

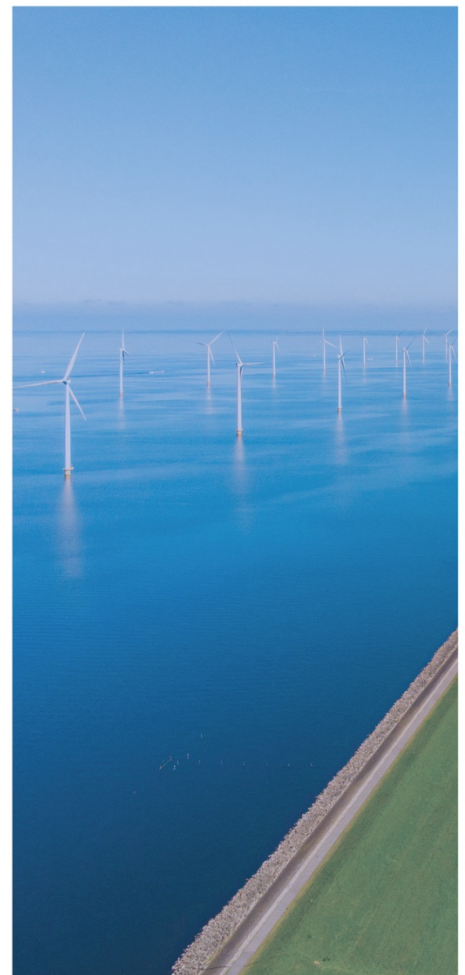


BRIDGE OF EUROPE

Blauwdruk

De eerste generatie offshore windparken nadert het einde van haar levensduur en zal de komende decennia grootschalig worden ontmanteld. Dat is nieuw terrein voor Nederland en Europa en roept fundamentele vragen op over logistiek, regie én circulariteit.

Deze blauwdruk brengt de randvoorwaarden in kaart voor het verwerken van windturbines in een Nederlandse circulariteitshub.



Bridge of Europe: Blauwdruk

Dit rapport is onderdeel van het initiatief Bridge of Europe, geïnitieerd door Amsterdam IJmuiden Offshore Ports (AYOP) en ECHT Regie in Transitie. Het rapport is opgesteld door ECHT Regie in Transitie in opdracht van provincie Noord-Holland, gemeente Amsterdam, gemeente Velsen, programmabureau Noordzeekanaalgebied en de Port of Amsterdam.

13 mei 2026

Aan dit rapport hebben meegeschreven:

Floris van der Plas

Lisa Vroone

Jens de Bokx

Disclaimer: ECHT is niet verantwoordelijk voor de toepassing of het gebruik van bevindingen, gegevens en analyses in dit rapport. ECHT is niet aansprakelijk jegens ontvangers van deze informatie of derden voor de gevolgen die voortvloeien uit fouten of discrepanties in deze informatie, voor het vertrouwen van ontvangers of derden in dergelijke informatie, of voor enige claim, verlies of schade van welke aard of aard dan ook die voortvloeit uit of verband houdt met (1) de tekortkoming of ontoereikendheid van deze informatie voor welk doel dan ook, ongeacht of deze bekend is of aan de auteurs is bekendgemaakt, (2) enige fout of discrepantie in deze informatie, (3) het gebruik van deze informatie, of (4) enig verlies van zaken of ander gevolgverlies of -schade, ongeacht of dit voortvloeit uit een van de voorgaande.

Management samenvatting

De Nederlandse offshore windsector staat aan de vooravond van een nieuwe fase, waarin naast de grootschalige uitrol van windparken ook de ontmanteling van bestaande turbines een steeds belangrijkere rol gaat spelen. De komende decennia zullen aanzienlijke volumes materialen vrijkomen, wat vraagt om een goed georganiseerde en circulaire end-of-life keten. Dit rapport onderzoekt onder welke voorwaarden een circulariteitshub kan bijdragen aan het efficiënt verwerken en hoogwaardig benutten van deze materiaalstromen. Daarbij staat niet alleen de vraag centraal welke circulaire verwerkingsroutes technisch mogelijk zijn, maar vooral hoe deze in de praktijk georganiseerd, geclusterd en opgeschaald kunnen worden.

