijk vergelijkbaar met de olie & gas sector:** de decommissioning-activiteiten van offshore windparken zijn (slechts) gedeeltelijk vergelijkbaar met de decommissioning-activiteiten van olie & gas platformen.
- **Tijdige voorbereiding is wenselijk:** om de kosten en baten op het moment van ontmanteling vast te leggen en te kunnen beïnvloeden zijn algemene én locatie- en turbinetype-specifieke voorbereidingen vereist. Deze voorbereidingen zijn divers, complex en momenteel onduidelijk.
- **Onduidelijk decommissioningproces:** op het moment is er geen duidelijk en bewezen decommissioningproces bekend⁶. De decommissioning-activiteiten zullen zich initieel moeten baseren op de eerder succesvol voltooide installatie-activiteiten.
- **Specifieke schepen nodig:** er zal een beroep gedaan worden op specialistische schepen waarvan de inzetbaarheid en kosten bepaald worden door de markt.
- **Huidige regelgeving biedt weinig decom-incentives:** alhoewel OWF-decom in tenderprocedures moet worden geadresseerd is er geen directe aanleiding om nu tot optimalisatie of concrete investeringen te komen (plannen worden kort voor de decom-fase pas gespecificeerd)⁷.
- **Afwezigheid van hoogwaardige verwerking van thermohardend composietmateriaal:** naast het gebruik van bestaande end-of-life ketens (e.g. de staalrecyclingindustrie) zal de offshore-windsector oplossingen moeten vinden voor de tot op heden onvolwassen end-of-life bestemmingen voor het thermohardend composietmateriaal^{8, 9, 10}. Daarnaast is de manier van verwerking van permanente magneten nog onduidelijk.

Doordat grootschalige offshore windpark decommissioning en de hierop volgende end-of-life activiteiten onbekend terrein zijn, bestaat er onzekerheid over het type en de mate van bedrijvigheid die hiermee gemoeid zou kunnen zijn. Deze onbekendheid leidt tot onduidelijke afhankelijkheden, kosten en baten per betrokken stakeholder in de volledige offshore wind waardeketen en de afvalverwerkingssector. In dit onderzoek worden de activiteiten belicht die gericht zijn op het volledig verwijderen van de OWF. Activiteiten rondom levensduurverlenging door componentvervanging of site repowering (d.w.z. de volledige verwijdering en herinstallatie van het WTG systeem) vergen een site-specifieke benadering en worden buiten beschouwing gelaten in deze Noordzee-brede verkenning.

1.3 Onderzoeksvragen en rapportstructuur

Het doel van deze studie is om de randvoorwaarden in beeld te brengen waaronder bedrijfsmatige ontwikkelingen rond decommissioning van offshore windparken (waaronder hergebruik van materialen uit offshore windmolenparken) voor Zuid-Holland en het Rotterdamse havengebied tot stand kunnen komen. Deze dienen uit te monden in eerste aanbevelingen voor vervolgstappen op weg naar een roadmap voor een ecosysteem voor decommissioning in Zuid-Holland.

6 WindEurope EoLIS seminar announcement: www.windeurope.org/newsroom/news/working-towards-a-european-standard-for-decommissioning-wind-turbines/

7 Kruse et al. (2019) Market Analysis DecomTools

8 Bloomberg artikel: www.bloomberg.com/news/features/2020-02-05/wind-turbine-blades-can-t-be-recycled-so-they-re-piling-up-in-landfills

9 Cherrington et al. (2012) Producer responsibility: Defining the incentive for recycling composite wind turbine blades in Europe

10 WindEurope, EuCIA, & Cefic. (2020). Accelerating Wind Turbine Blade Circularity

Om deze randvoorwaarden in beeld te krijgen en te komen tot aanbevelingen, wordt in het onderzoek antwoord gegeven op de volgende vragen:

Hoeveel offshore windturbinesystemen (in vermogen en aantallen) en welke materiaalstromen (in tonnen) komen -als functie van de tijd- van zee?

Welke activiteiten zullen plaats gaan vinden in de decommissioning-fase en end-of-life fase? Welke stakeholders kunnen hierbij betrokken worden?

Welke kosten zijn gemoeid met de verwijdering, retourlogistiek en verwerking van componenten en materialen?

Hoe zijn de kosten en baten van decommissioning end-of-life activiteiten verdeeld onder de betrokken stakeholders?

Wat kan er, op basis van huidige markt en technologie, gezegd worden over de toepassingen en dus marktverwachtingen van hergebruikte componenten en secundaire materialen?

Welke (technologische) ontwikkelingen zullen een impact gaan hebben op de systeem levenscyclusfasen en op welke termijn gaan de ontwikkelingen gevolgen hebben voor de decommissioning en end-of-life activiteiten?

Wat zijn de randvoorwaarden waarin voorzien zal moeten worden om verantwoord om te gaan met de uit bedrijf genomen offshore windparken?

1.4 Toelichting op de documentstructuur

In dit document wordt allereerst inzicht gegeven in de hoeveelheid windturbine systemen en volumestromen aan materialen die per jaar van de zuidelijke Noordzee af zullen komen in de periode 2020 tot 2050 (hoofdstuk 2). In hoofdstuk 3 wordt beschreven in welk beleids-, wet- en regelgevend kader de aanstaande decommissioning en end-of-life activiteiten plaats zullen vinden. Vervolgens worden deze activiteiten en de betrokken stakeholders per activiteit geïdentificeerd en beschreven in hoofdstuk 4. Op basis van de systeem- en materiaalstromen én de geïdentificeerde activiteiten wordt in dit hoofdstuk uiteengezet hoeveel economische bedrijvigheid er mogelijk gemoeid is met deze decommissioning en end-of-life activiteiten. De eventuele ontwikkelingen in de offshore windsector die impactvol kunnen zijn op het verwijderen en verwerken van de turbines worden in hoofdstuk 5 uiteengezet. Afsluitend beschrijft hoofdstuk 6 drie actielijnen die gevolgd kunnen worden om tot een regionaal ecosysteem voor decommissioning te komen, waarbinnen op effectieve wijze de windturbinesystemen en -materialen verwerkt kunnen worden.



Offshore windpark materiaalstromen op de Noordzee

Om elektriciteitsproductie op zee te realiseren worden diverse systemen geïntegreerd tot een windpark. Op basis van de materialen waar deze systemen uit bestaan kan ingeschat worden welke volumes aan materiaal initieel náár zee zullen gaan, en na het vervullen van de functie als windparkonderdeel terug van zee zullen komen. Dit hoofdstuk beschrijft de aannames rondom de beschouwde systemen, de meegenomen technologische ontwikkeling, de bill of materials per systeem en de uiteindelijke materiaalstromen per jaar.

2.1 Systeembeschrijving en aannames

De inschatting van de aantallen windparksystemen en daarmee de volumes aan materiaalstromen kan alleen worden gemaakt op basis van een aantal aannames op het gebied van de totaal geïnstalleerde windpark capaciteit, windpark levensduur, systeem- en materiaalsamenstelling en technologische ontwikkeling. Deze aannames worden hieronder toegelicht en ze vormen de basis onder de analyses in de rest van deze verkenning.

Het aantal systemen en daarmee de tonnen materiaal die geïnstalleerd en verwijderd zullen worden in de zes Noordzee sub-regio's is theoretisch benaderd en gemodelleerd op basis van de verwachte geïnstalleerde offshore wind capaciteit, zoals beschreven in paragraaf 1.1. Specifieke systemen en materialen van reeds geïnstalleerde windparken zijn daarmee geïncorporeerd in de theoretische benaderingen.

Aannames rondom levensduur van het windpark:

- Er zijn uiteenlopende redenen die kunnen leiden tot het uit bedrijf gaan van een windpark. Deze life-limiting factors kunnen technologisch, economisch, juridisch, commercieel of organisatorisch van aard zijn¹¹. In dit onderzoek wordt het einde van de gegunde exploitatieperiode van de windpark eigenaar beschouwd als operationele levensduur.
- Van 2020 tot 2030 is de aangenomen normaal verdeelde operationele levensduur van een turbine 20-25 jaar. Mogelijk langere operationele levensduur wordt buiten beschouwing gelaten tot 2030. Vanaf 2031 wordt een minimale (20-25 jaar) en maximale (25-30 jaar) operationele levensduur aangenomen in twee materiaalstroom-scenario's.
- Aangenomen wordt dat er geen vervanging van systemen en componenten plaatsvindt. Tussentijdse materiaalstromen gerelateerd aan onderhoudswerkzaamheden worden daarmee buiten beschouwing gelaten.

Aannames rondom systeem- en materiaalsamenstelling:

Deze studie neemt in haar analyse diverse technologische ontwikkelingen mee die verwacht worden tot

11 Ruitenburg, R.J. (2017). Manoeuvring physical assets into the future – planning for predictable and preparing for unpredictable change in Asset Life Cycle Management. PhD thesis, University of Twente, Enschede, the Netherlands.

2050. Een aantal ontwikkelingen dat wel een hoge implementatiegraad en grote impact kan hebben op de decommissioning fase, maar minder waarschijnlijk wordt geacht, wordt besproken in paragraaf 5.1.

De volgende aannames met betrekking tot technologische ontwikkeling zijn gedaan in deze studie¹²:

- De productiecapaciteit van een windturbine schaalst tot 2030 op van 2 naar 5, 10 en 15 MW (zie Tabel 2):

Tabel 2 Verwachte ontwikkeling installatie en decom van OWF

Aangenomen individuele windturbinegenerator (WTG) capaciteit [MW]	Installatie-periode	Decommissioning-periode (operationele levensduur 20-25 jaar)	Decommissioning-periode (operationele levensduur 25-30 jaar)
2	2000-2007	2020-2032	(niet van toepassing)
5	2008-2015	2028-2040	2028-2045
10	2016-2025	2036-2050	2041-2050
15	2026-2030	2046-2055	2051-2055 ¹³

Het offshore windpark systeem zoals beschouwd in deze analyse bestaat uit vijf deelsystemen, die op hun beurt bestaan uit één of meerdere componenten. De systeemstructuur is weergegeven in Tabel 3.

Tabel 3 Opbouw offshore windpark-systeem

Systeemniveau	Deelsysteemniveau	Componentniveau
Wind turbine generator	Support structures	Monopile
		Transition piece
		Cable tubing and protection
		Scour protection
	Tower	Tower structure
		Internals
	Nacelle	Bed Plate
		Cover/Frame
		Mechanical break
		Yaw System
		Drive train (incl. shaft, bearings and gearbox)
		Shaft
		Gearbox (not for direct drive wind turbines)
		Generator
	Transformer	
	Rotor	Hub
		Nose cone
Pitch system		
Blades		
Balance of plant	Subsea array cables	Subsea array cables

¹² Roelofs, B (2020) Material recovery from Dutch Wind Energy, TU Delft Universiteit Leiden TNO

¹³ De tijdshorizon van dit onderzoek eindigt in 2050. Turbines welke gedecommissioned worden na 2050 vallen daarmee buiten de scope van dit onderzoek.

- Voor de **support structure** in deze studie zijn de volgende aannames gedaan:
 - Er wordt alleen rekening gehouden met monopile-fundaties.
 - We variëren de verschillende zeebodetypes niet en nemen een waterdiepte aan van 20m. Dit leidt ertoe dat de turbinegrootte bepalend is voor de massa van de support structure.
 - De monopile heeft een massa van 800-2000 ton per turbine. De transition piece heeft een massa van 300-500 ton per turbine.
- Voor de **tower** in deze studie zijn de volgende aannames gedaan:
 - De naafhoogte wordt beschouwd als een indicator voor de torenmassa. Turbine capaciteiten van 2 tot 15 MW geven een geschatte hoogte (h) van 80 m tot 150 m. Er wordt aangenomen dat deze lineair toeneemt.
- Voor de **nacelle** in deze studie zijn de volgende aannames gedaan:
 - Hub en bodemplaat: Voor de hub wordt 9,4 ton/MW aangenomen. De bodemplaat wordt geschat op 4,7 t/MW. Aangezien meer geïntegreerde, complexe ontwerpen van windturbines worden verwacht, worden alleen gietijzeren bodemplaten gebruikt om complexere geometrie in de toekomst mogelijk te maken.
 - Het gewicht van de shaft is geschat op 3,13 t/MW.
 - Voor de roadmap voor generatortechnologie is de studie van Viebahn et al (2015)¹⁴ gebruikt: Lineaire toename tot een marktpenetratie van 40% door direct drive permanent magnet generators (DDPMGG) en een toename van 40% naar 60% voor geared medium speed permanent magnet generators (MSPMG) tussen 2020 en 2050. Hiermee wordt aangenomen dat de geared asynchronous generators (AG) uitgefaseerd worden tot 2050. Door het kleine marktaandeel van high-speed permanent-magnet generators (HSPMG) wordt deze technologie in de analyse niet meegenomen.
 - De massa van de gearbox wordt geschat op 10,59 t/MW en wordt toegepast voor AG- en MSPMG-drive trains volgens het aandrijfscenario.
 - De massa van de generators varieert met verschillende generatorconcepten.
- Voor de **rotor** in deze studie zijn de volgende aannames gedaan:
 - De massa van het rotordeelsysteem neemt lineair toe met de turbinecapaciteit.
 - Voor het totale bladgewicht wordt 12,5 t/MW aangenomen met een glasvezelgehalte van 54,4% en een koolstofvezelgehalte van 6%¹⁵. De vezeldichtheid van het composiet is daarmee 60,4%.
 - De massa van de hub (11,5 t/MW), Nose cone (0,65 t/MW) en het pitch mechanism (2,98 t/MW) completeren de rotor.
- Voor de **subsea array cables** in deze studie zijn de volgende aannames gedaan:
 - Per windturbine wordt 1000 meter aan inter-array cable aangelegd
 - Aansluitingsstukken, J-tubes, moffen en andersoortige kabel-gerelateerde componenten worden buiten beschouwing gelaten.

De "bill of materials" (zie Tabel 4), omschrijft de samenstelling per component. Hierbij wordt ingezoomd op de grootste materiaalstromen. In deze tabel is ook aangegeven hoe de vertaalslag is gemaakt van dimensies van verschillende generaties windturbines naar materiaalhoeveelheden.

14 Viebahn, P., Soukup, O., Samadi, S., Teubler, J., Wiesen, K., Ritthoff, M. (2015). Assessing the need for critical minerals to shift the German energy system towards a high proportion of renewables. *Renew. Sustain. Energy Rev.* 49, 655-671.

15 Bron Thesis Bas Roelofs, TNO

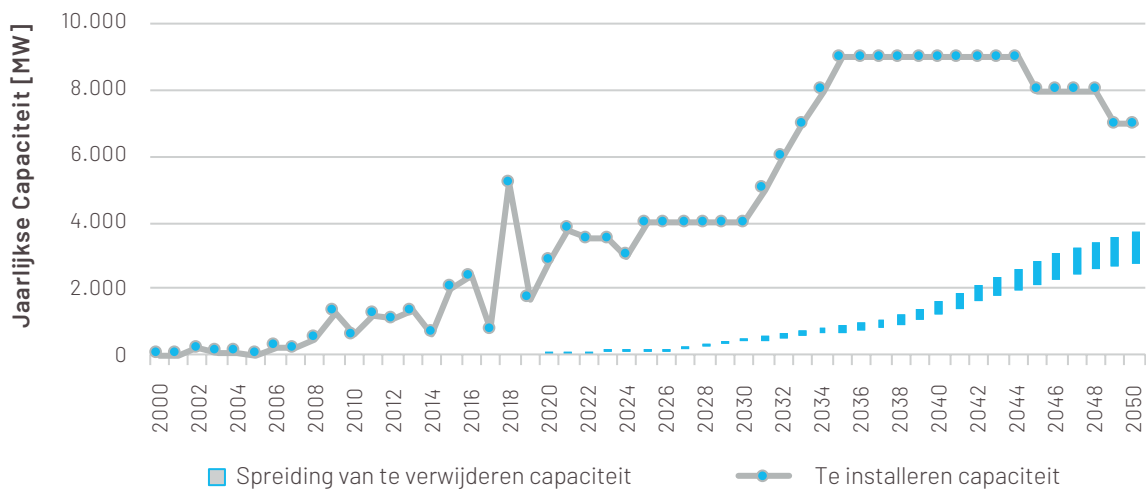
Tabel 4 Bill of materials van OWF

Assembly	Components	Mass intensity [t/MW]	Base material(s)
Rotor	3 blades	12.5	Composite
	Hub	11.522	Spheroidal graphite cast iron
	Nose cone	0.649	Steel/aluminium structure + GFRP cover
	Pitch mechanism	2.979	Alloy steel gears/bearings + cast iron casing + copper windings
43% Copper			
Nacelle	Overall Weight	45.04	Highly mixed
	Yaw mechanism	4.93	Alloy steel gears/bearings + cast iron casing + copper windings
	Transformer	4.85	Iron, Copper, Aluminium
	Bed plate	5	Steel/cast iron
	Cover	2.424	GFRP + structure
	Shaft DD	1.05	Alloy steel
	Shaft geared	3.13	Alloy steel
	Gearbox	10.6	
	Generator (AG)	$mass_{AG} = 0.3 \cdot P^2 + 3.65 \cdot P$	Iron, copper, (magnet)
		$mass_{Iron} = 0.29 \cdot P^2 + 3.19 \cdot P$	
		$mass_{Copper} = 0.1834P$	
	Generator (MSPMG)	$mass_{MSPMG, Iron} = 0.2675 \cdot P^2 + 2.9175 \cdot P$	
		$mass_{MSPMG, copper} = -0.00823 \cdot P^2 + 0.356225P$	
		$mass_{MSPMG, magnet} = 0.0895 \cdot P^2 + 0.06275P$	
	Generator (DDPMG)	$mass_{DDPMG} = 1.2114 \cdot P^2 + 13.324P$	
		$mass_{DDPMG, iron} = 1.0682 \cdot P^2 + 11.655P$	
		$mass_{DDPMG, copper} = -0.0329 \cdot P^2 + 1.4249P$	
		$mass_{DDPMG, magnet} = 0.0358 \cdot P^2 + 0.269P$	
Tower	Tower	$mass_{Tower} = 0.048h^2 - 2.0235h + 28.068$	Steel
Support Structure	Transition piece	Average/turbine	S355 steel
	Foundation	Average/turbine	S355 steel
Cables	Array Cables/ Turbine	36.2 km/tonnes. Required at least 8D	Copper, steal, lead, HDPE

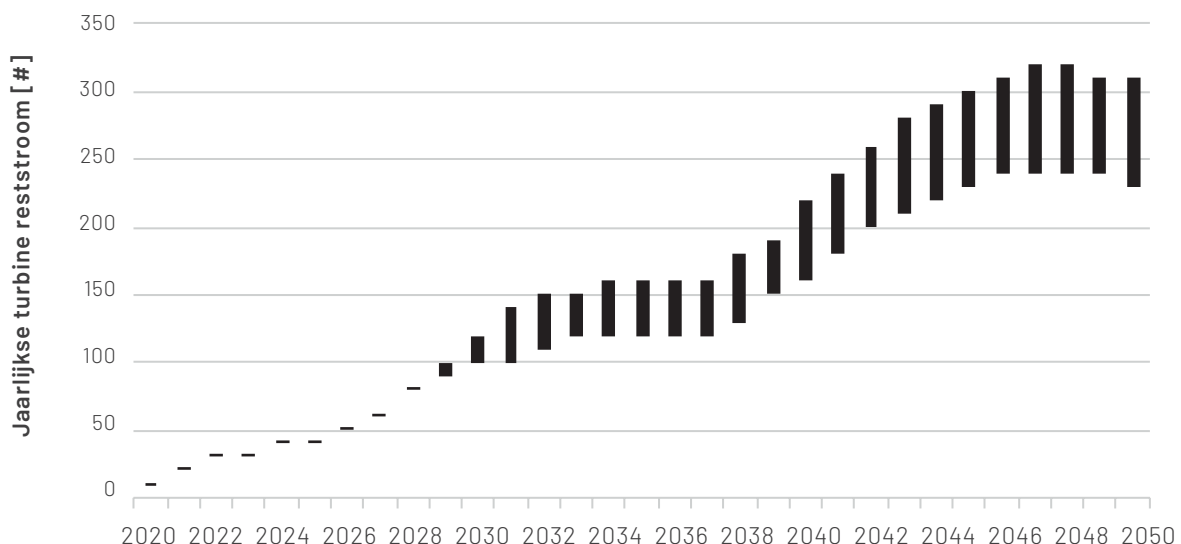
Uit deze bill of materials wordt duidelijk dat voor een 10 MW turbine 77% van het gewicht per MW uit stalen componenten bestaat, en dan voornamelijk de monopile, transition piece en tower. Compositie componenten, voornamelijk de turbine bladen, vertegenwoordigen 6% van het gewicht. De rest van het gewicht is te herleiden naar componenten met een complexere samenstelling. Op geaggregeerd niveau zal in de volgende paragraaf het totaal aan beschikbaar komend materiaal besproken worden.