In hoofdstuk 2 van het rapport wordt een analyse gemaakt van de te verwachten materiaalstromen en volumes uit Nederlandse offshore windparken, onshore windturbines en windparken in het bredere Noordzeegebied. Hieruit blijkt dat de komende decennia substantiële materiaalstromen vrijkomen, met name staal, maar ook composieten, koper, aluminium en zeldzame aardmetalen. De analyse laat zien dat deze volumes niet geleidelijk toenemen, maar zich kenmerken door fluctuaties en een duidelijke schaalprong vanaf circa 2045. Deze ontwikkeling vormt de basis voor schaalvoordelen binnen een circulariteitshub, maar brengt ook onzekerheden met zich mee in timing en spreiding, onder andere door keuzes rond levensduurverlenging van windparken en de verdere uitrol van nieuwe capaciteit.

In hoofdstuk 3 van het rapport wordt een analyse gedaan van de beschikbare circulaire verwerkingsroutes voor windturbinecomponenten en materialen. Hieruit blijkt dat er technisch meerdere hoogwaardige strategieën beschikbaar zijn, met name op component- en materiaalniveau, maar dat de toepassing in de praktijk wordt beperkt door logistieke complexiteit, marktonvolwassenheid en gebrek aan schaal. Voor kritieke grondstoffen geldt bovendien dat Nederland momenteel vooral een logistieke en voorbereidende rol kan vervullen, terwijl hoogwaardige verwerking momenteel grotendeels buiten Europa plaatsvindt.

In hoofdstuk 4 van het rapport wordt een analyse gedaan van de kosten en baten van circulaire verwerking van windturbines. Hieruit blijkt dat de economische waarde van materiaalstromen sterk afhankelijk is van de gekozen verwerkingsroute en de mate van voorbereiding en bundeling. Zonder coördinatie en schaal blijven opbrengsten beperkt tot de waarde van secundaire grondstoffen, terwijl door clustering en bundeling juist extra waarde kan worden gecreëerd. De toegevoegde waarde van een circulariteitshub ligt daarbij met name in kostenverlaging door logistieke optimalisatie, operationele efficiëntie en schaalvoordelen.

In hoofdstuk 5 van het rapport wordt een analyse gedaan van het ecosysteem van betrokken stakeholders. Hieruit blijkt dat Nederland beschikt over een sterke basis van relevante partijen, waaronder havens, logistieke dienstverleners en verwerkers, maar dat de keten momenteel gefragmenteerd is. Effectieve circulaire verwerking vereist samenwerking tussen een groot aantal stakeholders en actieve coördinatie om materiaalstromen te bundelen en schaalvoordelen te realiseren.

In hoofdstuk 6 van het rapport wordt een blauwdruk uitgewerkt voor een circulariteitshub voor offshore windturbines. Hieruit blijkt dat een hub verschillende ontwikkelvormen kan aannemen, variërend van een logistiek knooppunt tot een geïntegreerd verwerkingscluster. De mate van clustering van opslag, voorbereiding en verwerking bepaalt de economische meerwaarde, waarbij verdere integratie leidt tot minder transport, lagere kosten en een hogere materiaalwaarde.

Overkoepelend laat dit onderzoek zien dat de ontwikkeling van een circulariteitshub voor offshore windturbines geen puur technologische uitdaging is, maar vooral een organisatorische en logistieke opgave. Staal vormt daarbij de dominante en economisch meest robuuste materiaalstroom, terwijl composieten en kritieke grondstoffen de grootste uitdagingen vormen door beperkte verwerkingscapaciteit en onvolwassen markten. Hogere circulaire strategieën zoals re-use en repurpose bieden potentie om de waarde van materiaalstromen te vergroten, maar bevinden zich nog in een ontwikkelfase en vragen om gerichte coördinatie en marktontwikkeling.

Een circulariteitshub vervult daarmee primair een systeemfunctie: het organiseren, bundelen en verbinden van materiaalstromen tussen ontmanteling en eindverwerking. Door in te zetten op clustering, samenwerking en aansluiting op bestaande industrie en infrastructuur kan Nederland zich positioneren als een logische spil in de circulaire verwerking van offshore windturbines en bijdragen aan het behoud van waardevolle materialen binnen de Europese economie.

Inhoudsopgave

1. Inleiding.....	8
2. Grondstoffen- en volume analyse	12
2.1 Grondstoffen analyse	12
2.2 Kritieke grondstoffen.....	14
2.3 Materiaalintensiteiten	15
2.4 Te ontmantelen windturbines	16
2.5 Totale grondstoffenvolumes.....	17
2.4 Conclusie	22
3. Circulaire verwerkingsroutes	24
3.1 Uitleg R-strategieën	24
3.2 R-strategieën op componentniveau	25
3.2.1 Re-use, repair, remanufacture en refurbish van mechanische componenten	25
3.2.2 Re-use van permanente magneten.....	26
3.2.3 Repurpose van componenten.....	27
3.3 Recyclen van materialen.....	28
3.3.1 Recycling van staal en ijzer (torens, funderingen, substructures, secundair staal)	28
3.3.2 Recycling van composiet (rotorbladen, nacelle covers)	29
3.3.3 Recycling van koper (kabels, generatoren, transformatoren).....	30
3.3.4 Recycling van aluminium (kabels, vermogenselektronica, componentbehuizingen)	31
3.3.5 Recycling van zeldzame aardmetalen	32
3.4 Conclusies voor circulariteitshub.....	33
4. Kosten en batenanalyse	35
4.1 Kosten ontmanteling.....	35
4.2 Schrootwaarde van de materialen.....	36
4.2.1 Staal.....	37
4.2.2 Aluminium	37
4.2.4 Koper	38
4.2.5 IJzer.....	38
4.2.6 Composiet.....	38
4.3 Business case circulariteitshub.....	39
4.4 Conclusie	41
5. Stakeholderanalyse	43
5.1 Asset owners & operators	43
5.2 Offshore decommissioning & marine contractors	44
5.3 Transport & heavy logistics providers.....	45
5.4 Haven- en marshallingbedrijven	45

5.5 Component hergebruik specialisten.....	46
5.6 Metaalverwerkers	46
5.7 Composietverwerkers	47
5.8 Recyclers van kritieke grondstoffen en magneetverwerkers	48
5.9 Systeem- en governancepartijen	49
6. Blauwdruk circulariteitshub	51
6.1 Voorbereiding en decommissioning fase	53
6.1.1 Besluitvorming en investeringen	54
6.1.2 De rol van het kavelbesluit en tenders	54
6.1.3 Vergunningen	54
6.1.4 Decommissioning fase.....	55
6.2 Ontvangst.....	56
6.3 Opslag	57
6.4 Sortering, voorbewerking en circulaire verwerking.....	59
6.4.1 Torens (staal).....	59
6.4.2. Nacelles (gemengde materialen, incl. kritieke grondstoffen)	60
6.4.3. Windturbinebladen (composiet)	61
6.4.4 Kabels (koper/aluminium).....	63
6.5 Conclusie	64
7. Conclusie en discussie.....	66
7.1 Conclusie	66
7.2 Discussie.....	67
8. Referenties en bijlagen 8.1 Referenties.....	72
8.2 Bijlagen Bijlage A.....	74
Onderbouwing grondstoffen- en volume analyse.....	74
Bijlage B	79
Verdieping kritieke grondstoffen.....	79
Bijlage C	87
Overzicht ecosysteem.....	87

An aerial photograph of a wind farm, showing a long row of wind turbines stretching across a green field. The image is overlaid with a semi-transparent blue filter. A white decorative line runs along the right edge, and another white line curves across the bottom. The text '1. INLEIDING' is centered in the lower half of the image.

1. INLEIDING

1. Inleiding

De Nederlandse windsector bevindt zich op een kantelpunt. Terwijl de uitrol van windenergie op zee de afgelopen jaren is opgeschaald, nadert een groeiend deel van de bestaande windparken in de komende decennia het einde van de levensduur. Dit betekent dat Nederland in toenemende mate te maken krijgt met grootschalige ontmanteling van offshore turbines en bijbehorende infrastructuur. Daarbij komen grote hoeveelheden materialen vrij: staal, aluminium, koper, composiet en, bij een deel van de turbines, permanente magneten met zeldzame aardmetalen. Deze materiaalstromen leveren enerzijds logistieke, economische en ecologische uitdagingen op, maar bieden anderzijds ook kansen voor hoogwaardige circulaire verwerking en nieuwe economische waardecreatie.

De uitdaging is daarbij niet alleen technisch, maar vooral systeemmatig. Zonder gerichte organisatie dreigt versnippering van materiaalstromen, wat leidt tot inefficiënte logistiek, hogere kosten en verlies van materiaalwaarde. De vraag is daarom niet alleen of materialen kunnen worden teruggewonnen, maar vooral hoe Nederland deze stromen kan organiseren, bundelen en opschalen tot een samenhangende en economisch haalbare circulaire waardeketen.