2.2 Te verwijderen offshore windparken en bijbehorende materiaalstroom

De wind turbine systemen zullen na hun operationele levensduur van 20-25 jaar of 25-30 jaar ontmanteld en verwijderd moeten gaan worden. Het verloop van het geïnstalleerd vermogen zal in grote lijnen de hoeveelheid van de te verwijderen wind turbines per jaar bepalen, zoals te zien is in Figuur 3 en Figuur 4. In de zuidelijke Noordzee zal de hoeveelheid jaarlijks te verwijderen capaciteit tussen 2020 en 2050 stijgen van 20 MW tot maximaal 3700 MW.

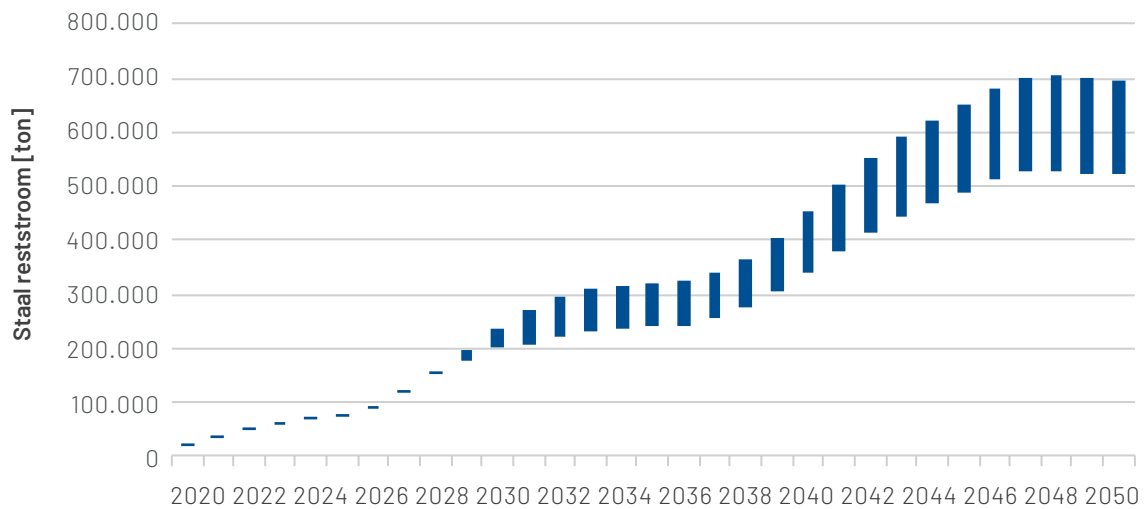


Figuur 3 Prognose van jaarlijks te installeren en te verwijderen offshore windcapaciteit [MW] (spreiding is gebaseerd op variatie levensduur van 20-25 jaar tot 25-30 jaar)

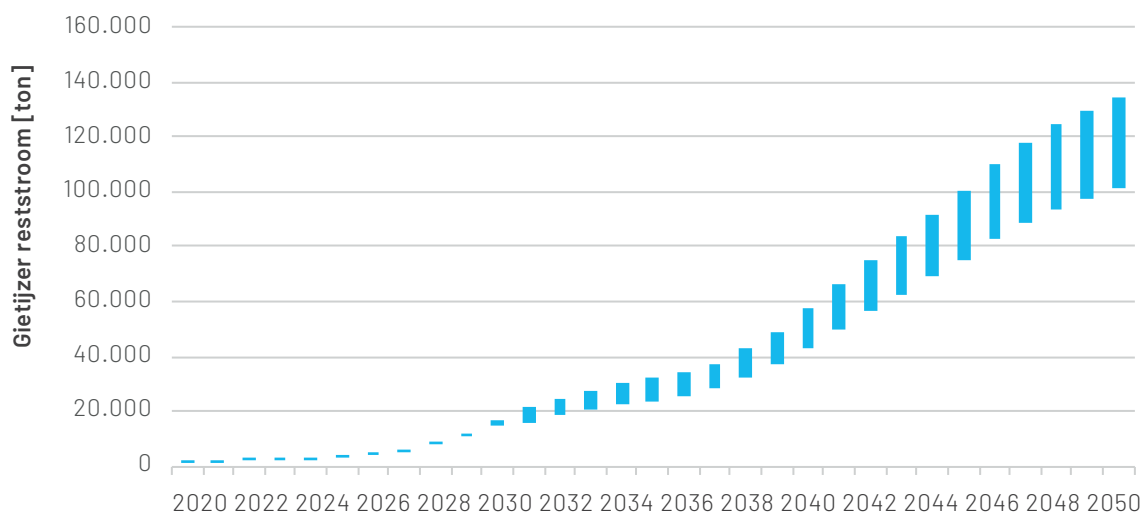


Figuur 4 Prognose jaarlijkse turbine reststroom vanaf de Noordzee [#] (spreiding is gebaseerd op variatie levensduur van 20-25 jaar tot 25-30 jaar)

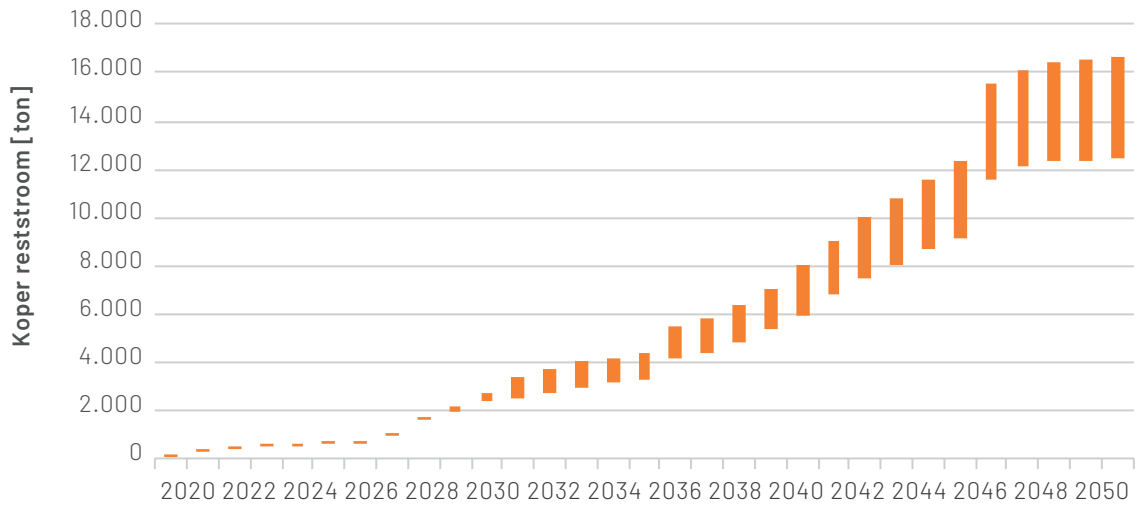
Op basis van de jaarlijks geïnstalleerde vermogens, operationele levensduur en de systeem- en materiaalsamenstellingen is de totale materiaalstroom bepaald. De materiaalstromen met de grootste omvang zijn weergegeven in figuren 5 t/m 9.



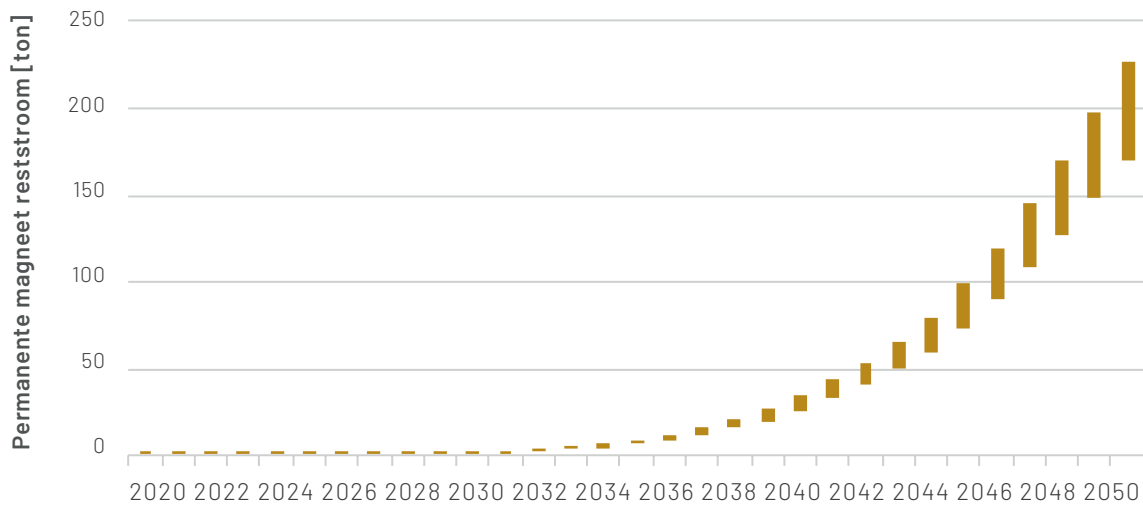
Figuur 5 Staal reststroom [ton] a.g.v. OWF decommissioning in Zuidelijke Noordzee (20-25 en 25-30 operationele levensduur)



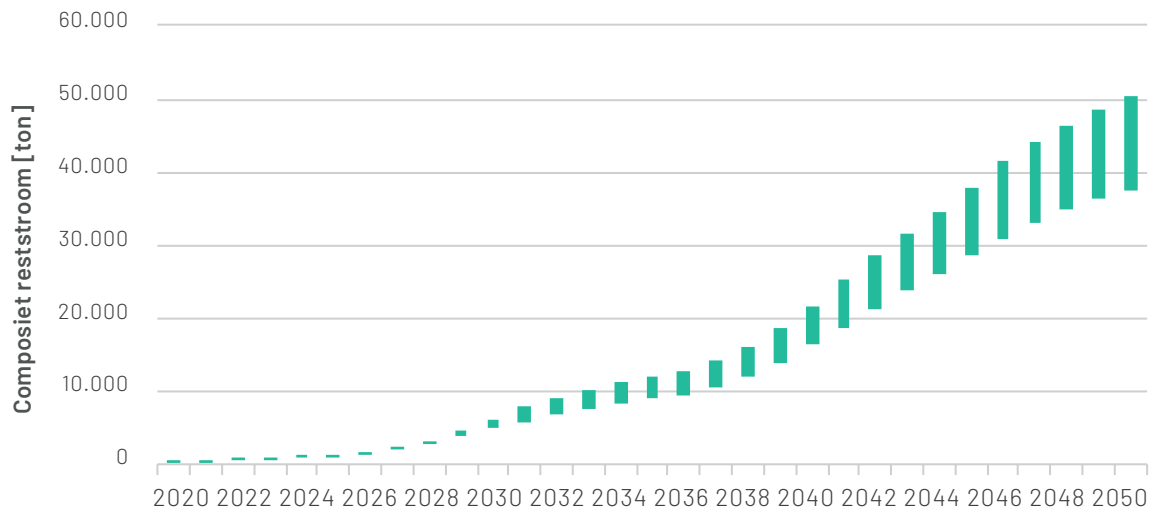
Figuur 6 Gietijzer reststroom [ton] a.g.v. OWF decommissioning in Zuidelijke Noordzee (20-25 en 25-30 operationele levensduur)



Figuur 7 Koper reststroom [ton] a.g.v. OWF decommissioning in Zuidelijke Noordzee (20-25 en 25-30 operationele levensduur)



Figuur 8 Permanente magneet neodmium-legering reststroom [ton] (NdFeB) a.g.v. decommissioning in Zuidelijke Noordzee (20-25 en 25-30 operationele levensduur)



Figuur 9 Composiet reststroom [ton] a.g.v. OWF decommissioning in Zuidelijke Noordzee (20-25 en 25-30 operationele levensduur)

Op basis van deze analyses wordt in hoofdstuk 3 een inschatting gemaakt van de daarmee mogelijk verbonden economische bedrijvigheid.



Regelgeving en decommissioning van offshore windparken

3.1 Afspraken in Nederlandse en buitenlandse tenderprocedures

De mate waarin nagedacht en geïnvesteerd wordt in decommissioning van OWF wordt (in afwezigheid van directe markturgentie) grotendeels bepaald door de wijze waarop decommissioning tijdens de tenderingprocedure in regelgeving is vastgelegd. Daarbij speelt het eventuele verschil in regelgeving tussen landen rond de zuidelijke Noordzee een belangrijke rol in de ambitie vanuit Nederland een rol te spelen in de ontmanteling van OWF in dat gehele gebied.

In het rapport "Market Analysis DecomTools"¹⁶ wordt een overzicht gegeven van het vigerende beleid in Nederland, België, Duitsland, het Verenigd Koninkrijk en Denemarken. Hieronder volgt een kort overzicht.

In België is specifieke regelgeving niet gemaakt en wordt verwezen naar de grote onzekerheden die nog rond decommissioning spelen. Een bankgarantie t.b.v. decommissioning moet worden afgegeven alvorens gebruik van de vergunning te kunnen maken en een nog later te bepalen verplichting om de site in originele staat achter te laten is opgenomen in de tenderregels.

In Denemarken bevat de constructie-vergunning de verplichting voor de windparkeigenaar de ontmanteling voor zijn rekening te nemen en de bodem in oorspronkelijke staat te herstellen. Een integraal plan voor decommissioning moet minimaal 2 jaar vóór de uiteindelijke decommissioning aangeboden worden. Denemarken vraagt een bankgarantie die maximaal 12 jaar na ingebruikname moet worden afgegeven. Die bedraagt (voor een heel windpark) minimaal 80 miljoen euro (waarvan minimaal 14 miljoen afkomstig van een financiële instelling).

De focus in Duitsland is sterk gericht op het behalen van vermogensdoelstellingen en regelgeving voor decommissioning en de end-of-life-fase is nog niet gedefinieerd.

Het Verenigd Koninkrijk heeft als enige een volledig decommissioning-programma opgezet¹⁷. Voordat vergunningen worden afgegeven moet een plan beschikbaar zijn waarin de ontwikkelaar aangeeft hoe de installatie ontmanteld gaat worden en hoe de kosten daarvoor gedekt zullen worden.

In Nederland is soortgelijke regelgeving in werking. De regelgeving is vastgelegd in de Waterwet en het zogenaamde Kavelbesluit. Ook hier staat in de vergunning (die momenteel wordt afgegeven voor 30 jaar) dat tijdens decommissioning alle geplaatste materialen dienen te worden verwijderd (alhoewel hier door de minister van afgeweken mag worden). Bij het afgeven van de vergunning dient een bankgarantie te worden overlegd ter waarde van 120 kEUR/MW, die door RVO wordt beheerd. Het is niet duidelijk waar de

16 DecomTools report sponsored under Interreg North Sea Region – Project Number: 20180305091606, main author Mirko Kruse (Hamburg Institute of International Economics)

17 www.assets.publishing.service.gov.uk/government/uploads/system/uploads/attachment_data/file/80786/orei_guide.pdf

schatting, afgegeven door het Ministerie van I en W, op is gebaseerd¹⁸. Minstens 12 jaar na begin van de inwerkingstelling wordt dit bedrag door het ministerie opnieuw vastgesteld. Dit bedrag wordt elk jaar geïndexeerd met 2% en slechts korte tijd voor de uiteindelijke ontmanteling (maximaal 8 weken) hoeft een decommissioning-plan te worden ingediend.

3.2 Afvalwerkingsrichtlijnen

De verwerking van alle afvalstoffen is vastgelegd in het Landelijk Afvalpreventieplan LAP3. Daar waar het LAP3 voor metalen 'recycling' als minimale standaard voorschrijft, is de situatie m.b.t. glasvezelversterkt composiet gecompliceerder. In het LAP3 is vastgelegd dat de minimale afvalverwerkingsmethode "nuttig hergebruik, waaronder hoofdgebruik voor brandstof" is. Specifiek wordt in LAP3 voor thermohardende kunststoffen (waaronder composieten) vermeld "Indien verwerking van thermohardende kunststoffen zo duur is dat de kosten voor afgifte door de producent/ontdoener meer zouden bedragen dan 205 EUR/ton, is de minimumstandaard 'hoofdgebruik als brandstof (als vorm van nuttige toepassing)' binnen inrichtingen waarin emissiebeperking is gereguleerd in specifieke regelgeving en/of daarop gebaseerde vergunningen".