Het initiatief Bridge of Europe is ontstaan vanuit een CIRCO-traject dat door het Ministerie van Klimaat en Groene Groei is georganiseerd om stakeholders uit de windsector bijeen te brengen en kansen voor circulariteit te identificeren. AYOP (Amsterdam IJmuiden Offshore Ports) en ECHT Regie in Transitie hebben hieruit het project Bridge of Europe opgezet met de ambitie een brug te bouwen tussen ontmanteling en circulaire verwerking van windturbines. Dit onderzoek sluit aan bij beleidskaders die sturen op circulariteit, industriële veerkracht en leveringszekerheid, waaronder Europese en nationale circulariteitsambities en de toenemende focus op kritieke grondstoffen.

Doel van het onderzoek

Dit onderzoek heeft als doel om de ontwikkeling van een schaalbare circulaire waardeketen voor end-of-life windturbines in Nederland te verkennen en te onderbouwen. Het rapport werkt toe naar een eerste blauwdruk voor een circulariteitshub die deze waardeketen kan faciliteren. Daarbij wordt inzicht gegeven in de omvang, timing en samenstelling van toekomstige materiaalstromen, de technisch en economisch meest relevante circulaire verwerkingsroutes, en de logistieke, ruimtelijke en organisatorische randvoorwaarden die bepalend zijn voor clustering en opschaling. Met deze inzichten biedt het onderzoek een onderbouwd kader voor besluitvorming over de inrichting, locatie en ontwikkeling van een circulariteitshub en de rol die Nederland hierin kan vervullen.

Wat is een circulariteitshub?

Een circulariteitshub wordt in dit onderzoek gedefinieerd als een ruimtelijk en organisatorisch knooppunt waar materialen en componenten uit ontmantelde offshore windturbines samenkomen en waar functies zoals ontvangst, opslag, voorbereiding en doorvoer naar circulaire verwerkingsroutes doelgericht worden gebundeld. De hub vormt daarmee de schakel tussen offshore ontmanteling en onshore verwerking.

Door deze koppeling faciliteert de hub niet alleen efficiënte logistiek, maar ook de integratie van economische activiteiten en samenwerking tussen ketenpartijen. In die zin vervult de circulariteitshub een systeemfunctie: het organiseren en clusteren van materiaalstromen om schaalvoordelen, operationele efficiëntie en hogere mate van circulariteit in de windenergieketen mogelijk te maken.

Scope

De primaire focus van dit onderzoek ligt op offshore windturbines in Nederland, omdat deze de komende decennia in toenemende mate worden ontmanteld en grootschalige materiaalstromen genereren die nog niet eerder op deze schaal zijn verwerkt. De analyse richt zich in het bijzonder op de hoofdcomponenten van windturbines en de bijbehorende materiaalstromen.

Om de potentiële schaal en economische meerwaarde van een circulariteitshub beter te kunnen beoordelen, worden daarnaast ook materiaalstromen van Nederlandse onshore windturbines en offshore windparken in het bredere Noordzeegebied meegenomen. Deze aanvullende volumes maken het mogelijk om te analyseren in hoeverre een hub voor Nederlandse offshore windturbines kan opschalen naar een bredere rol in de verwerking van nationale en internationale stromen.

Funderingen, kabels, substations en scour protection vallen grotendeels buiten de primaire scope van dit onderzoek, maar worden waar relevant meegenomen om de samenhang in de keten en de logistieke implicaties voor een circulariteitshub te duiden.

Opbouw & structuur

Het rapport is thematisch opgebouwd rond de belangrijkste bouwstenen die nodig zijn om tot een onderbouwde blauwdruk te komen:

- **Hoofdstuk 2 (Grondstoffen- en volumeanalyse)** brengt in kaart uit welke materialen windturbines bestaan, hoeveel turbines en vermogen aanwezig zijn in Nederland en het Noordzeegebied, en welke materiaalstromen vrijkomen bij ontmanteling. Dit vormt de kwantitatieve basis voor het rapport.
- **Hoofdstuk 3 (Circulaire verwerkingsroutes)** beschrijft de mogelijke end-of-life strategieën op component- en materiaalniveau en laat zien hoe windturbines in de praktijk circulair verwerkt kunnen worden. Dit hoofdstuk vormt het analysekader voor de verdere uitwerking.
- **Hoofdstuk 4 (Kosten- en batenanalyse)** verkent het economische perspectief van ontmanteling en circulaire verwerking, en maakt inzichtelijk hoe de businesscase van een circulariteitshub tot stand komt.
- **Hoofdstuk 5 (Stakeholderanalyse)** vertaalt de verwerkingsketen naar het Nederlandse speelveld en brengt de relevante partijen en hun rol in kaart. Dit maakt zichtbaar waar capaciteit aanwezig is en waar samenwerking nodig is.
- **Hoofdstuk 6 (Blauwdruk circulariteitshub)** beschrijft de ruimtelijke, logistieke en organisatorische randvoorwaarden voor de ontwikkeling van een circulariteitshub.
- **Hoofdstuk 7 (Conclusie en discussie)** reflecteert op de belangrijkste inzichten en plaatst deze in perspectief.

Verwachte resultaten

Dit onderzoek levert bouwstenen voor besluitvorming over de ontwikkeling van een circulariteitshub. Het biedt een kwantitatieve basis van materiaalstromen en volumes, inzicht in de economische waarde van verschillende verwerkingsroutes en een overzicht van het Nederlandse circulaire ecosysteem. Daarnaast resulteert het in een eerste blauwdruk voor de inrichting van een circulariteitshub, waarin de ruimtelijke, logistieke en organisatorische randvoorwaarden zijn uitgewerkt.

De resultaten maken daarmee niet alleen inzichtelijk waar kansen en knelpunten in de keten liggen, maar geven ook richting aan keuzes over locatie, schaal, samenwerking en de inrichting van verwerkingscapaciteit. Hiermee ondersteunt het rapport partijen in de windketen, overheden en investeerders bij het maken van onderbouwde afwegingen over hoe circulaire verwerking van windturbines georganiseerd en opgeschaald kan worden.

Methodologie

Dit onderzoek is gebaseerd op een combinatie van kwantitatieve data-analyse, literatuuronderzoek en input vanuit de praktijk.

- **Materialen- en volumeanalyse**

Voor de analyse van materiaalstromen is gebruikgemaakt van een samengestelde database waarin gegevens over turbine aantallen, vermogens en materiaalintensiteit zijn gecombineerd. Deze is gebaseerd op databronnen voor offshore windturbines in Europa en onshore windturbines in Nederland, aangevuld met literatuur over materiaalsamenstelling van windturbines.

- **Analyse van Nederlandse offshore windparken**

Publiek beschikbare gegevens over Nederlandse offshore windparken binnen de Roadmap 21GW zijn verzameld en geanalyseerd om inzicht te krijgen in de timing, schaal en spreiding van toekomstige materiaalstromen.

- **Literatuur- en documentstudie**

Er zijn meer dan 30 bronnen bestudeerd, waaronder wetenschappelijke artikelen, handboeken en onderzoeksrapporten. Daarnaast zijn ook praktijkgerichte bronnen gebruikt, zoals decommissioningplannen en informatie van windturbinefabrikanten, om inzicht te krijgen in ontmantelingsmethoden en materiaaleigenschappen.

- **Input van stakeholders**

Om de analyse te verrijken met praktijkinzichten zijn marktconsultaties uitgevoerd met in totaal 15 stakeholders uit verschillende delen van de keten:

- Transport- en heavy logistics providers (1)
- Haven- en marshallingbedrijven (2)
- Componenthergebruikspecialisten (1)
- Metaalverwerkers (2)
- Composietverwerkers (3)
- Systeem- en governancepartijen (4)
- Kennisinstituten (2)



2. GRONDSTOFFEN- EN VOLUME ANALYSE

2. Grondstoffen- en volume analyse

Een gecoördineerde circulariteitshub voor offshore windturbines kan alleen worden ontwikkeld wanneer duidelijk is welke materiaalstromen uit ontmantelde windturbines in de praktijk te verwachten zijn. Op dit moment ontbreekt echter een samenhangend en kwantitatief overzicht van zowel de aard, omvang als de timing van alle materialen die vrijkomen bij de ontmanteling.

Dit hoofdstuk maakt daarom inzichtelijk uit welke grondstoffen windturbines bestaan en wat de materiaalintensiteit is per MW vermogen. Ook worden de volumes van windturbines die de komende decennia ontmanteld worden op papier gezet: zowel de aantallen als de vermogens. Op basis van deze gebundelde informatie wordt geanalyseerd wanneer welke hoeveelheden grondstoffen vrijkomen na ontmanteling.

De primaire scope ligt op Nederlandse offshore turbines. Deze resultaten worden samengevat in een tabel en grafiek die laat zien in welke periode hoeveel materiaal vrijkomt na ontmanteling van offshore windturbines.