In Duitsland heeft men de mogelijkheid om glasvezelversterkte composieten in te zetten in de zogenaamde cement-kiln-route. Mede als gevolg daarvan is storten in Duitsland verboden en de cement-kiln-route verplichtend opgelegd.

18 De verwijdering van energie-installaties (Deel I): offshore installaties, mr. M.J.J. van Beuge, https://www.houthoff.com/media/Houthoff/Publications/mvanbeuge/De_verwijdering_van_energie-installaties__Deel_I__offshore_installaties__NTE_2016_5_.PDF

De waardeketen en kosten-baten verdeling

4.1 Activiteiten en stakeholders

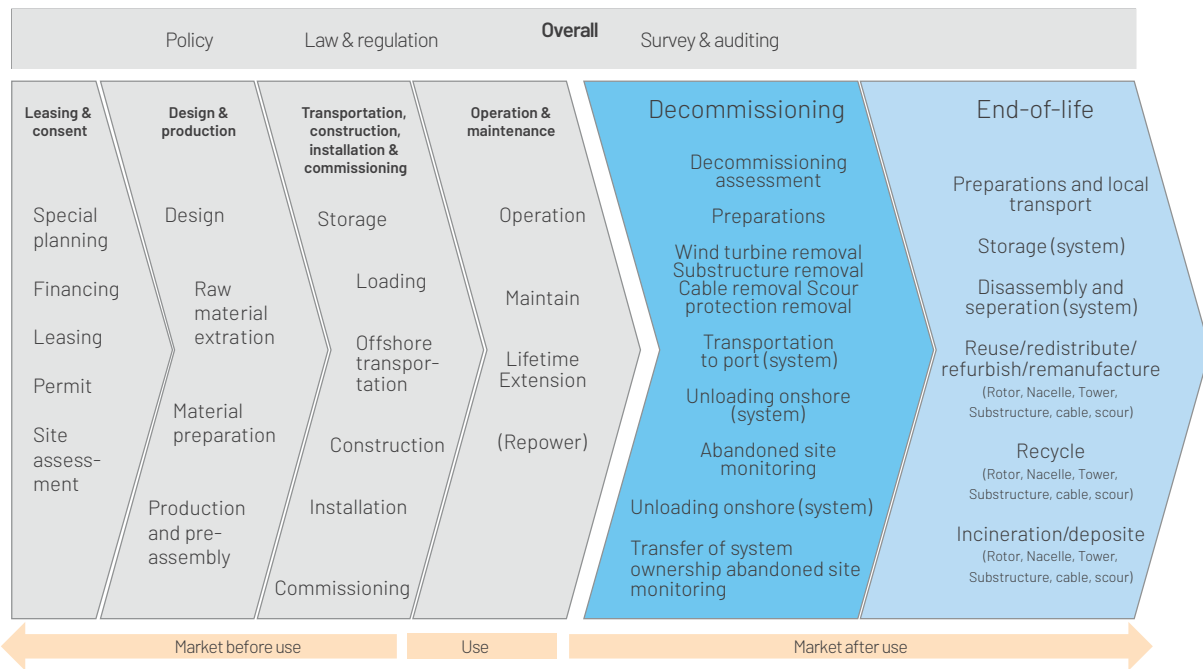
Het opzetten van bedrijvigheid rondom decommissioning vereist de aanwezigheid van een complete waardeketen. Het begrijpen van de rollen en functies van actoren in die waardeketen geeft inzicht in de relaties die de actoren in het netwerk met elkaar verbinden en daarmee ook in randvoorwaarden nodig voor het ontwikkelen van bedrijfsmatige activiteiten. Inzicht in de waardeketen is tevens noodzakelijk om de impact van (bijvoorbeeld technologische) veranderingen op de positie van verschillende spelers te kunnen inschatten. Op basis van de activiteitenanalyse kunnen actor-specifieke kosten, baten en benodigdheden worden bepaald en kunnen vervolgstappen richting een ecosysteem voor decommissioning en end-of-life activiteiten in Zuid-Holland worden uitgezet (NB: een overzicht van regionale ketenpartners is gegeven in Tabel 11, op pagina 51).

De volgende aannames zijn gedaan tijdens de uitwerking en analyse van de decommissioning en end-of-life activiteiten:

- Dit onderzoek richt zich op het volledig verwijderen van OWF. Activiteiten gericht op levensduurverlenging door componentvervanging en site repowering (d.w.z. de volledige verwijdering en herinstallatie van het WTG systeem) vergen een site-specifieke benadering en worden buiten beschouwing gelaten
- Per windpark varieert de afstand tussen het windpark en de haven van 20 tot 500 km.
- Decommissioning-activiteiten vinden het hele jaar door plaats. Een gemiddelde weersvertraging van 30% is aangenomen. (10% zomer, 70% winter).
- De schepen¹⁹ die voor de installatie van het windpark worden gebruikt, zullen in staat zijn om de decommissioning-activiteiten uit te voeren. De markt voor installatieschepen ontwikkelt zich echter voortdurend, al naar gelang de veranderende eisen op de markt. Aangenomen wordt dat oorspronkelijke installatieschepen niet zullen worden ontmanteld, of dat nieuwe schepen met vergelijkbare capaciteiten voor gelijke kosten inzetbaar zijn.

De decommissioning- en end-of-life activiteiten vormen de laatste twee fasen van de totale offshore wind-waardeketen (zie Figuur 10).

¹⁹ Wind Turbine Installation Vessel, heavy lift vessel en kabellegschip



Figuur 10 Offshore wind waardeketen met activiteiten per fasen.

In de decommissioning fase worden zes activiteiten gefaseerd uitgevoerd²⁰:

Decommissioning assessment (D1):

Betrokken partijen: windpark-eigenaar, decommissioning service provider.

- End-of-life-strategieën van windparken vereisen een langetermijnplanning waarbij tijdsonzekerheid een grote rol speelt: het moment waarop het windpark daadwerkelijk uit bedrijf gaat kan om uiteenlopende redenen in de verre toekomst sterk variëren. De windpark-eigenaar zal een end-of-life strategie moeten opstellen.
- Voorafgaand aan de verwijdering van de systemen zal een decommissioning assessment nodig zijn. Deze assessment zou het volgende moeten omvatten: budget en tijdschema, afvalbeheer, ontvangende haven- en onshore-activiteiten, verwijzing naar relevante wet en regelgeving, het decommissioningproces en -methoden, public relations management, de identificatie van gevaarlijke materialen, risico-identificatie en -mitigatie. Daarnaast zijn een milieueffectrapportage (MER), aanvragen van vergunning en aantoonbare naleving van regelgeving en de uitwerking van het aanbestedingsproces waardevolle voorbereidingen.

Vorbereidingen (D2):

Betrokken partijen: windpark eigenaar, decommissioning service provider, coördinator logistiek, maritieme contractor, havenbedrijf.

- Diverse voorbereidingen zullen getroffen moeten worden voordat overgegaan kan worden op de verwijderingsactiviteiten:
 - Schip-specifieke voorbereidingen: een Wind Turbine Installation Vessel, heavy lift vessel en kabellegschip of schepen met vergelijkbare capaciteiten zullen de verwijdering uitvoeren. De schepen die voor de installatie van het windpark zijn gebruikt zullen tevens in staat zijn om de parken te ontmantelen. Het risico bestaat echter dat - op het moment van ontmanteling - de

20 Chapter 22 ODIN-WIND: An Overview of the Decommissioning Process for Offshore Wind Turbines Johan Finsteen Gjørdvad and Morten Dallov Ibsen: <https://link.springer.com/content/pdf/10.1007%2F978-3-319-39095-6.pdf>

oorspronkelijke installatieschepen zelf kunnen zijn ontmanteld doordat de markt voor installatieschepen zich heeft doorontwikkeld op basis van de vraag naar andere gewenste installatieprestaties. Schepen zullen tevens moeten voldoen aan emissie-, geluid-, en gevaarlijke stoffen-richtlijnen van de ontvangende haven.

- Voorbereidingen in de haven: de haven waaruit de decommissioningactiviteiten zullen plaats gaan vinden zal moeten voldoen aan specifieke eisen. Deze eisen zullen afhankelijk zijn van de te ontvangen systemen en de in te zetten schepen. Voorbeelden van noodzakelijke randvoorwaarden in havens zijn: vaarwaterbreedte en -diepte, vrije doorganghoogte, acceptabele scheepslengte in de haven, kade capaciteit (ton per m²), aanwezige mobiele kranen op de kade, zeebodembodemkwaliteit (in het geval van zelfaflandende jack-up barges) en (tijdelijke) opslagruimte in de haven.
- Voorbereidingen binnen het windpark: afkoppeling van elektronische apparatuur, los koppelen en hijsklaar maken van subsystemen, etc.

Verwijdering en transport van WTG (D3):

Betrokken partijen: decommissioning service provider, coördinator logistiek, maritieme contactor.

- De verwijdering van het windturbinesysteem (rotor, nacelle en tower) kan benaderd worden als een omgekeerd installatieproces. Randvoorwaarden zijn: beschikbaarheid van een compleet en juist gedocumenteerd installatieproces. Na verwijdering worden de deelsystemen naar de ontvangende haven getransporteerd.

Verwijdering en transport van support structure (D4):

Betrokken partijen: windpark eigenaar, decommissioning service provider, coördinator logistiek, maritieme contractor, havenbedrijf.

- De verwijdering van (een deel van) het support systeem (transition piece, foundation) kan benaderd worden als het omgekeerde installatieproces. Randvoorwaarden zijn ook hier de beschikking over het compleet en juist gedocumenteerde installatieproces. Diverse technologische ontwikkelingen zijn in ontwikkeling om tot een efficiënter proces te komen (zie hoofdstuk 5).
- Na verwijdering worden de deelsystemen naar de ontvangende haven getransporteerd.

Verwijdering en transport van inter-array cables (D5):

Betrokken partijen: decommissioning service provider, coördinator logistiek, maritieme contractor.

- Verwijdering van de inter-array cables kan benaderd worden als het omgekeerde installatieproces. Randvoorwaarden: beschikking over het compleet en juist gedocumenteerde installatieproces. Na verwijdering worden de deelsystemen naar de ontvangende haven getransporteerd.

Afladen op land (D6):

Betrokken partijen: decommissioning service provider, coördinator logistiek, maritieme contractor, havenbedrijf.

Eigendomsoverdracht van systemen (D7):

Betrokken partijen: windpark eigenaar, herinzet specialist, materiaalspecifieke recycling specialist, afnemers herinzet/recycalaat.

- De overdracht van de verdere verwerking van de ontmantelde systemen en materialen vindt als laatste activiteit in de decommissioningfase plaats.

Na de decommissioningfase begint de end-of-life fase²¹, die bestaat uit verschillende verwerkingsmethodes en de voorbereidingen daarvoor. De activiteiten worden hieronder toegelicht.

Vorbereiding en landtransport (EOL1):

Betrokken partijen: dienstverlener logistiek, afvalverwerker.

- Het vervoer van de haven naar de locatie waar de volgende end-of-life activiteit plaats vindt, inclusief mogelijk randvoorwaardelijke (mechanische) verkleining van grote systeemdelen.

Opslag (EOL2):

Betrokken partijen: materiaal-specifieke recycling specialist, herinzet specialist, afvalverwerker.

- Het opbergen van systemen in lijn met wensen en/of eisen van de eigenaar van de systemen en de geldende wet- en regelgeving.

Demontage en scheiding (EOL3):

Betrokken partij: afvalverwerker.

- Afhankelijk van de vervolg activiteit (EOL4 A-C) zullen systemen gedemonteerd dienen te worden en/of vind een scheiding van materialen plaats. Afhankelijk van het type materiaal zijn specifieke veiligheidsvoorschriften van toepassing.

Hergebruik van systemen (EOL4A):

Betrokken partij: herinzet specialist en eindgebruiker.

- Hergebruik (re-use, redistribute, refurbish of remanufacture) kan in de originele functie of in een andersoortige functie plaatsvinden.
- Hergebruik van systemen met als doel om opnieuw een functie te vervullen als offshore windpark component kent grofweg twee smaken: hergebruik in samenwerking met de originele fabrikant of hergebruik via een onafhankelijke marktpartij.
- Hergebruik van systemen met als doel om een andersoortige functie te vervullen houdt in dat de systemen onderdeel worden van andere leveringsketens. Afhankelijk van de uiteindelijke functie kan gesproken worden over hoogwaardig of laagwaardig hergebruik.

Recycling van materialen (EOL.4B):

Betrokken partijen: materiaal-specifieke recycling specialist, afvalverwerker.

- Recycling middels bestaande ketens: Het afvalverwerkingsproces voor componenten met hoge percentages metaal zal middels huidige ketens verwerkt kunnen worden tot metaal-recycklaat. De restwaarde van dit recycklaat zal in grote mate bepaald worden door de marktprijs voor recycklaat en de kwaliteit van het recycklaat ten opzichte van nieuw materiaal.
- Recycling middels nieuwe ketens: wanneer er geen afvalverwerkingsketen bestaat voor het recyclen van specifieke componenten en materialen zullen er nieuwe ketens kunnen ontstaan wanneer de business case voor de te leveren dienst positief en het onderliggende business model gezond is.

Verbranden, storten (EOL.4C):

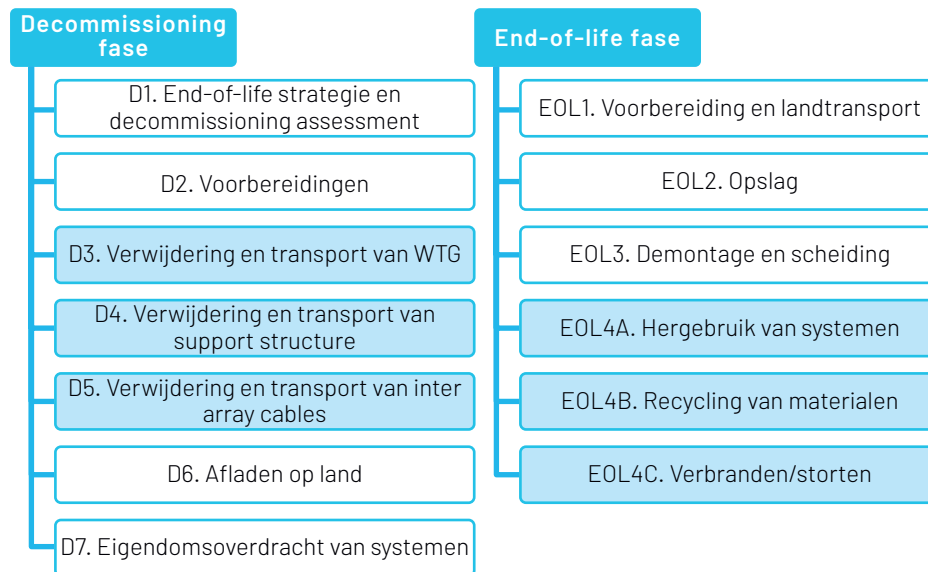
Betrokken partijen: afvalverwerker, afnemer restwarmte.

- Als materialen niet gerecycled kunnen worden is gedeeltelijke afvalverbranding mogelijk om energie te genereren en te leveren aan afnemers. Verbranding van kunststoffen kan leiden tot milieu- en gezondheid belastende gasuitstoot en/of significante slakvorming die gestort zullen moeten worden. In specifieke situaties is afvalstorten mogelijk. De wet- en regelgeving rondom verbranding en storten verschilt per (Europees) land.

21 Chapter 22 ODIN-WIND: An Overview of the Decommissioning Process for Offshore Wind Turbines Johan Finsteen Gjørdvad and Morten Dallov Ibsen: <https://link.springer.com/content/pdf/10.1007%2F978-3-319-39095-6.pdf>

4.2 Economische bedrijvigheid

Op basis van de systeem- en materiaalstromen (hoofdstuk 2) en de in de vorige paragraaf omschreven activiteiten kan een eerste verkenning worden gemaakt van de (basis voor) economische bedrijvigheid die kan ontstaan binnen de decommissioning fase en end-of-life fase. De volgende blauw gekenmerkte activiteiten worden in de navolgende paragrafen nader uitgewerkt.



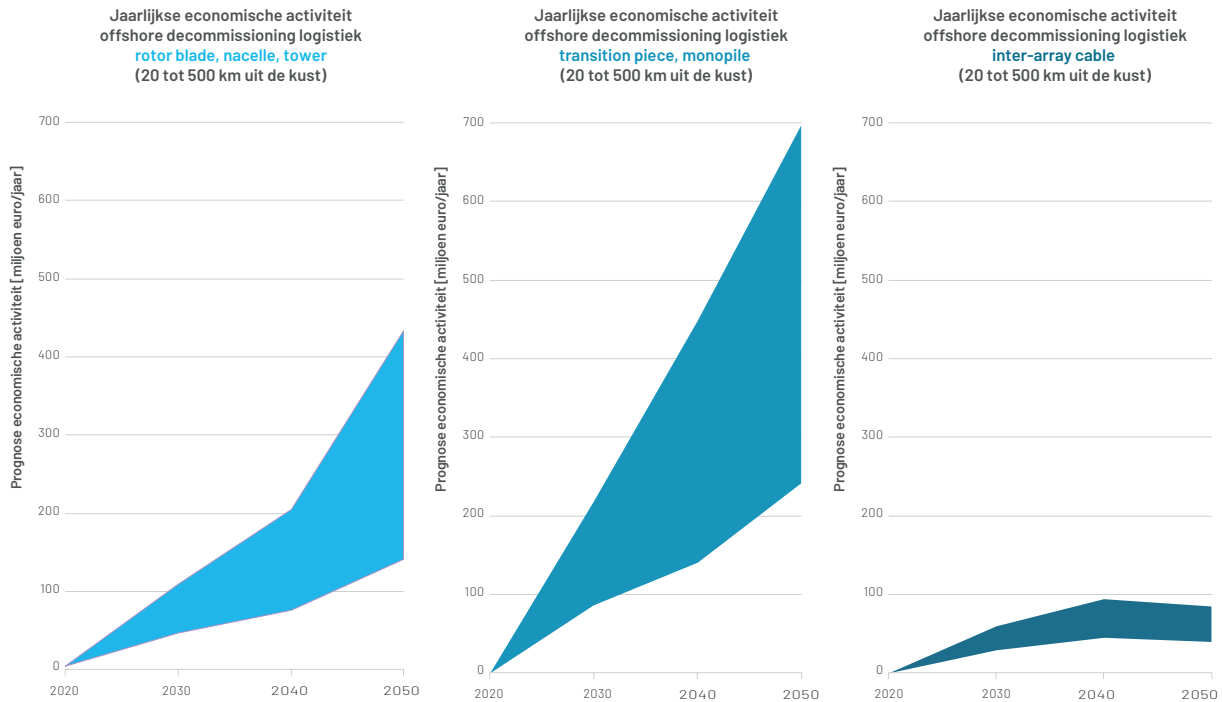
4.2.1 Verwijdering en transport van WTG, support structure en inter-array cables (D3-5)

De verwijderingsopgave kan gezien worden als een logistiek optimalisatieprobleem met uiteenlopende variabelen. Voorbeelden van variabelen zijn: de locatie van het windpark, afstand tot havenlocatie, benodigde scheepstypen en apparatuur afhankelijk van een turbine type, weerpatronen, transportfaciliteiten over land en afvalverwerkingsfaciliteiten op land. De onzekerheid rondom deze variabelen, de onderlinge afhankelijkheden en offshore windsector ontwikkelingen tussen 2020 en 2050 leiden ertoe dat slechts een ruwe inschatting van potentiële economische bedrijvigheid vanuit een Nederlandse haven gemaakt kan worden.