In dit hoofdstuk worden ook data meegenomen van Nederlandse onshore windturbines en van offshore windturbines in het gehele Noordzeegebied (Nederland, België, Denemarken, Duitsland, Noorwegen en het Verenigd Koninkrijk). Deze volumes worden in hoofdstuk 4 (Kosten- en batenanalyse) gebruikt om de potentiële schaalvergroting van de circulariteitshub inzichtelijk te maken. Daarbij wordt uitgegaan van de aanname dat een groter verwerkingsvolume leidt tot een gunstigere businesscase. Naast offshore windturbines wordt daarom ook gekeken naar aanvullende volumes uit onshore windturbines en internationale offshore windparken die door de circulariteitshub verwerkt zouden kunnen worden.

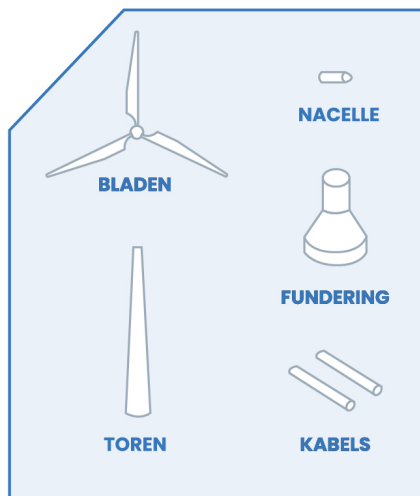
Het hoofdstuk is als volgt opgebouwd:

2.1 Grondstoffen analyse
2.2 Kritieke grondstoffen
2.3 Materiaalintensiteiten
2.2 Te ontmantelen windturbines
2.3 Totale grondstoffenvolumes
2.4 Conclusie

2.1 Grondstoffen analyse

Een windturbine kan onderverdeeld worden in vijf delen, elk met een eigen functie en materiaalgebruik: de bladen, de nacelle, de toren, de fundering en de kabels (zie afbeelding 1). Windturbinebladen zijn verbonden en direct vastgeschroefd aan de naaf, die de drie losse bladen verbindt met elkaar en de gondel. Door de roterende beweging ‘vangen’ de bladen windenergie. De bladen en de naaf zijn verbonden met de nacelle, waarin via een generator de kinetische energie wordt omgezet in elektriciteit. Het type fundering van een windturbine verschilt per locatie, maar voor offshore turbines in Nederland is gebruikgemaakt van monopiles.

Kabels worden gebruikt om stroom van de locatie van het windpark naar de netinfrastructuur te transporteren (Strootman et al., 2022). Tabel 1 geeft een overzicht van de materialen per component in een windturbine.



Afbeelding 1. Windturbine onderdelen

Component	Grondstoffen
Rotorbladen en verbindingen	Koolstofvezelcomposiet
	Glasvezelcomposiet
	Epoxy / hars (resin)
	Staal
	Chroomstaal
	Gietijzer
	Aluminium
Toren	Staal
	Beton
	Aluminium (voor kabels)
Fundering	Beton
	Staal
Nacelle	Aluminium
	Koper
	Staal
	IJzer
	Glasvezelcomposiet
Generator	Staal
	Gietijzer
	Kritieke grondstoffen in permanente magneten (niet voor alle turbines relevant)
Versnellingsbak (gearbox)	Staal
	Gietijzer

	Chroomstaal
	Koper
	Aluminium

Tabel 1. Materiaalstromen windturbines

2.2 Kritieke grondstoffen

Kritieke grondstoffen zijn materialen die op Europees en mondiaal niveau van bijzonder belang zijn vanwege hun strategische relevantie of schaarste. Ook in windturbines zijn een aantal materialen terug te vinden die door de Europese Unie (EU) aangemerkt zijn als *Critical Raw Material* (CRM). In dit deelhoofdstuk worden de verschillende hoofdstromen van kritieke grondstoffen in windturbines kort toegelicht, een uitgebreide analyse is toegevoegd in Bijlage B: *Verdieping kritieke grondstoffen*. Mogelijke verwerkingsroutes voor deze materialen worden in hoofdstuk 3 besproken.