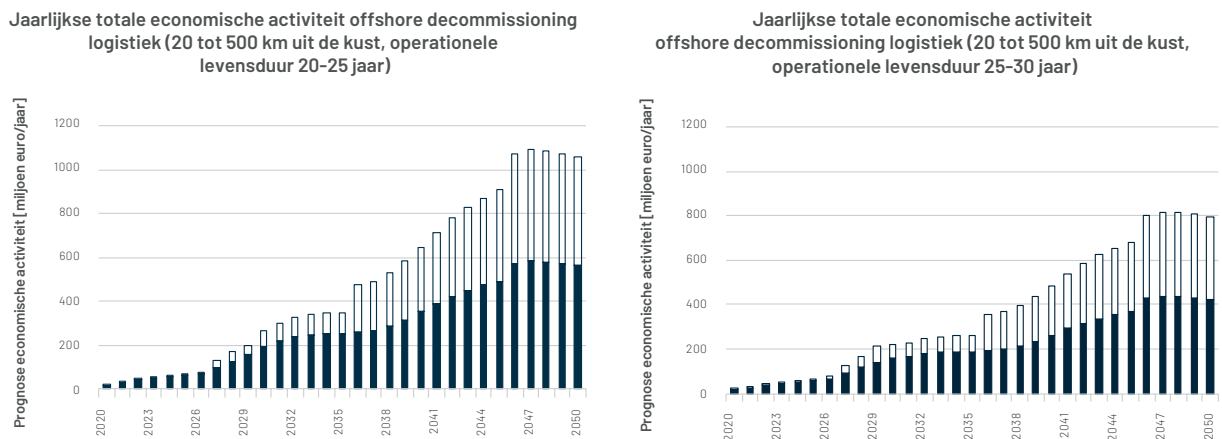
Daarbij wordt er vanuit gegaan dat de verwijderings- en verwerkingsopgave vanuit de regio Zuid Holland wordt verricht, gezien de eerder gekozen scope. Op basis van de verwachte ontmanteling van windturbine systemen per jaar en de aannames beschreven in Tabel 5 kan worden ingeschat dat de drie verwijderactiviteiten tezamen kunnen leiden tot een jaarlijkse economische activiteit zoals weergegeven in Figuur 11, en de totale activiteit zoals weergegeven in Figuur 12.

Tabel 5 Aannames voor inspanning bij ontmanteling van OWF

Parameter	Aanname
Afstand tussen windparken en haven	20 tot 500 kilometer
Schip A hijs- en laadvermogen 2-10 MW turbines	5,000 ton
Schip A dagtarief	€200.000 per dag
Schip B hijs- en laadvermogen 15 MW turbines	10,000 ton
Schip B dagtarief (bovengrens)	€400.000 per dag
Operationele uren on-site per WTG, support structure en array cable	17, 26 en 14 uur
Percentage weergereleerde vertraging	30%
Bemanningsaantal van schip	75
Bemanningsstarief	€140/uur



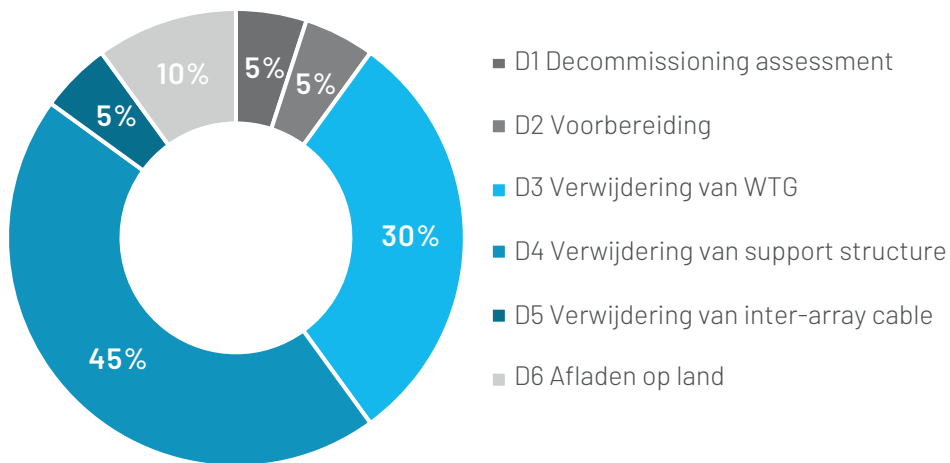
Figuur 11 Kosten gemoeid met ontmanteling van OWF (met ingeschatte levensduur 20-25 jaar)



Figuur 12 Totale logistieke kosten van decommissioning bij levensduur 20-25 jaar (links) en 25-30 jaar (rechts)

Wanneer voor decommissioning assessment (D1) 10% van de totale kosten gerekend wordt, voor de voorbereiding (D2) 5% en voor het afladen op land (D6) nogmaals 10%²², ontstaat de kostenverdeling voor de decommissioningfase zoals weergegeven in Figuur 13.

22 Inschattingen op basis van interviews met betrokken partijen uit de offshore keten.



Figuur 13 Kostenverdeling decommissioning activiteiten

Op basis van de aannames kan ook worden ingeschat in hoeverre de verwijderingskosten afhangen van de turbinecapaciteit (die varieert tussen de 2 en 15 MW) (zie Figuur 14). Het verwijderen van één 2 MW turbine kan €1.6M kosten, terwijl de kosten voor de verwijdering van een 15 MW turbine €3M kunnen bedragen. Dit leidt tot de inschatting dat de decommissioning kosten 8-20% van de total cost of ownership kunnen zijn wanneer de realisatiekosten van een offshore windpark €1,5-2M per MW zijn. Een belangrijke vraag voor verdere ontwikkeling en innovatie zal zijn in hoeverre deze kosten gereduceerd kunnen worden om het investeringsrisico van offshore windparken zo laag mogelijk te houden. De ontwikkelingen geschetst in hoofdstuk 5 kunnen in dat licht gezien worden.



Figuur 14 Decommissioning cost per MW als functie van turbinevermogen (blauw: OWF op 20 km; oranje: OWF op 500 km)

Eerdere studies geven inschattingen van 300-500kEU/MW voor 3-4 MW turbines (DNV-GL²³) en 40kEU/MW (CCC²⁴). De momenteel door RVO²⁵ geëiste bankgarantie voor windparkverwijdering bedraagt 120kEU/MW. Op basis van de aannames en resultaten uit dit onderzoek blijkt dat dit bedrag niet voldoende is om de verwijdering op zee te bekostigen, zeker voor de kleinere turbines. Overigens zijn de kosten en baten van de verwerking van de restmaterialen hierin niet meegenomen.

4.2.2 Hergebruik van systemen (EOL4A)

Hoogwaardig hergebruik van componenten ('Circulaire Windparken') zou eveneens tot hoogwaardige bedrijvigheid kunnen leiden (Bakker et al., 2018; Balkenende et al., 2017).

Op het moment is er geen zicht op een zelfstandige markt voor de herinzet van deelsystemen en componenten in hun primaire functie als onderdeel van een off-shore windpark. Twee redenen liggen hieraan ten grondslag:

- Er is een gebrek aan mogelijkheden om componenten uit te wisselen tussen turbintypes en verschillende fabrikanten. Standaardisatie zou dit mogelijk kunnen maken. De focus van de sector ligt echter op het optimaliseren van technische en economische prestaties en de hieruit volgende schaalvergroting van de turbines.
- Locatie-specifieke krachten van offshore windparken leiden tot locatie-specifieke ontwerpkeuzes. Het inschatten en accepteren van veiligheidsrisico's die op kunnen treden bij operaties onder andere krachten zal noodzakelijk zijn om volledige turbinesystemen te kunnen hergebruiken. Dit additionele risico is onwenselijk vanuit een investeerdersperspectief en operationeel veiligheidsperspectief van de windpark eigenaar.

Vooralsnog richten OEMs zich op het ontwerpen en produceren van nieuwe producten en is herinzet beperkt tot de spare part markt. Specifiek voor windturbinebladen zijn diverse verkenningen verricht naar rendabele en functionele toepassingen van het vezelversterkte (thermohardend) composiet^{26, 27}. Daarin wordt verkend of het composiet een nieuwe functie kan vervullen als bijvoorbeeld:

- oeverbeschoeiing;
- geluidsscherm;
- (voetgangers)brug;
- dakdelen;
- speelterreinen.

4.2.3 Recycling van materialen (EOL4B) en Storten/verbranden van composiet (EOL4C)

Economische activiteit op basis van recycling van restmateriaalstromen kan ontstaan door (1) het uitvoeren van het recycleproces en (2) de transactie van het recyclelaat van recyclepartij aan een afnemer. De operationele kosten per ton voor het recyclingproces variëren per materiaaltype, samenstelling en fabricagewijze van het uit bedrijf genomen systeem en de kwaliteit waarin het recyclelaat door een marktpartij vervolgens afgenomen wordt. De recycleproceskosten per materiaaltype zijn in dit onderzoek buiten beschouwing gelaten.

Restmateriaalstromen laten zich grofweg verdelen in twee groepen: een groep reststromen waar structureel een positieve marktwaarde aan te koppelen valt, en een stroom waar structureel ondersteuning nodig is om tot hoogwaardige en milieukundig verantwoorde verwerking te komen (oftewel: verwer-

23 DNV-GL (2015) Logistics and Cost Reduction of Decommissioning Offshore Wind Farms

24 Climate Change Capital (2010) Offshore Renewable Energy Installation Decommissioning Study [withdrawn report]

25 www.rvo.nl/onderwerpen/duurzaam-ondernemen/duurzame-energie-opwekken/woz/windenergiegebied-hollandse-kust-noord-kavel-v

26 Ten Busschen, A (2020) Industrial re-use of composites Reinforced plastics vol. 64

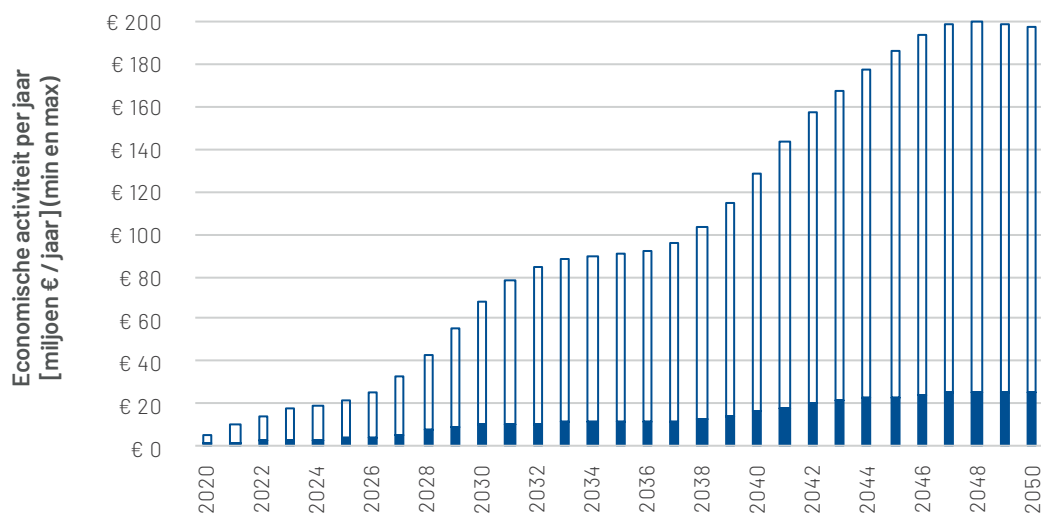
27 www.researchgate.net/project/Re-Use-and-Recycling-of-Decommissioned-Composite-Material-Wind-Turbine-Blades

kers vragen een gate fee voor milieukundig verantwoorde en toegestane verwerking). Op zich maakt dat niet veel uit voor de eventuele bedrijvigheid die daardoor kan ontstaan. Het verschil zit hem voornamelijk in de aard of herkomst van de nodige financiën. Voor de eerste groep zal de omzet afhangen van de geldende marktwaarde van het restproduct. Voor de tweede groep is van belang welke eisen worden gesteld aan verwerking door de regelgever (bijvoorbeeld de maximale kosten die gevraagd kunnen worden voor hoogwaardige verwerking).

Tabel 6 geeft de aangenomen restwaarden voor enkele metalen weer. Op basis van deze marktwaarden en de jaarlijkse restmateriaalstromen (met een aangenomen 5% materiaalverlies tijdens het recycle proces) geeft de tabel weer welke economische waarde gemoeid is met de doorverkoop van recyclaat. De onzekerheid van de materiaalmarktwaarde in de toekomst vertaalt zich door naar een onzekerheid in de beoogde restwaarden. Figuur 15 tot en met Figuur 17 geven de beoogde restwaarden van staal, gietijzer en koper.

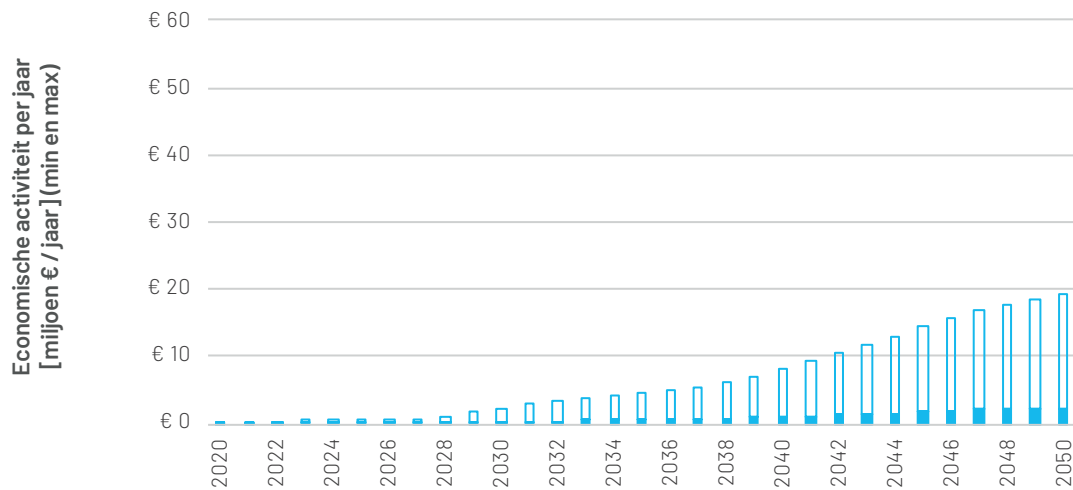
Tabel 6 (Aangenomen) marktwaarde voor scrapmetalen

Recyclaat	Scrap marktwaarde (min - max) [EUR/ton]
Staal	100 - 300
Gietijzer	50 - 150
Koper	500 - 6000
Neodymium ²⁸	40000 - 80000

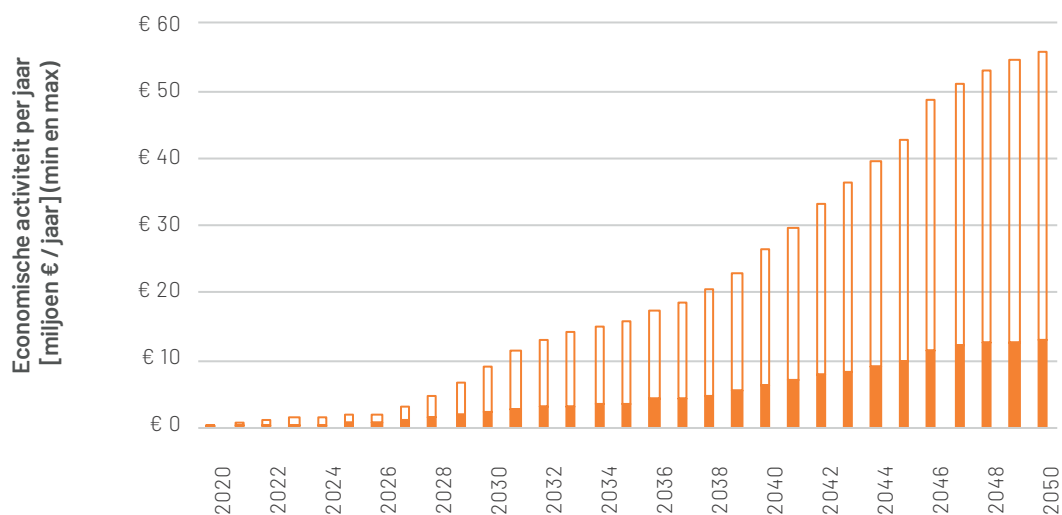


Figuur 15 Potentiële waarde van staalrecyclaat

28 Voor zeldzame aardmetalen als neodymium bestaat geen scrapwaarde. Hier is de waarde van 'virgin' materiaal genomen, onder de aanname dat hoogwaardig hergebruik alleen zal kunnen plaatsvinden bij opwerking naar virgin-kwaliteit.



Figuur 16 Potentiële waarde van gietijzer recyclaat uit OWF



Figuur 17 Potentiële waarde van koperrecyclaat uit OWF

Zoals in toegelicht door Topham²⁹ is het moment waarop scrap materiaal aan de markt aangeboden wordt van grote invloed op de restwaarde die de afvalstroom zal vertegenwoordigen.

4.2.4 Verdieping: windturbineblad recycling

Het meest intensief besproken onderwerp in de recente literatuur over decommissioning van windturbines is de verwerking van de turbinebladen die uit glasvezelversterkte (GFR) composiet bestaan. Ondanks veel onderzoek aan mechanische en chemische verwerking van deze materialen (die ook afkomstig zijn uit o.a. bootrompen en silo's) is op dit moment nog amper sprake van hoogwaardige inzet van de structuren of componenten.