Allereerst zijn verscheidene zeldzame aardmetalen (*Rare Earth Elements, REE*) terug te vinden in de permanente magneten die in verschillende typen turbines voor de opwekking van elektriciteit worden gebruikt. Zeldzame aardmetalen vormen een subgroep onder de CRM en worden in de legering voor permanente magneten in verschillende mate gebruikt. Deze krachtige magneten zijn zogenoemde NdFeB-magnetten, de volgende zeldzame aardmetalen komen erin voor: Neodymium (Nd), Praseodymium (Pr), Dysprosium (Dy), Terbium (Tb), en Boor (B).

Ten tweede komen kritieke grondstoffen voor als constructiestaal in verschillende legeringen. Over het algemeen worden CRM in deze toepassing toegevoegd om de sterkte van het staal te verbeteren zonder het gewicht te verhogen. Een voorbeeld hiervan is Niobium (Nb), dat in slechts zeer kleine hoeveelheden in de toren van windturbines voorkomt. Ook Mangaan (Mn), Chroom (Cr), of Titanium (Ti) kunnen worden aangetroffen in staal- en metaallegeringen in windturbines.

Tot slot wordt in de elektrische componenten en generatoren van windturbines koper en aluminium veelvuldig gebruikt. Deze CRM's zijn vaak in een relatief pure vorm verwerkt in componenten, in tegenstelling tot de bovengenoemde staal- en metaallegeringen.

De hoeveelheden van deze materialen is significant lager dan de hoeveelheden van diverse andere grondstoffen in windturbines. De materialen beschikken echter over een strategische en financiële waarde, ze zijn immers door de Europese Unie aangemerkt als *Critical Raw Material*. Onder andere in de *Critical Raw Materials Act* zijn doelstellingen vastgelegd met betrekking tot import en verwerking van deze materialen, deze doelstellingen zijn op nationaal niveau verwerkt in de Nationale Grondstoffenstrategie. Zoals eerder benoemd biedt Bijlage B: *Verdieping kritieke grondstoffen* verdere informatie op dit onderwerp.

2.3 Materiaalintensiteiten

Voor het bepalen van de hoeveelheden van de bovengenoemde grondstofstromen die vrijkomen na ontmanteling van de windturbine, wordt gewerkt met materiaalintensiteiten uitgedrukt in ton per megawatt (MW) opgesteld vermogen. Deze maat geeft aan hoeveel materiaal nodig is om één MW aan windvermogen te realiseren.

De materiaalintensiteit wordt uitgedrukt in massa ten opzichte van vermogen. Hierin wordt uitgegaan van een gemiddelde op basis van onderzoek van JRC (2024). In werkelijkheid kan de materiaalintensiteit per MW verschillen afhankelijk van het formaat van de turbine. Turbines met een hoger vermogen en grotere afmetingen hebben over het algemeen een hogere materiaalintensiteit dan kleinere varianten (Solibakke, et al., 2022).

De materiaalsamenstelling verschilt per type windturbine. Een belangrijk verschil zit het in het type generatorconfiguratie. Daarom wordt in dit onderzoek een onderscheid gemaakt per type turbine. Voor meer uitleg over verschillende type windturbines, lees bijlage A: *Onderbouwing grondstoffen- en volume analyse*.

Tabel 2 laat de materiaalintensiteit zien per type windturbine. Deze tabel is gebaseerd op data uit de volgende bronnen:

- *Material requirements for wind turbines* (JRC, 2024)
- *Offshore Wind Farm Decommissioning Cost Estimates* (TNO, 2026)

Verdere toelichting en onderbouwing van onderstaande kerngetallen is terug te vinden in Bijlage A: *Onderbouwing grondstoffen- en volume analyse*.

	Type C	Type D-EE	Type D-PM	Type E	Type F
Staal	200	200	200	200	200
Aluminium	1,4	0,375	0,55	1,4	1,6
Chroom	0,46	0,46	0,46	0,46	0,46
Koper	0,8	5,7	3,4	0,9	0,85
IJzer	19	19	19	19	19
Mangaan	0,8	0,8	0,8	0,8	0,8
Molybdeen	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1
Nikkel	0,43	0,43	0,43	0,43	0,43
Zink	5,45	5,45	5,45	5,45	5,45
Polymeren	4,7	4,7	4,7	4,7	4,7
CFRP/GFRP	7,5	7,5	7,5	7,5	7,5
Boor	0,0005	0	0,005	0,0013	0,0075
Dysprosium	0,002	0	0,017	0,004	0,00285
Neodymium	0,012	0	0,18	0,05	0,0205
Praseodymium	0	0	0,035	0,04	0
Terbium	0	0	0,007	0,001	0