Er zijn diverse oorzaken aan te wijzen die bijdragen aan de moeilijke verwerking van de bladen. Rotorbladmateriaal is een complexe structuur die is gemaakt van verschillende onderdelen en materialen die, afhankelijk van de fabrikant en het productiejaar, verschillende materiaaleigenschappen zullen hebben.

29 Topham et al (2019) Challenges of decommissioning offshore wind farms: Overview of the European experience

Na de operationele levensduur zullen bladen zich in verschillende staat bevinden, afhankelijk van hun ontwerp en de reden voor buitenbedrijfstelling. Direct hergebruik is daarom hooguit mogelijk voor toepassingen waarbij de sterkte van de structuur niet relevant is, of wanneer de materiaaleigenschappen voldoende te valideren zijn voor gebruik.

De 'marktwaarde' in het economisch verkeer kunnen we momenteel (in afwezigheid van alternatieve verwerkingsroutes) alleen inschatten op basis van de gate fees van toegestane verwerkingsroutes van GFRP. In Nederland is verbranding van bladen mogelijk indien de overdrachtskosten aan de afvalverwerkende partij hoger zijn dan 205 EUR / ton³⁰. In Duitsland is storten verboden en wordt de cement-kiln-route gevolgd dankzij de aanwezigheid van een productielocatie, met een minimale gate fee van 150 EUR / ton voor de turbine-eigenaar. De kosten en randvoorwaarden om vanuit Nederland gebruik te maken van deze cement-kiln route zijn niet verder onderzocht.

De aannames voor de kosten voor de verschillende stappen zijn gegeven in Tabel 7. Aangenomen wordt dat zagen en transport voor iedere vervolgactiviteit noodzakelijk is. Storten, verbranden en cement-kiln-verwerking zijn verschillende eindstations voor het composietmateriaal. Gegeven de eerder ingeschatte volumes van composiet volgen daaruit de in Figuur 18 gegeven mogelijke omzetten per jaar.

Tabel 7 Aannames m.b.t. kosten voor stappen in het GFRP-verwerkingsproces

Activiteit	Minimum [EUR/ton]	Maximum [EUR/ton]
Zagen (80x80 cm) en Transport	20	50
Shredderen	55	55
Storten	120	120
Verbranden	100	200
Cement-kiln verwerking ³¹	200	300

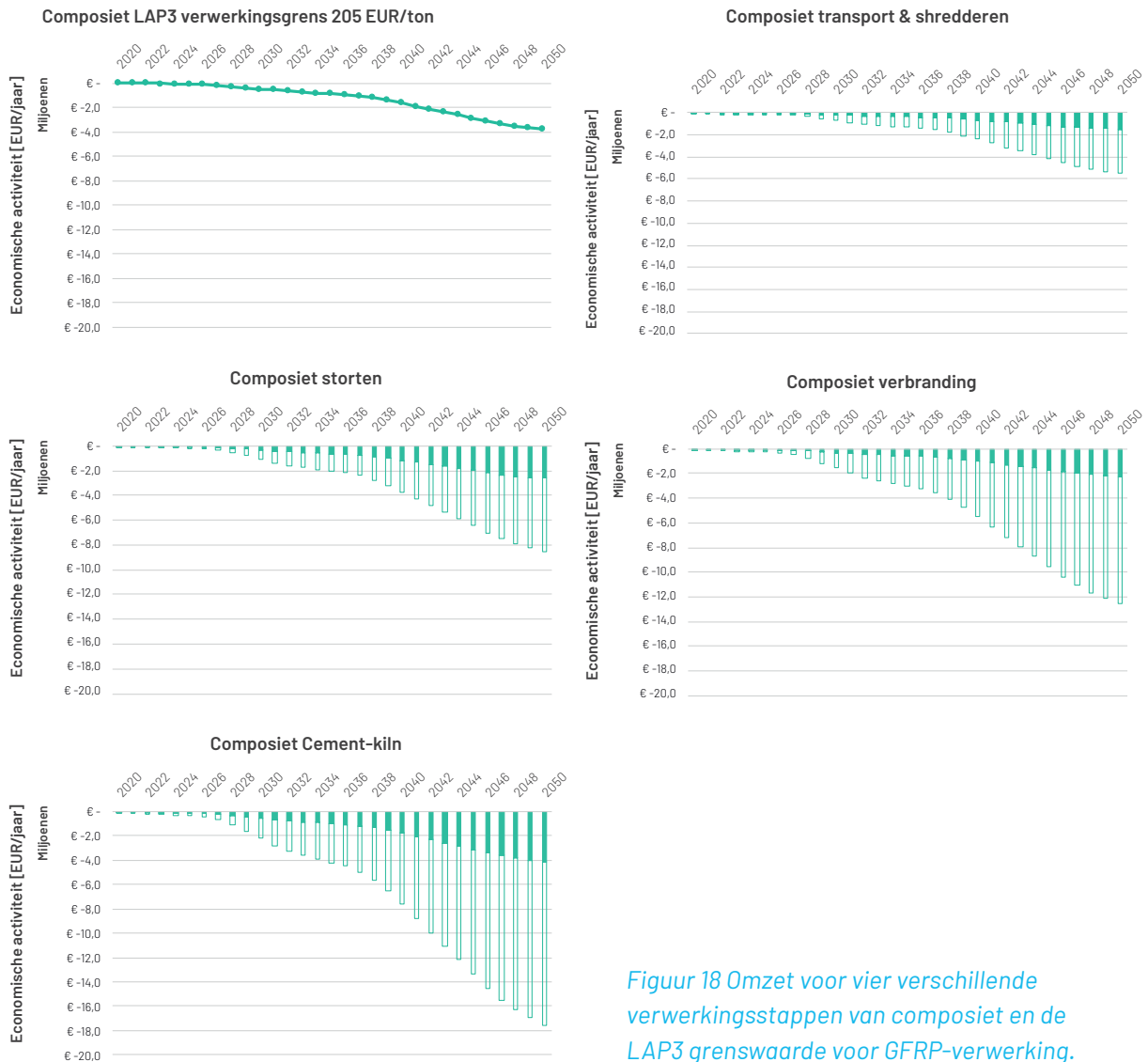
Om de bladen te verwerken tot kwalitatief acceptabele materialen zijn er twee categorieën recycling processen in ontwikkeling: chemische (bijv. via thermische pyrolyse) en mechanische (gebruik van geshredderd materiaal).

De beschikbare literatuur toont aan dat de kwaliteit van de glasvezels in de huidige chemische recycling-processen sterk achteruit gaat en niet meer ingezet kan worden voor toepassing waarin sterkte-eisen aan de materialen worden gesteld. Verschillende initiatieven worden genomen om deze kwaliteitsvraag (en daarmee tegelijk de markt vraag) te adresseren. Het toenemende aanbod van turbinebladen, dat ook in deze verkenning wordt aangetoond, zou een driver voor dergelijk onderzoek moeten zijn en tevens een driver voor kostenverlaging van een eventueel daaruit voortvloeiend proces.

Mechanische verwerking wordt onderzocht door o.a. Windesheim. Windesheim toont aan dat verwerking van (tot) 70% EoL GFRP mogelijk is in plaat- en plankmateriaal dat kan dienen als oeverbeschoeiing. Pilots met het Waterschap Zuiderzeeland zijn uitgevoerd en laten zien dat het waterschap bereid is tot een meerprijs t.o.v. azobe-hardhout, het gebruikelijke materiaal voor deze applicatie, op basis van de veronderstelde langere levensduur en dus lagere total-cost-of-ownership (TOC). Productie van deze applicatie zal dan moeten concurreren met de huidige prijs voor hardhouten beschoeiingen van rond de

³⁰ https://lap3.nl/publish/pages/120604/lap3_sp11_kunststof_rubber_19_07_2019.pdf

³¹ Momenteel rekenen verwerkers voor de integrale cement-kiln-route (verkleinen, shredderen, transport, gate fee) 450 EUR/t (informatie uit interview met Albert ten Busschen, 30 juni 2020)



Figuur 18 Omzet voor vier verschillende verwerkingsstappen van composiet en de LAP3 grenswaarde voor GFRP-verwerking.

55 EUR/m² (oftewel 1375 EUR/m³). Ook hier geldt dat schaalvergroting nodig is om tot industriële productie te kunnen komen, terwijl aan de andere kant de omvang van de lange-termijn-marktvraag kritisch bekeken zal moeten worden.

De ontwikkeling van een markt zal niet alleen afhangen van de technologische voortgang van (mechanische en chemische) recyclingprocessen en van de tot efficiëntie leidende schaalgrootte, maar zeker ook van de regelgeving op dit vlak (zie ook hoofdstuk3). De huidige regelgeving stelt een grens van 205 EUR/ton voor verwerkingsroutes alvorens verbranding of storten mag worden overwogen. Een verandering van deze grens of (zoals met gevaarlijke stoffen het geval is) een absoluut verbod op dergelijke verwerkingsmethodes zal een verdere impuls kunnen betekenen voor de ontwikkeling van grootschalige(r) verwerkingsroutes. Op dit moment moeten ontwikkelingen bij de bepaling van de business case rekening houden met een in rekening te brengen gate fee van 205 EUR/ton bij de ontdoener.

Momenteel is nog geen Extended Product Responsibility (EPR) geïntroduceerd in de windsector. EPR kan enerzijds leiden tot duurzamere ontwerp- en productiekeuzes en anderzijds voor voldoende (financiële) middelen en stimulansen voor kostenverlagende innovaties voor verantwoorde afvalverwerking. Gezien de schaal en het internationale karakter van de bladrecycling-problematiek is een gelijk speelveld vereist tussen EU-landen en is samenwerking met andere sectoren waar composietafvalstromen

ontstaan nodig. Alhoewel hoogwaardige verwerking van EoL-composieten een uitdaging is, is het zonder enige twijfel een uitdaging die de hele keten samen met de overheid moet aanpakken. De totstandkoming van deze afvalstroom is een consequentie van maatschappelijk gewenste ontwikkelingen: de transitie naar een energiesysteem op basis van hernieuwbare energiebronnen.

4.2.5 Verdieping: hergebruik van permanente magneten

In deze studie is –mede op basis van de studie van Viebahn

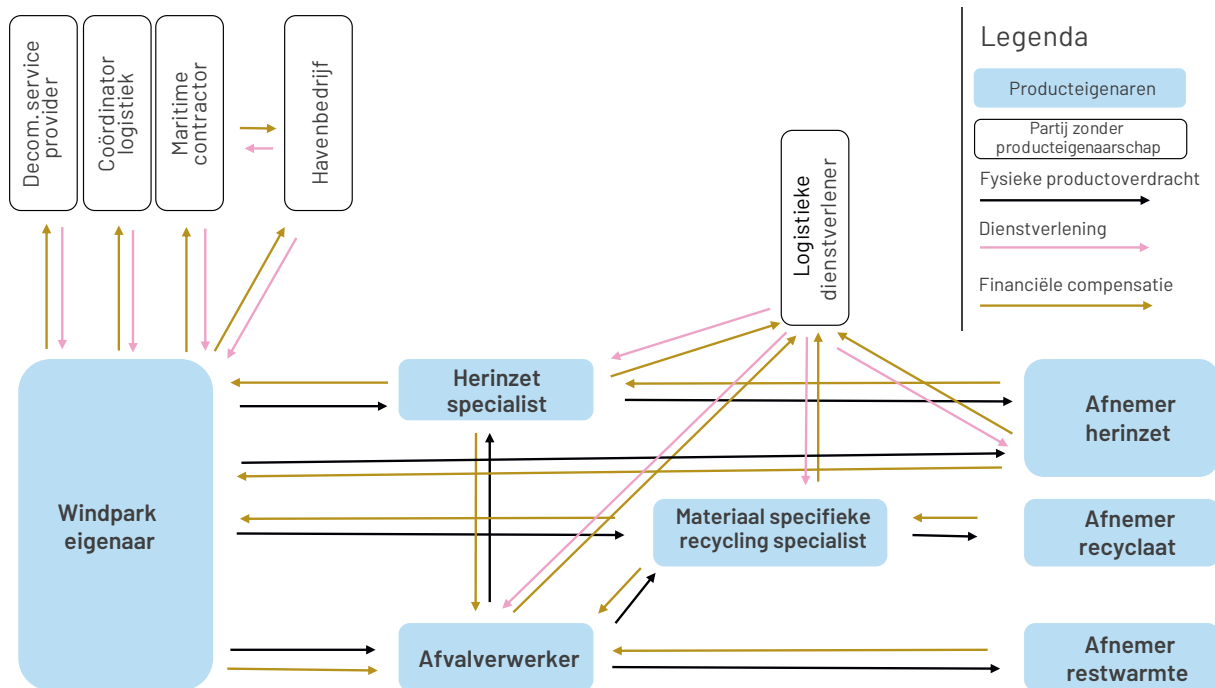
– van een gestage penetratie van direct drive generatoren uitgegaan, waarbij de inzet vereist is van permanente magneten op basis van NdFeB. Alhoewel verschillende studies wijzen op de (vooral geopolitiek veroorzaakte) lage leveringszekerheid van m.n. neodymium (Nd; als één van de zeldzame aardmetalen) en de groeiverwachting van de inzet van Nd die de groeiverwachting van de mijnbouwcapaciteit overstijgt, zijn er amper activiteiten aan te wijzen die gericht zijn op hoogwaardige herinzet of recycling van deze materialen en componenten. Hier zijn verschillende oorzaken voor aan te wijzen:

- China heeft een quasi-monopoliepositie op de grondstofwinning, maar ook op tal van downstream-infrastructuur. Daarmee is er voor de eventuele recycling van zeldzame grondstoffen vervolgens geen verwerkingscapaciteit in Europa en zal een handelsrelatie met producenten van magnetische materialen moeten worden opgebouwd.
- De recycling van magneten zelf heeft tot op heden geen proces met hoog TRL opgeleverd. De afwezigheid van een stijging van de marktprijs (na de enorme piek in 2011, is de prijs eerst gedaald en vervolgens constant gebleven) biedt geen incentive voor snellere technologische ontwikkeling.
- De verwerking en/of het transport van materialen met een hoge magnetische permanentie zal niet zonder risico's zijn, hetgeen zal bijdragen aan de totale verwerkingskosten.
- De afwezigheid van standaardisatie bij de ontwikkeling van windturbines leidt tot een moeilijk te voorspellen stroom componenten en een onzekere herinzet van deze componenten.
- Een voorbeeld van recente onderzoeksontwikkelingen met betrekking tot end-to-end recycling is een gesubsidieerd project van Mkango Resources Ltd waarin onderzocht wordt op welke wijze recycleat in nieuwe permanente magneten voor elektrische auto's verwerkt kan worden.

Tegen deze achtergrond is duidelijk dat het nu niet mogelijk is een inschatting te maken van de mogelijke economische activiteiten die zouden kunnen ontstaan omtrent het hoogwaardig verwerken van het technisch hart van windturbines. Tegelijk is dit ook een aanwijzing dat –naast de aandacht voor milieu- en kostentechnisch zo verantwoord mogelijke verwerking van turbinebladen- verwerking van permanente magneten om aandacht vraagt in onderzoek- en ontwikkelingstrajecten. Met name partijen aan de productiekant van windturbines zouden daar een voorname rol in moeten vervullen.

4.3 Verdeling kosten en baten

De mogelijke economische activiteit, weergegeven in de vorige paragraaf, zal in alle gevallen leiden tot de overdracht van fysieke producten of dienstverlening tussen partijen. Deze noodzakelijke samenwerking in de keten leidt onvermijdelijk tot kosten voor de ene partij en inkomsten voor de andere partij. Het waardenetwerk en de onderlinge verhoudingen worden geïllustreerd in Figuur 19.



Figuur 19 Waardenetwerk omtrent decommissioning van OWF

Tabel 8 en tabel 9 geven weer welke kosten en baten per partij en per activiteit te verwachten zijn. De donkerrode en donkergroene vlakken corresponderen met de economische activiteiten zoals weergegeven in de vorige paragraaf. 'Rood' wil hier zeggen: de aangegeven ketenpartij betaalt voor de bewuste activiteit; 'groen' wil zeggen: de ketenpartij verwerft inkomsten n.a.v. de bewuste activiteit. Voor een financieel gezond businessmodel zal per partij een positieve balans noodzakelijk zijn tussen de partij-specifieke kosten en baten over alle activiteiten van de partij heen (ook bijvoorbeeld uit operationele inkomsten die hier niet benoemd worden). Overigens kunnen kosten en baten die relevant zijn voor een partij buiten de decommissioning en end-of-life fase liggen.

De mate waarin economische activiteiten toenemen of afnemen door de introductie, verandering of eliminatie van ketenactiviteiten hangt af van de plek die deze activiteit in de keten inneemt binnen de huidige activiteiten in de keten. Een afname van proceskosten zal leiden tot de afname van operationele kosten van de procesuitvoerende partij. Uitgaande van klassieke marktwerking is ook een afname van kosten voor de partij die diensten inkoop te verwachten. Concluderend zal een proceskostenreductie daarmee leiden tot een netto afname van economische activiteit in de keten als geheel.

Tabel 8 Kosten en baten verdeling binnen de waardeketen in decommissioning-fase

Decommissioning en end-of-life fase activiteiten	Betrokken partij	Windpark eigenaar	Decom. service provider	Coordinator logistiek	Maritime contractor	Havenbedrijf
D1. End-of-life strategy and decommissioning assessment		Dienstinkoop	Dienstverkoop			
D2. Voorbereidingen		Dienstinkoop	Dienstverkoop	Dienstverkoop	Dienstverkoop	Dienstverkoop
D3. Verwijdering en transport van WTG		Dienstinkoop	Dienstverkoop	Dienstverkoop	Dienstverkoop	
D4. Verwijdering en transport van substructure		Dienstinkoop	Dienstverkoop	Dienstverkoop	Dienstverkoop	
D5. Verwijdering en transport van array cables		Dienstinkoop	Dienstverkoop	Dienstverkoop	Dienstverkoop	
D6. afladen op land		Dienstinkoop	Dienstverkoop	Dienstverkoop	Dienstverkoop	Ruimteverhuur

Tabel 9 Kosten en baten verdeling binnen de waardeketen in de end-of-life-fase

Decommissioning en end-of-life fase activiteiten	Betrokken partij	Windpark eigenaar	Dienstverlener logistiek	Havenbedrijf	Afvalverwerker	Herinzet specialist	Materiaalspecifieke recycling specialist	Afnemers herinzet/recyclaat/restwarmte
D7. eigendomsoverdracht van systemen		Systeemverkoop				Systeeminkoop	Systeeminkoop	Systeeminkoop
EOL1. Voorbereiding en landtransport			Dienstverkoop		Dienstinkoop	Dienstinkoop	Dienstinkoop	Dienstinkoop
EOL2. Opslag				Ruimteverhuur	Opslagkosten	Opslagkosten	Opslagkosten	
EOL3. Demontage en scheiding					Proces			
					Dienstverkoop	Dienstinkoop	Dienstinkoop	
EOL4A. Hergebruik van systemen						Proces		
						Systeemverkoop		Systeeminkoop
EOL4B. Recycling van materialen							Proces	
							Materiaalverkoop	Materiaalinkoop
EOL4C. Verbranden/storten		Dienstinkoop			Dienstverkoop			
					Proces			
					Warmteverkoop			Warmteinkoop

■ ■ donkerrood/donkergroen: kosten en baten beschouwd binnen dit onderzoek

■ ■ lichtrood/lichtgroen: kosten en baten buiten scope van dit onderzoek



Impact van ontwikkelingen in de offshore windpark-technologie

Er zijn diverse ontwikkelingen binnen de offshore wind sector gaande die een impact kunnen hebben op de uitvoering en kosten van decommissioning en end-of-life activiteiten. Tabel 10 vat de ontwikkelingen samen waarvan verwacht wordt dat het (1) waarschijnlijk is dat deze ontwikkeling vóór 2035 zal plaatsvinden en (2) dat de ontwikkeling een grootschalige impact zal hebben op windparken in de zuidelijke Noordzee. Dit overzicht is tot stand gekomen op basis van gesprekken met experts die hun inschatting hebben gegeven van te verwachten impact en waarschijnlijkheid van grootschalige implementatie. Dit zijn daarmee de meest veelbelovende technieken.

Tevens worden voorbeelden gegeven van marktspelers die tot nu toe betrokken zijn bij de ontwikkeling van de genoemde technologieën en benoemen we kansen die deze technieken bieden voor een mogelijke business case.

In paragraaf 5.1 worden de ontwikkelingen en hun impact per levenscyclusfase nader uitgewerkt. Daarnaast wordt een doorkijk gegeven naar de implementatie van de ontwikkelingen in de huidige offshore wind sector (5.2). Over de rol die deze ontwikkelingen zouden kunnen spelen in eventueel toekomstige ontwikkelingen in Rotterdam en Zuid-Holland komen we terug in paragraaf 6.3.

5.1 Ontwikkelingen met een invloed op decommissioning en end-of-life

Er zijn acht ontwikkelingen geïdentificeerd met een directe impact op de decommissioning en end-of-life fase. Tabel 10 geeft de ontwikkelingen en hun impact weer. Op elk van de geïdentificeerde ontwikkelingen wordt vervolgens in meer detail ingegaan.

Voor inschatting van de huidige status en benodigde ontwikkeling t.b.v. opschaling werd gebruik gemaakt van de Europese TRL schaal en inschattingen van de betrokken experts. De TRL schaal loopt van 1, onderzoek van het basisprincipe of idee, tot 9, demonstratie van het systeem in een commerciële en marktrijpe gebruiksomgeving.

Toename structureel hergebruik van composiet

Bij structureel hergebruik worden delen van het blad direct hergebruikt voor een andere functie. Om op te schalen moeten het verwerkingsproces, snijpatroon en vervolgoepassingen verder worden ontwikkeld. Dit is met name lastig door de verscheidenheid aan afmetingen, vormen en materiaalsamenstellingen van verschillende bladen. Wanneer het hergebruik voldoende aan veiligheidsrichtlijnen voor de nieuwe functie en economisch competitief is, is een positieve impact in de end-of-life fase te verwachten dankzij hoogwaardiger hergebruik. De impact tijdens de decommissioning fase kan negatief (e.g. snijdactiviteit in een offshore omgeving) en positief (e.g. gemakkelijker vervoeren van kleinere componenten) uitpakken. De eigenaar of afnemer van de bladen wordt dan in feite leverancier van plaatmateriaal en balken, die in tal van andere toepassingen gebruikt kunnen worden. Direct structureel hergebruik kan hoge kwaliteit elementen opleveren voor een betrekkelijk lage investering; het verwerkingsproces is minder intensief dan mechanische en/of chemische recycling.

Tabel 10 Overzicht van ontwikkelingen in OWF decommissioning

Ontwikkeling	Impact scale:						
	Policy	Leasing & concent	Design & production	Transportation, installati- on, commissioing	Operation & maintenance	Decommissioning	End-of-life
Marktgedreven structureel hergebruik van GRP composiet							
Mechanisch recyclingproces							
Chemisch recyclingproces							
Direct drive permanent magnet generator opschaling							
Monopile fundatie extractietechnologie: hydraulisch verwijderen							
Monopile fundatie extractietechnologie: verwijdering m.b.v. trillingen							
Design for decommissioning							
Decommissioning strategieën en beleid							

Structureel hergebruik wordt ingeschat op TRL niveau 4-5. De aanpak is meerdere keren beschreven en experimenteel uitgevoerd. Hergebruik vond tot nu toe voornamelijk plaats met grote delen, waardoor het beperkt bleef tot incidentele toepassingen. Voor opschaling zijn ontwikkelingen nodig in het verwerkingsproces en in markttoepassingen nodig. Het principe van structureel hergebruik is onderzocht door meerdere consortia, onder andere binnen het RAAK-MKB projectconsortium, Ecobulk, GenVind en Re-Wind. Betrokken partijen zijn o.a. Windesheim, TU Delft, Siemens-Gamesa en SuperUse studios.

Mechanisch recyclingproces van composiet

Voor het bedrijfsmatig gezond opschalen van mechanische recycling (shredding) zal aanbod, verwerkingscapaciteit en markt vraag naar recyclaat met elkaar in evenwicht moeten zijn. Met een toenemende vraag en aanbod van bladen zal ook de recyclingcapaciteit en de markttoepassing mee (moeten) groeien, wat leidt tot een positieve impact van meer bedrijvigheid in de end-of-life fase en de hieraan gerelateerde volwassenwording van bladrecyclaat-gerelateerde productontwikkelaars. Mogelijke aanvullende ontwerp- en productiewensen kunnen ontstaan, wat gezien kan worden als aanvullende eisen tijdens de ontwerp- en productiefase.

Mechanische recycling heeft TRL 8-9, het wordt reeds gebruikt om composietmateriaal uit verschillende bronnen te verwerken. Het systeem is echter nog niet balans, zeker met de toenemende hoeveelheid materiaal die verwerkt zal moeten worden. Derhalve zullen er meer en hoogwaardige toepassingen gevonden moeten worden voor het recyclaat, mogelijk verbonden aan de verschillende soorten en kwaliteiten van composietrecyclaat. De variërende, en vaak deels onbekende materiaalsamenstelling van fragmenten na shredding is hierbij een duidelijke uitdaging. Binnen Nederland richten onder andere de bedrijven Virol en Demacq International zich op ontwikkeling van deze recyclingtechniek.

Chemisch recyclingproces van composiet

De implementatie van rendabele chemische recyclingtechnologie op industriële schaal kan de verwerking van composieten tot herbruikbare vezels en/of hars mogelijk gaan maken in de end-of-life fase. De producteigenschappen van het recyclaat zal bepalend zijn voor een intrede van recyclaat als economisch competitief alternatief voor diverse toepassingen. Huidige chemische recycleprocessen verminderen de kwaliteit van de fibers met betrekking tot vezellengte, oriëntatie, sterkte, stijfheid en oppervlaktekwaliteit. Ontwikkelingen die materiaal van hogere kwaliteit en waarde opleveren, kunnen bijdragen aan een positieve business case.

Voor chemische recycling worden TRL niveaus van 3-4 gerapporteerd. De hoogste TRL niveaus werden behaald in installaties met productie-resten als feedstock. Een andere mogelijkheid is om in te zetten op integratie met de aanwezige bedrijvigheid en infrastructuur, m.n. om de vrijgekomen koolwaterstoffen direct te kunnen hergebruiken.

Thermische recycling, pyrolyse, is op TRL 4-8 en wordt voor koolstofvezel al commercieel geëxploiteerd door ELG Carbon Fiber (UK) en CFK recycling (DE). Groter kwaliteitsverlies en lage productiekosten van nieuw materiaal bemoeilijken echter commerciële exploitatie voor glasvezel. Dit kan mogelijk wel worden gerealiseerd door verdere ontwikkeling en verbetering van de chemische dan wel thermische recycling processen en ontwikkeling van recyclebare materialen, m.n. harsen. Dit geeft perspectief op een betere kwaliteit, waardevoller, recyclaat. Indien er passende toepassingen, dat wil zeggen een markt, gevonden wordt voor deze materialen, kan de waarde stijgen en de business case positief worden.

Toenemend gebruik van permanente magneten in generatoren

Het streven naar techno-economische prestatie-optimalisatie leidt tot een toename van direct-drive configuraties met permanente magneten. Direct-drive leidt onder meer tot eenvoudiger onderhoud. De (lange-termijn-)beschikbaarheid van de grondstoffen voor deze magneten kent onzekerheden. Een recycling- en hergebruiksecosysteem voor de magneten is niet in zicht en tijdens de end-of-life fase kunnen permanente magneten veiligheidsproblemen veroorzaken door de zeer sterke magnetisch velden. Inzichten uit de end-of-life fase kunnen een impact gaan hebben op toekomstige ontwerpkeuzes.

De direct drive permanent magneet generator heeft een TRL 9. Deze technologie wordt al gebruikt in verschillende type windturbines, o.a. door Siemens-Gamesa, Enercon, Lagerwey, EWT en GE. Voor toepassing op grote schaal test GE op dit moment een 12 MW turbine in de Rotterdamse haven. Voor hergebruik moet het systeem van inzameling en verwerking van permanent magneten verder ontwikkeld worden.

Hydraulisch volledig verwijderen van monopile fundatie

Stalen monopiles zijn goed te recyclen, waarbij rekening gehouden moet worden met de legeringen. Omdat volledig verwijderen uit de zeebodem een tijdsintensieve activiteit met grote krachterspellen is, worden ze in de beperkte situaties die tot nu toe zijn opgetreden veelal afgezaagd, waardoor een deel van de monopile achterblijft.

Als regelgeving eist dat de fundaties volledig verwijderd moet worden, zijn nieuwe technologieën nodig. Een hydraulische verwijderingsmethode wordt hiervoor ontwikkeld in het HyPE-ST project. Na demontage van de turbine wordt de monopile afgesloten en onder druk gezet met water. Zo wordt de monopile als geheel losgedrukt uit de zeebodem. De afsluiting en vulopening zou ter plekke geplaatst kunnen worden, maar gezien de hoge kosten gemoeid met offshore werkzaamheden is het aantrekkelijker om dit al tijdens het ontwerp en de productie mee te gaan nemen.

Hydraulisch verwijderen is aangetoond in lab-experimenten (TRL 4) en in een gerelateerd project op ware grootte. De uitdaging ligt in toepassing van dit proces op monopiles die ook al lange tijd geïnstal-

leerd staan, in verband met inklinking van de zeebodem. HyPE-ST was een GROW project met partners Deltares, TNO, DOT, IHC, RWE, Sif en Jan de Nul.

Volledig verwijderen van monopile fundatie met behulp van trillingen

Voor volledige verwijdering van de monopile tijdens de decommissioning fase wordt ook onderzocht of met verschillende trillingen de frictie tussen de monopile en de zeebodem overwonnen kan worden. Voor deze techniek lijken geen aanpassingen aan het ontwerp of aan de installatieapparatuur nodig te zijn. Een eerste toepassing van deze technologie is uitgevoerd door PVE-Holland. Tijdens de verwijdering van windpark Lely (NL) is gedemonstreerd dat vier monopiles van de 0.5 MW turbines in 3 uur verwijderd konden worden.

De techniek bevindt zich naar schatting op TRL 5. De labtesten werden gedaan met geschaalde modellen in een zandbodem. Er wordt nader onderzoek gedaan naar verschillende grondsoorten, zoals klei, en opschaling naar grote diameter monopiles. Gentle driving of piles (GDP) wordt onderzocht in het GROW consortium van Boskalis, Deltares, DOT, Eneco, IHC, RWE, Seaway, Shell, Sif, TNO, TU Delft, Van Oord en Cape Holland.

Met de voorgestelde vibratie- en hydraulischetechnieken zijn monopiles sneller, eenvoudiger en in zijn geheel te verwijderen. Kostenbesparing en wellicht voordeel van de grotere hoeveelheid staal leveren een bijdrage aan een betere business case.

Design for decommissioning

Ondanks het groeiende bewustzijn van vraagstukken rondom duurzaamheid en decommissioning, wordt hieraan in het ontwerpproces nog weinig tot geen aandacht besteed.

Dit heeft ondermeer te maken met split incentives en de lange tijdspaden waarover deze problemen de kop op steken. Tussen ontwerp en decommissioning zit minimaal 20 jaar. Dit levert een afwachtende houding op.

Design for decommissioning bevindt zich dan ook in een explorerend stadium. Het concept is bekend en op kleine schaal onderzocht. Specifieke technologische ontwikkelingen zijn hiervoor geen voorwaarde, een TRL niveau is daarom niet van toepassing. Voor implementatie moet verder onderzoek gedaan worden naar de ontwerpruimte. Specifiek voor het windturbineblad betekent dit het ontwerp van de buitencontour van het blad, mogelijke aanpassingen t.b.v. decommissioning activiteiten en scheiden van materialen bij end of life verwerking.

Decommissioning en end-of-life strategieën en beleid

Uit interviews met direct betrokkenen uit de keten blijkt dat de 'hard issues' m.b.t. decommissioning voor veel partijen nog een ver-van-hun-bed-show is. Concrete plannen hoeven pas te worden overlegd kort vóór de daadwerkelijke decommissioning, er wordt geen fonds ingericht t.b.v. decommissioning en überhaupt worden de kosten daarvan relatief laag ingeschat t.o.v. de operationele inkomsten tijdens operatie. Om de ontwikkelingen en implementatie van nieuwe technologie te stimuleren is doelmatig beleid en/of wet- en regelgeving nodig. Dit kan liggen in het oprichten van fondsen waaruit decom-activiteiten ontwikkeld en gefinancierd kunnen worden, het opzetten van een EPR, het vernauwen van de grenzen vanaf wanneer verbranden of storten van composiet mogelijk is, of het aanpassen van de (ontwerp)eisen die aan tenderende partijen worden voorgelegd.

Beleid voor decommissioning en end-of-life valt ook niet in TRL-termen uit te drukken. Hoewel regelgeving voor windpark decommissioning nog niet helder is, kan opgemerkt worden dat gelijksoortige regelgeving al van kracht is in andere sectoren, waaronder de offshore olie en gas sector. Het valt te verwachten dat dit ook voor windturbines of specifieke componenten, dan wel materialen, zal worden

ingevoerd. Spelers hierin zijn brancheorganisaties NWEA en WindEurope alsmede Europees innovatieplatform ETIPWind.

Regelgeving kan een rol spelen in het realiseren en aanjagen van een duurzaam, circulair systeem van offshore windparken.

5.2 Implementatie van ontwikkelingen binnen de huidige OWF keten

Op dit moment worden in de ontwerp- en productiefase nog geen eisen gesteld die tot vereenvoudiging van de decommissioning en end-of-life fase leiden. Aanpassingen op dat vlak zullen –zonder regelgeving en verplichtende tender-eisen- in het algemeen leiden tot zogenaamde ‘split incentives’ waarbij kosten en baten van aanpassingen bij verschillende spelers in de waardeketen vallen. Alleen door de eisen in tenderpakketten op te nemen zullen deze leiden tot andere keuzes in de materiaalsamenstelling, verbindingen en productconfiguraties. Het doel van de verandering in ontwerp- en/of productiekeuzes zou het vereenvoudigen en efficiënter maken van de decommissioning en/of end-of-life activiteiten moeten zijn. Aanvullende eisen zullen hoogstwaarschijnlijk leiden tot aanvullende kosten, waardoor concrete drijfveren nodig zijn voor de lastendragende partij.

Daarnaast wordt gesproken over het mogelijk achterlaten van stukken van de monopiles op de zeebodem. Verandering van beleid op dit vlak zal grote kostenconsequenties hebben. De belangrijkste driver op dit vlak zal liggen in de mate waarin het lokale mariene milieu wordt beschadigd a.g.v. het weghalen van monopiles.

Door deze veranderingen in gang te zetten zou een koppeling van drijfveren en capaciteiten uit de afvalverwerkingssector met offshore windpark eigenaren, componentproducenten en subcontractors tot stand kunnen komen. Verder zal t.b.v. schaalvergroting, versnelling van ontwikkelingen een gelijk Europees speelveld moeten worden gegarandeerd om geen ‘race to the bottom’ te stimuleren.

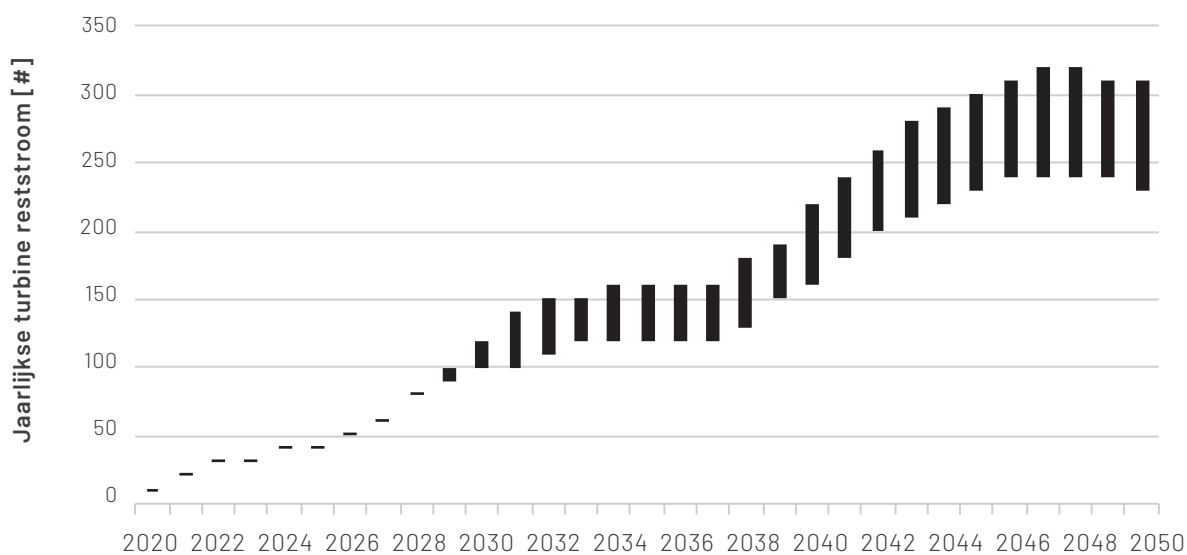
De huidige drijfveren voor ontwerpoptimalisatie zijn voornamelijk economisch met als doel het verlagen van de levelized cost of energy. Ontwerpen met een minimale ecologische impact zou momenteel in veel gevallen resulteren in een economische sub-optimalisatie. Vier ontwikkelingen in de offshore windsector zijn geïdentificeerd die een mogelijk positieve impact op de decommissioning en/of end-of-life fase zouden kunnen hebben na 2050:

- 1 systeemontwerpen voor een operationele levensduur van meer dan 30 jaar (met als voornaamste ‘circulaire’ gevolg een lagere netto materiaalinzet voor de opwekking van windenergie);
- 2 de grootschalige toepassing van niet-maagdelijk materiaal in het productieproces van offshore windpark systemen;
- 3 de toepassing van nieuwe transportmethodes voor grote componenten;
- 4 de toepassing van hoge percentages carbonvezel in windturbine bladen in navolging van een toenemende turbineblad lengte en belastingprofielen (met als gevolg een mogelijk economisch rendabel recyclingproces, vanwege de intrinsieke waarde van koolstofvezels in vergelijking met glasvezels).

De huidige idea-to-market periode in de sector van ongeveer 10 jaar zal ertoe leiden dat verduurzamingsmaatregelen in de keten met substantiële vertraging terug te zien zijn in fysieke windparken en dus ook in de decommissioningfase van diezelfde windparken. De inzichten uit komende decommissioning en end-of-life ervaringen zouden van grote waarde kunnen zijn in het vormen van effectief Europees en nationaal beleid en tevens een waardevolle input kunnen zijn voor doorontwikkelingen in de ontwerp en productiefase.

Conclusies en call-to-action

Europese beleidstukken schetsen tot 2050 een toename van offshore wind elektriciteitsproductie capaciteit tot 174 GW in de zuidelijke Noordzee. In de huidige offshore windsector wordt de productiecapaciteit per individuele windturbine in hoog tempo opgeschaald. De opschaling van gemiddeld 3 tot 15 MW per turbine tot 2030, in combinatie met de verscheidenheid van beschikbare windturbine-technologie op de markt, leidt tot een grote diversiteit aan systemen op zee. Deze systemen kennen een eindige operationele levensduur van 20-25 jaar met een mogelijke levensduurextentie tot 25-30 jaar. Figuur 4 laat de sterke toename van windturbines zien die verwijderd dienen te worden tussen 2020 en 2050 (de spreiding hangt af van de exacte levensduur).



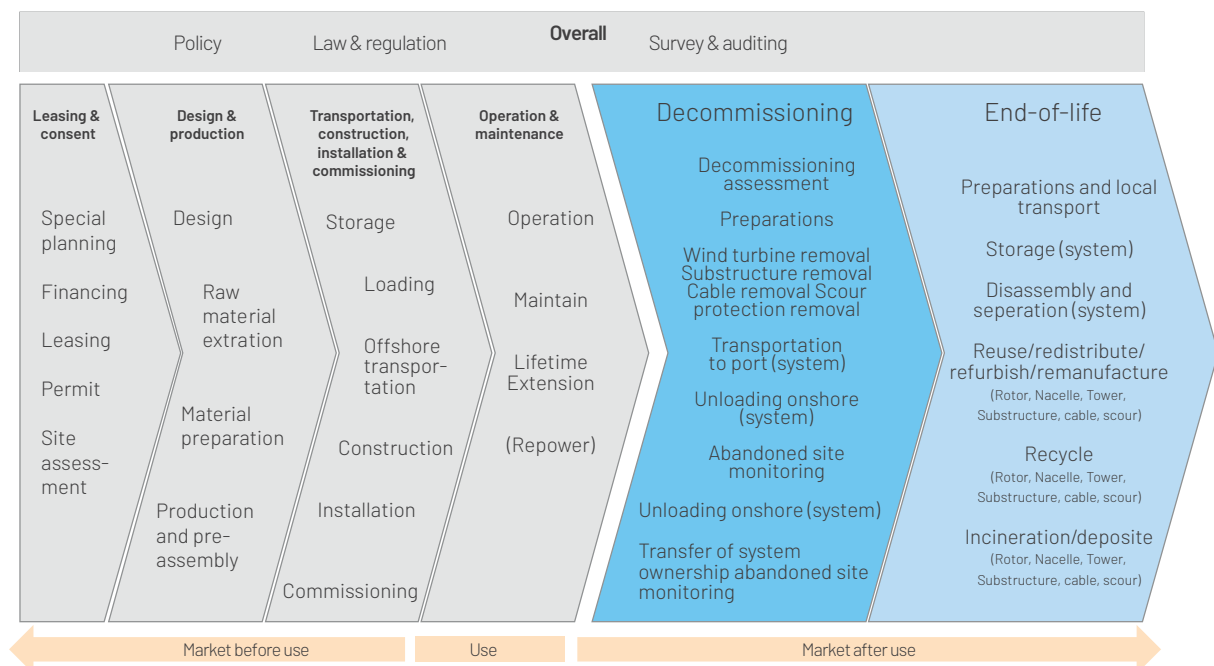
Figuur 4 (herhaald) Prognose jaarlijkse turbine reststroom vanaf de Noordzee [#] (spreiding is gebaseerd op variatie levensduur van 20-25 jaar tot 25-30 jaar)

Doordat grootschalige offshore windpark decommissioning en de hierop volgende end-of-life activiteiten onbekend terrein zijn, bestaat er onzekerheid over het type en de mate van bedrijvigheid die hiermee gemoeid zou kunnen zijn.

Op basis van de beschreven inzichten in dit onderzoek kan geschetst worden dat de volgende situaties te verwachten zijn in een business-as-usual-scenario:

- Windparken in de Zuidelijke Noordzee zullen onvermijdelijk moeten worden verwijderd. De mate waarin de support structure, scour protection en inter-array cables op de zeebodem achterblijven is onduidelijk. Een onduidelijk percentage van de verwijdering- en transportactiviteit tijdens de decommissioning fase kan vanuit/naar de Rotterdamse haven plaatsvinden. Een breed scala aan onzekerheden zal de kwantiteit, kwaliteit en timing van te verwijderen systemen beïnvloeden waaronder: de offshore weersomstandigheden, benodigde equipment op schepen, afwezigheid van specifieke verduidelijkende wet- en regelgeving en het feit dat ieder windpark unieke karakteristieken (e.g. zeediepte, turbine type en afstand tot havens) heeft.

- De operationele levensduur van de windturbines is in grote mate bepalend voor het moment waarop verwijdering plaatsvindt en daarmee de restmateriaalstroom op gang komt: hoe langer de levensduur, hoe later de stroom ontstaat.
- Wanneer de reststroom in de haven aankomt zullen de componenten van de windparken in twee richtingen doorstromen:
 - Materialen en componenten met een positieve marktwaarde: wanneer de reststroom (als component of materiaal) een netto positieve marktwaarde heeft, zal het instromen in een bestaande hergebruik- of recyclingketen
 - Materialen en componenten met een negatieve marktwaarde: wanneer voor een afvalstroom geen kostenneutraal proces bestaat om het afval te verwerken ontstaat er een proces met een onrendabele top. Additionele verwijderingsbijdragen of 'gate fees' zijn dan nodig om tot acceptabele verwerking te komen. Regelgeving, bijvoorbeeld in LAP3, is dan nodig om maatschappelijk onwenselijke verwerking te voorkomen. Als onwenselijk zou kunnen worden gezien: het exporteren van materialen naar andere landen met minder strikte stort-regelgeving, of het opslaan van materialen opdat toekomstige generaties naar verwerkingsoplossingen zullen moeten zoeken. Om dit maatschappelijke afvalprobleem alsnog op ecologisch en sociaal verantwoorde wijze op te lossen zullen passende overheidsmaatregelen getroffen moeten worden wanneer de markt niet uit zichzelf tot acceptabele afvalverwerking komt. Voorbeelden van succesvolle afvalstroomverwerking met onrendabele toppen zijn de asbestsanering en autostort in Nederland.



Figuur 10 (herhaald) vat de te verwachten activiteiten in de decommissioning en end-of-life fasen samen.

Het gebrek aan praktijkervaringen resulteert in onduidelijke afhankelijkheden, kosten en baten per betrokken stakeholder in de volledige offshore wind waardeketen en de afvalverwerkingssector. Activiteiten in de decommissioning en end-of-life fase zijn direct afhankelijk van keuzes en situaties die gemaakt of ontstaan zijn in de voorafgaande levenscyclusfasen.

6.1 Conclusies en afhankelijkheden per fase

De volgende observaties en conclusies geven deze afhankelijkheden per fase weer:

Leasing- & consentfase

- In biedprocedures zijn zelden concrete afspraken over de aard van de activiteiten rond het einde van de levensduur opgenomen. De huidige regelgeving is beperkt en verschilt per land. Eigenaren voldoen aan de eisen gesteld door de overheid. Gewenste veranderingen zullen via beleid, wet- en regelgeving geïntroduceerd kunnen gaan worden. Het concurrentievermogen en een gelijk speelveld van de offshore windmolenparksector vereist regelgeving op EU-niveau om duidelijkheid te bieden aan de offshore windsector.
- Eigenaren voldoen aan de 'verwijder alles'-regelgeving, zoals gesteld in de huidige Wet-op-zee (Water decree act. 6.161) en lokale bestemmingsplannen van overheden. Tegelijkertijd vinden ontwikkelingen plaats die zich richten op het accepteren van het achterlaten van support structure systemen, array cables en scour protection op de zeebodem.
- Voor Nederlandse windparken wordt een bankgarantie afgegeven bij aanvang van de operatie van 120kEUR / MW; onze analyse laat zien dat dit de verwachte ontmantelings- en afvalverwerkingskosten niet dekt.
- Verschuivingen in de richting van de verlenging van vergunningen en van de levensduur tot 40 jaar zijn in de maak en zullen hun gevolg hebben voor de incentives om actief te werken aan optimalisatie van de decommissioningfase.
- Inzichten in de kosten en baten van einde levensduur activiteiten zijn wenselijk voor levenscycluskosten (LCC) en total cost of ownership (TCO). Om de kosten en baten van decommissioning en end-of-life activiteiten en methoden tijdig te adresseren en mee te nemen in de financiële analyses (e.g. levelized cost of energy en een positieve risico-arme business case) van offshore windparken is echter praktijkervaring met grootschalige decommissioningactiviteiten nodig.

Ontwerp- & productiefase

- De huidige drijfveren voor ontwerpoptimalisatie zijn voornamelijk economisch, gericht op het verlagen van de levelized cost of energy. De offshore windturbine markt wordt gedreven door de vraag van de eigenaar van een windpark om een hoog economisch rendement per oppervlakte te behalen tegen lage risico's. De bestaande bewezen technologie is daarmee leidend in windparkrealisatie. Tegelijkertijd worden in hoog tempo windturbines opgeschaald om zoveel mogelijk windenergie om te zetten in elektriciteit.
- Ontwerp voor een minimale ecologische impact speelt op dit moment geen rol van betekenis door de dominantie van het economische aspect. Regelgeving is waarschijnlijk nodig om dit te doorbreken.
- Op de huidige markt zijn re-use- en recyclingtoepassingen voor offshore turbine componenten (nog) niet ontwikkeld, waardoor hergebruik geen deel uitmaakt van de huidige ontwerpeisen. OEM's zullen in de toekomst mogelijk inspelen op een eventueel veranderende markt vraag.

Transport- en installatiefase

- De decommissioningactiviteiten kunnen gebaseerd worden op de eerder succesvol voltooide installatie-activiteiten. De eisen die aan de decommissioningfase worden gesteld zijn echter anders van aard: componenten kunnen in lagere kwaliteit aan land gebracht worden voor verdere afvalverwerking. Dit biedt kansen voor de ontwikkeling van decommissioningmethodes en -processen.
- Beschikbaarheid van as-built documentatie bij de eigenaar tijdens de decommissioningfase zal waardevol zijn bij de voorbereidingen van de verwijderactiviteiten. De lange periode (20 jaar +) tussen het starten en verwijderen van het windpark leidt ertoe dat het ontvangen en bewaren van de (juiste) documentatie tijdens en na het bouwen aandacht vereist.

Operation & maintenance-fase

- Eindelevensduurstrategieën van windparken vereisen langetermijnplanning onder grote onzekerheden. Doordat deze strategieën zich richten op activiteiten die 20 tot 30 jaar nadat een windpark in bedrijf genomen is plaatsvinden, staat het uitwerken van deze strategieën zelden op de agenda van de windparkeigenaars.
- De kosten voor enkel de verwijderactiviteiten in de decommissioningfase blijken volgens de schattingen in deze verkenning hoger te liggen dan de bankgarantie van €120k per MW die voor Nederlandse windparken gereserveerd dient te worden (NB: hierbij zijn mogelijke, maar volatiele opbrengsten uit scrapstaal niet meegenomen). Uit onze analyse werd duidelijk dat de kosten voor elke OWF significant kunnen verschillen waardoor het onduidelijk is hoeveel financiële reserves zouden moeten worden opgenomen om de kosten in de decommissioning en end-of-life fase te dekken. Dit topic vereist aandacht van offshore wind-tenders en van de windparkeigenaren.
- De ontwikkeling van proactieve strategieën gericht op het einde van de levenscyclus biedt een tijdige impuls om decommissioningactiviteit-gerelateerde informatie te verzamelen en te analyseren. Analyse van installatie-data kan bijdragen aan het efficiënt organiseren van de ontmanteling tegen minimale risico's en kosten.
- De afwezigheid van ervaringen met grootschalige windparkverwijdering en afvalverwerking leidt tot een gebrek aan kennis over te verwachten verantwoordelijkheden, kosten en baten.

Decommissioning-fase

- Het huidige uitgangspunt is de volledige verwijdering van een offshore windpark na de overeengekomen gebruiksperiode.
- De kosten voor het verwijderen van systemen op de zeebodem zullen substantieel zijn. Economisch-ecologische afwegingen met betrekking tot de volledige of gedeeltelijke verwijdering zullen nodig zijn voor deze systemen. Het betreft de volgende systemen: export en inter-array kabels tussen de windturbines in, de windturbinefundering en de scour protection die fundaties beschermt. Een duidelijk EU-breed beleid, regelgeving en richtlijnen zijn vereist om een gelijk Europees speelveld op de competitieve offshore windmarkt te borgen en duidelijkheid te verschaffen aan alle betrokken partijen.
- De uitvoering van verwijderingsactiviteiten kan, zeker op de korte termijn, gebaseerd worden op de installatieactiviteiten van het desbetreffende systeem. Ruimte voor (kosten)efficiëntere afhandeling van deze activiteiten is mogelijk, door innovatie in zowel de logistieke als de afvalverwerkingsfase.
- De capaciteiten van de haven vanuit waar de logistieke activiteiten plaats zullen vinden zullen in lijn moeten zijn met de te gebruiken specialistische schepen. Typische randvoorwaarden voor deze schepen omvatten onder andere een vrije doorganghoogte, voldoende kade capaciteit (ton per m²), aanwezige mobiele kranen op de kade en (tijdelijke) opslagruimte in de haven.
- De noodzakelijke opslag van volumes aan windparksystemen hangt direct samen met de balans en afstemming van aanlevering vanaf zee en afname door de end-of-life activiteiten per tijdseenheid. Deze klassieke stock-flow situatie maakt een exacte inschatting van opslagruimte lastig.
- De kosten van de retourlogistiek worden gedreven door onder meer de regelgeving, locatie van een windpark, de havenlocatie, benodigde scheepstypen en equipment en weerpatronen en waterdiepte. De voorbereiding van de decommissioningactiviteiten kan daarmee benaderd worden als een kostenoptimalisatieprobleem met meerdere variabelen.

End-of-life fase

- Met het uitgangspunt om te streven naar hoogwaardig materiaal(her)gebruik vanuit het circulaire economie paradigma zullen na de verwijdering van zee uiteenlopende afvalverwerkingsactiviteiten nodig zijn om de reststroom van systemen en materialen een hoogwaardige bestemming te geven.
- Hergebruik van offshore windparksystemen na 20+ jaar offshore operatie vindt nauwelijks plaats vanwege het ontwerp voor locatie-specifieke eisen en gebruik van de system levensduur (lifetime)

door bijvoorbeeld vermoeiing tijdens de operationele fase. Ook de afwezigheid van gestandaardiseerde componenten in de sector helpt niet mee. Enkel de toepassing als spare part voor gelijke windturbine types wordt in de huidige markt als haalbaar gezien.

- Het overgrote deel van de offshore windturbinesystemen bestaat uit metalen (staal, gietijzer en koper) die zouden gerecycled kunnen worden door bestaande partijen. De restwaarde van deze metalen is sterk afhankelijk van de volatiele materiaalmarkt en de behaalde kwaliteit van het recyclaat ten opzichte van maagdelijk materiaal.
- De huidige (mechanische en chemische) recyclingtechnologieën van composieten zijn kostbaar en nog niet volwassen genoeg voor marktintroductie. Ontwikkeling in de recycling processen, schaal, marktvrage en marktwaarde t.o.v. alternatieve en maagdelijke-materialen alsmede regelgeving zijn nodig om dit mogelijk te maken.
- De huidige afvalverwerkingsvoorschriften staan verbranding van composietafval toe wanneer de kosten voor afgifte van de ontdoener meer bedragen dan €205 per ton materiaal. Deze grens bepaalt nu de haalbaarheid van alternatieve oplossingen.

Het huidige functioneren van de offshore windpark waardeketen laat zien dat zich voldoende kansen in de regio Zuid-Holland kunnen voordoen, gedreven door logistieke activiteiten en (hoogwaardige) afvalverwerking.

6.2 Welke ontwikkelingen kunnen impact hebben op marktontwikkeling?

Indien de volgende ontwikkelingen in de offshore-windpark-sector daadwerkelijk plaats zullen vinden, zullen ze van invloed zijn op de activiteiten in de decommissioning en/of end-of-life fase:

- Het structureel hergebruik van composietmateriaal (glas fiber reinforced polymers) met oog voor een nog te ontwikkelen marktvrage.
- Het hergebruik van composietmateriaal vezels of hars met oog voor een nog te ontwikkelen marktvrage m.b.v.:
 - de ontwikkeling van hiervoor benodigde mechanische, chemische en thermische recyclingprocessen
- De opschaling van het gebruik van (direct drive) permanente magneten op basis van NdFeB en een nader te ontwikkelen end-of-life-proces (gericht op recycling, remanufacturing of re-use)
- De verdere ontwikkeling van twee monopile verwijderingstechnologieën: hydraulische verwijdering en verwijdering met trillingen
- Aanpassingen van ontwerp van windturbinesystemen met het oog op wensen en eisen vanuit de decommissioning en end-of-life fase
- De aanscherping van beleid, wet- en regelgeving omtrent decommissioning en end-of-life activiteiten, en dan met name de wijze waarop vroeg in het proces van tendering en installatie expliciet met de decom-fase rekening wordt gehouden.

De tijdlijn van de bovenstaande ontwikkelingen en het moment waarop de ontwikkelingen eventueel geïmplementeerd zouden kunnen worden zijn moeilijk in te schatten en zijn ook onderling afhankelijk. Zo kan hydraulisch verwijderen van monopiles kostenefficiënter zijn dan het onderwater afsnijden van de fundaties. Of kunnen ontwikkelingen een versnelling doormaken naar aanleiding van een verandering in regelgeving (e.g. monopiles mogen niet achtergelaten worden in de zeebodem en zullen in hun geheel verwijderd moeten worden).

6.3 Actielijnen

De ontwikkeling van economische bedrijvigheid in Zuid-Holland en het Rotterdamse havengebied profiteert van acties die ertoe leiden dat:

- het volume aan ontmantelde offshore-windparken dat vanuit de regio Zuid-Holland bediend en naar de regio getransporteerd wordt, zo groot mogelijk wordt;
- voor de verdere verwerking van elk van deze stromen de hoogst haalbare efficiëntie en het grootste waarde behoud bereikt wordt.

De ontwikkelingen zullen ervan profiteren als synergie wordt bereikt met (a) andere activiteiten binnen de offshore wind keten, en dan met name rond de installatie van OWF en , (b) andere ketens en sectoren, zoals bijvoorbeeld overige aanbieders van composietenafval. Daardoor kunnen schaalvoordelen bereikt worden waardoor men kan concurreren met andere EU havens.

Deze stimulans kan plaatsvinden binnen drie thema's: Toepassing, R&D en Beleid.

1 Toepassing: Vroegtijdige en grootschalige ontwikkeling van een integrale infrastructuur voor de decommissioning en end-of-life fase om de totale kosten te minimaliseren voor iedere individuele betrokken partij.

De primair verantwoordelijke partij voor succesvolle verwijdering van de offshore windparken is de windparkeigenaar. Het is onduidelijk wat de totale kosten zullen zijn van deze verwijdering en afvalverwerking. Uit dit onderzoek blijkt dat de 120 kEUR per MW die via de geëiste bankgarantie gereserveerd dient te worden niet toereikend zal zijn voor het financieren van de integrale decommissioning activiteiten. De volledige kosten en baten binnen de end-of-life fase zijn hierbij niet meegenomen. Ongetwijfeld is het in het belang van een eigenaar van een offshore windpark een optimale balans te vinden tussen het kosteneffectief verwijderen en verwerken van het windpark na exploitatie, en het voldoen aan de geldende wet- en regelgeving.

Wanneer de totale kosten voor deze activiteiten geminimaliseerd kunnen worden dankzij een effectief en schaalbaar georganiseerd decommissioning en end-of-life ecosysteem komt dit ten goede aan zowel de windparkeigenaren (lagere kosten) als andere (keten)partijen (aantrekken van activiteiten naar de regio vanwege de aantrekkelijke kosten a.g.v. grootschaligheid).

Deze decommissioning 'one-stop-shop' kan streven naar minimale tussentijdse opslag en logistieke bewegingen door de operatie op zetten op basis van de te verwachten lokale stromen (flows) en (gebufferde) voorraden (stocks).

Vier aandachtsgebieden zouden parallel ontwikkeld moeten worden om tot kosten-effectieve en (dus) grootschalige verwerkingscapaciteiten in de regio Zuid-Holland te komen:

- I Een invulling is nodig om binnen de geldende wet- en regelgeving en met volwassen technologieën een schaalbare verwerking van turbinebladen aan te bieden;
- II Eveneens is een invulling nodig om binnen de geldende wet- en regelgeving en met volwassen technologieën een schaalbare verwerking (hergebruik, remanufacturing, recycling) van permanente magneten aan te bieden;
- III De nacelle vormt een compact deelsysteem waarin een zeer grote hoeveelheid (50.000+) componenten samenkomen. Het demonteren en scheiden van deze componenten zal naar verwachting voornamelijk handmatig werk zijn. Een veilige werkomgeving is hiervoor randvoorwaardelijk.
- IV Gezien het hoge gehalte staal in de turbines zal de precieze volumestroom per jaar in lijn moeten zijn met de logistieke- en staalverwerkingscapaciteiten zodat voorkomen wordt dat er grote lokale opslag van componenten op onpraktische of kostbare locaties nodig is.

Toekomstige bedrijvigheid met betrekking tot logistieke dienstverlening, opslag en hergebruik- en/of recyclingactiviteiten zal gedreven worden door toekomstige marktfragen vanuit gekoppelde productketens en sectoren buiten de offshore windsector.

2 R&D: het stimuleren van kennisontwikkeling, product- en procesinnovaties die ten goede komen aan doelmatige verwijdering en verwerking van uit bedrijf genomen offshore windparken

Het Nederlandse bedrijfsleven heeft een sterke internationale positie in tal van activiteiten binnen de huidige offshore windketen en de offshore sector in den breedte. Door voort te bouwen op deze bestaande expertise en relaties kan reeds bestaande bedrijvigheid uitgebouwd worden. Uit de huidige bedrijfsactiviteiten kan met name de expertise benut worden op het gebied van: bodemonderzoek, ontwerpen van turbines, rotorbladen, funderingen, parken, en in-/de-installatie/onderhoud methoden, monopile fundatie fabricage en scheepsbouw ten behoeve van de bouw, installatie en onderhoud van windparken. In hoofdstuk 5 zijn technologische ontwikkelingen besproken die aan deze onderwerpen een bijdrage leveren en dus ook aan een mogelijke toekomst voor decommissioningactiviteiten. Met de toename van benodigde windenergie-flexibiliteit en -systeemintegratie komen ook grote R&D vraagstukken over de integratie van windparken met andere systemen zoals waterstof of opslag. Zelfs offshore zonne-energie binnen een windfarm wordt onderzocht als deel van het Hollandse Kust Noord windpark.

Diverse organisaties, waaronder WindEurope, Topsector Energie, NWEA, GROW en TKI Wind op Zee, streven naar het uitbouwen en delen van kennis en expertise in de Nederlandse (offshore) windsector. Door de te ontwikkelen activiteiten in de decommissioning en end-of-life fase te integreren binnen deze bestaande kennisnetwerken kan geput worden uit multidisciplinaire kennis.

3 Beleid: (bijdragen aan de) verduidelijking en ontwikkeling van decommissioning en waste management wet- en regelgeving op regionaal en (inter)nationaal niveau.

Ketenpartijen, waaronder windpark eigenaren, denken en handelen binnen de gestelde wet- en regelgeving tijdens het ontwikkelen, exploiteren, verwijderen van windparken en de uiteindelijke reststroomverwerking na de verwijdering. Om te komen tot een ketenverduurzaming op grote schaal zal is de ontwikkeling van consistent beleid bepalend voor de inspanningen van ontwerpende partijen en fabrikanten van de te leveren systemen. De concurrentie tussen fabrikanten van offshore windpark systemen, het level playing field en het risicomijdende investeringsgedrag van financiers in offshore windparken³² vereisen voorschriften op EU-niveau. Deze voorschriften zullen de sector duidelijkheid moeten gaan verschaffen over de toekomstige eisen op het gebied van decommissioning. Alleen dan zullen ontwikkelingen gericht op de lange termijn worden ingezet (bijvoorbeeld m.b.t. de verwerking van composieten).

Een actieve rol van Zuid-Holland en Havenbedrijf Rotterdam in deze is gewenst om de hierboven geschetste kansen, op basis van one-stop-shop en gewenste schaalgrootte, dichterbij te brengen.

³² PBL (2016). Technologie voor Windenergie. Een rapportage opgesteld in het bredere kader van het rapport 'Het belang van een thuismarkt voor de export van eco-innovaties. Inzichten uit de praktijk.' Den Haag, Planbureau voor de Leefomgeving.

6.4 De rol van de regio en de haven Rotterdam: regionale invulling van actielijnen

De analyse in dit rapport gaat niet specifiek in op de eventuele aantrekkelijkheid van de regio Zuid-Holland of het havengebied Rotterdam ten aanzien van activiteiten op het gebied van decommissioning. Sterker nog, Rotterdam heeft zich in het verleden niet sterk geprofileerd als leidende speler rond windenergie of ontmanteling van boorplatforms.

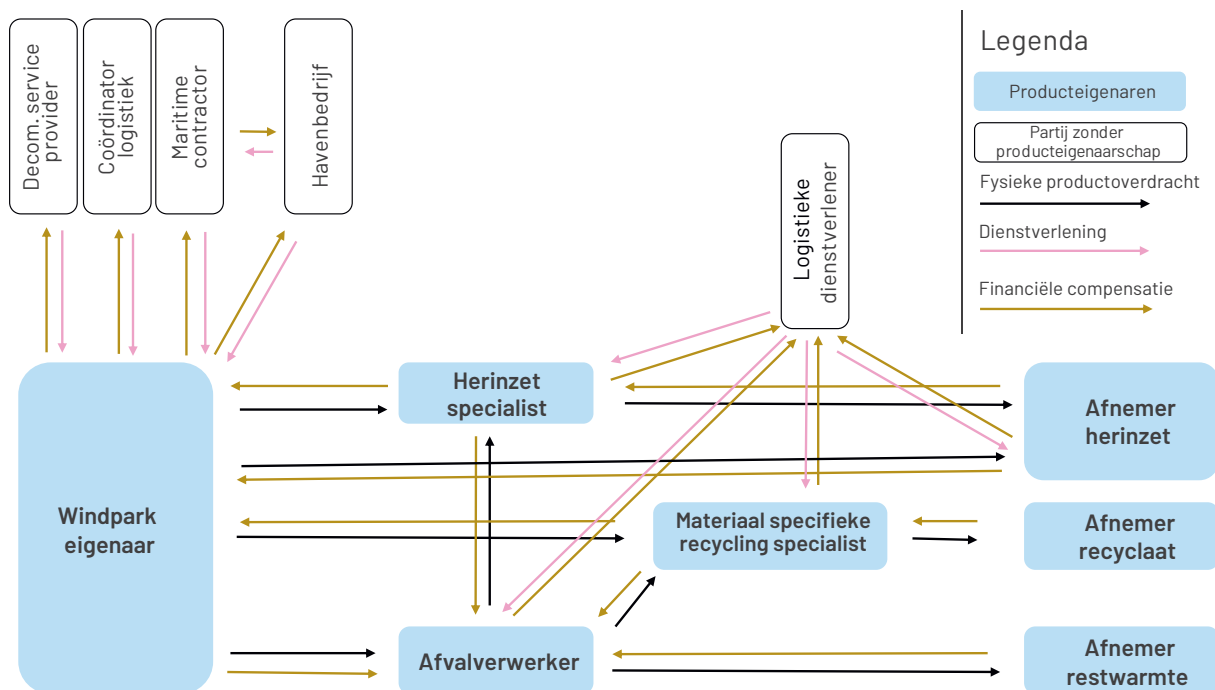
Toch zijn er een aantal aanleidingen om te veronderstellen dat Rotterdam en de regio deze rol sterker zou kunnen oppakken. Aanleidingen zijn:

- Aanwezigheid van relevante spelers uit de keten in de regio
- Heroriëntatie van het Havenbedrijf Rotterdam t.a.v. offshore-activiteiten
- Karakteristieken van de haven als logistiek ontwikkeld knooppunt

Aanwezigheid van relevante spelers uit de keten in de regio

Zoals in paragraaf 6.3 werd aangegeven zou een aantrekkelijke propositie kunnen ontstaan door groot-schalige integrale ontmanteling van OWF te ontwikkelen waardoor kostenoptimalisatie ontstaat. Deze minimale kosten zijn nodig om als Rotterdams havengebied en provincie Zuid-Holland concurrerend te kunnen zijn met andere mogelijke decommissioning-hubs.

Deze kostenoptimalisatie vraagt een op elkaar afgestemde aaneenschakeling van activiteiten. Een succesvolle afstemming van de doorstroom (flow) en opstapeling (stock) van materiaalstromen om tot een zo efficiënt mogelijk verwerkingsproces te komen zal bijdrages vragen van iedere partij uit de eerder geschetste waardeketen (Figuur 19).



Figuur 19 (herhaald) Waardenetwerk decommissioning en end-of-life fase

In het Rotterdams havengebied en de provincie Zuid-Holland zijn veel bedrijven gesitueerd die een mogelijke plek kunnen innemen in dit netwerk. Voorbeelden van partijen zijn samengevat in Tabel 11.

Tabel 11 Regionale voorbeelden waardenetwerk actor type

Asset levenscyclusfase	Actor type	Voorbeeld van regionale partij
Decommissioning	Windpark eigenaar	Orsted, Eneco, Shell, Engie, Vattenfall
	Decommissioning service provider	Certion, Business in Wind
	Coördinator logistiek	Rhenus logistics, Royal Roos
	Maritime contractor	Subsea7, DEME, Heerema, Van Oord, Boskalis, Jumbo offshore, PVE Holland
	Havenbedrijf	Port of Rotterdam
End-of-life	Logistieke dienstverlener	Rail Service Center Rotterdam Binnenvaart, wegtransport
	Herinzet specialist	Interieurbouwer, composietstructurenproducent
	Herinzet afnemer	Siemens-Gamesa, GE, Enercon, Vestas, Waterschappen, provincies, gemeentes, kantoormeubelafnemers
	Materiaalspecifieke recycling specialist	TATA Steel, Virol
	Afnemer recycelaat	SIF, Smulders, Goudsmit
	Afvalverwerker	Renewi, SUEZ, Remondis
	Afnemer restwarmte	Eneco, warmtenet-exploitanten
	Levenscyclus-overkoepelend	Overheid, maatschappelijk belang
	Wet- en regelgeving	

Het bundelen van dit netwerk en het organiseren van commitment voor lange-termijnontwikkelingen kan een belangrijk vertrekpunt vormen voor de ontwikkeling van de nieuwe rol aan het eind van de waardeketen van offshore wind voor de regio.

Heroriëntatie van het Havenbedrijf Rotterdam t.a.v. offshore-activiteiten

De Haven Rotterdam heeft zich in het verleden niet sterk geprofileerd als gebied voor offshore-activiteiten. Daar is verandering in gekomen getuige o.a. de volgende tekst op de website van HbR³³:

“De haven van Rotterdam heeft de ambitie om dé offshore-haven van Europa te zijn. Het Havenbedrijf Rotterdam zet hier dan ook vol op in en kent geen beperkingen in het realiseren van offshore-ambities. Projecten van elk formaat kunnen in de haven van Rotterdam terecht en de mogelijkheden worden de komende jaren alleen maar groter.

Wat de Rotterdamse haven allemaal biedt:

- *Voldoende ruimte voor offshore-ontwikkeling, zowel op het land als in het water*
- *Innovatiefaciliteiten*
- *Samenwerking op het gebied van branding en marketing*
- *Breed aanbod aan reparatie- en onderhoudsfaciliteiten*
- *Beschutte ligplaatsen met een waterdiepte tot 26 meter, dichtbij de Noordzee*
- *Groot, bestaand maritiem cluster”.*

³³ www.portofrotterdam.com/nl/zakendoen/vestigen/vestigingsmogelijkheden/offshore (d.d. 1 oktober 2020)

Daarnaast biedt HbR ook op de Tweede Maasvlakte uitgebreide (test)faciliteiten aan voor de ontwikkeling van offshore-wind-ontwikkelingen³⁴. Het bestemmingsplan voor de Tweede Maasvlakte is hiervoor ook aangepast.

Als zichtbaar bewijs voor deze ambitie is de vestiging van de SIF-Group op de Tweede Maasvlakte (eerste paal in 2015 geslagen)³⁵. SIF produceert en verscheept daar monopiles voor offshore windparken met een diameter tot maximaal 11 meter en een hoogte tot 120 meter.

Op basis van een eerste gesprek met HbR werd al geconstateerd dat deze op installatie gerichte activiteit op termijn ook omgekeerd zou kunnen worden, omdat de logistieke en ruimtelijke vragen voor installatie en decommissioning vergelijkbaar zijn. De ruimtelijke randvoorwaarden voor het ontwikkelen van een cluster zijn daarmee geschapen.

Het is de bovengenoemde ambitie van de haven die essentieel is om de uitdagingen, zoals geschetst in deze call-to-action, aan te kunnen gaan en vol te houden.

34 www.portofrotterdam.com/nl/zakendoen/vestigen/vestigingsmogelijkheden/offshore/maasvlakte-2-test-en-demolatie-voor-offshore

35 <https://sif-group.com/nl/wind/fundaties>

-07-

Dankwoord

De resultaten in dit onderzoek zijn mede tot stand gekomen dankzij de betrokkenheid van de volgende personen en partijen:

Betrokken bedrijven: Eneco, Ørsted, Certion, Siemens-Gamesa, Heerema, WPT Virol, RVO, Subsea7, Business in Wind, GE-LM windpower, Rhenus logistics

Betrokken afgevaardigden van kennisinstellingen: Ruud Balkenende, Julie Teuwen, Jeroen Hoving, Maarten Bakker (TU Delft), Bernard Bulder, Harald van der Mijle Meijer (TNO), Albert Ten Busschen (Windesheim)



Colofon

©SmartPort
oktober 2020

Ontwerp: IJzersterk.nu
Fotografie: Shutterstock

Alle opgenomen informatie is eigendom van SmartPort. Overnemen van inhoud, geheel of gedeeltelijk is toegestaan mits bronvermelding is toegepast.

Vrijwaring

SmartPort heeft de grootst mogelijke zorg besteed aan de samenstelling van dit document. Desondanks accepteert SmartPort geen aansprakelijkheid voor eventuele onjuistheden in de informatie, noch voor schade, overlast of ongemak dan wel andersoortige gevolgen die voortvloeien uit of samenhangen met het gebruik van deze informatie.



connecting
knowledge

HEEFT U VRAGEN?

SmartPort

info@smartport.nl

tel. 010 402 03 43