Tabel 2. Materiaalintensiteit per type turbine in ton per MW

2.4 Te ontmantelen windturbines

Tabel 3 geeft de vermogens en aantallen weer van te ontmantelen windturbines in periodes van vijf jaar. Grafiek 1 laat deze aantallen nogmaals zien, alleen voor de offshore turbines in Nederland. Hieruit kan je afleiden dat de windturbine aantallen gefaseerd en in pieken vrijkomen na decommissioning. Aan de hand van de vermogens in tabel 3 worden in 2.4 de daadwerkelijke grondstoffen stromen berekend met de materiaalintensiteit in ton per MW zoals in tabel 2. Voor verdere uitleg over operationele aantallen windturbines, lees bijlage A:

Onderbouwing grondstoffen- en volume analyse.

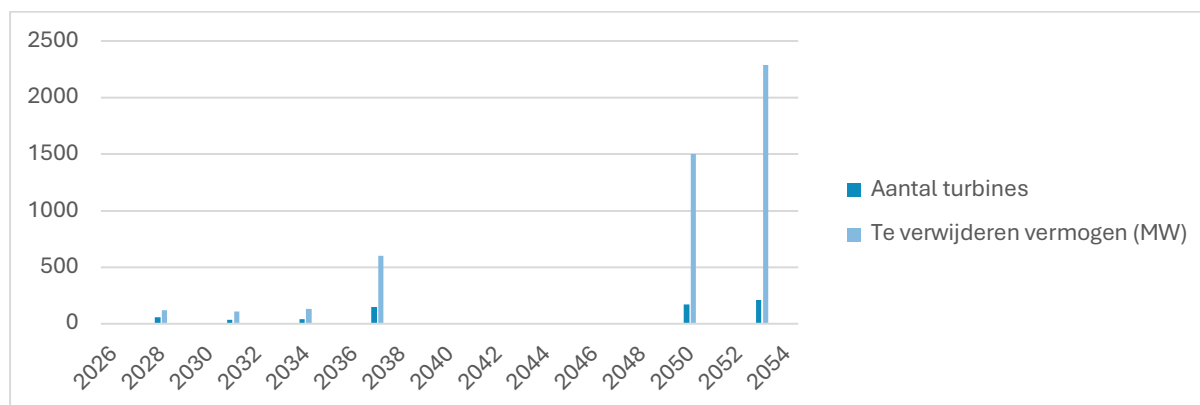
De data uit dit onderzoek is gebaseerd op de volgende bronnen:

- *Offshore Wind Energy Roadmap 21GW*
- *WindStats*
- *The WindPower dataset*

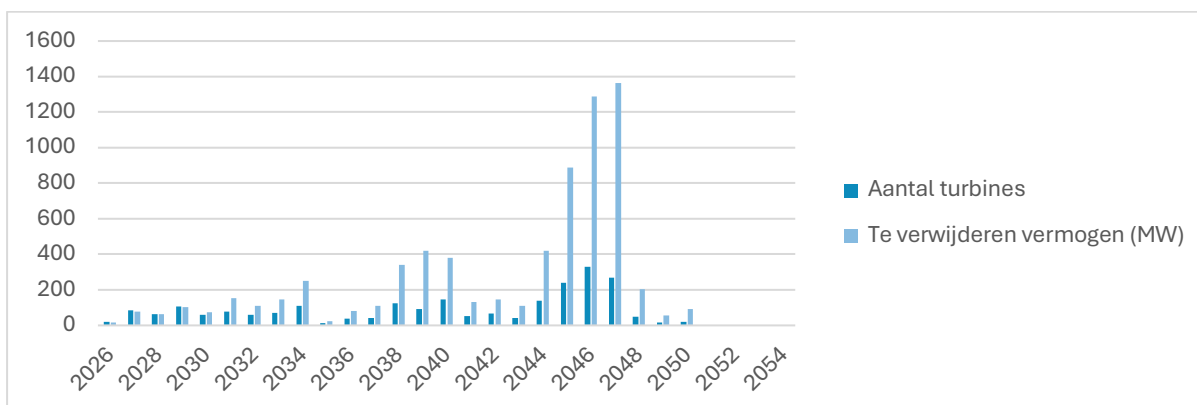
Er is gekozen voor een levensduur van 25 jaar voor onshore en 35 jaar voor offshore ontmanteling van windturbines omdat de vergunningsduur structureel verschilt. Voor onshore windturbines wordt in Nederland doorgaans uitgegaan van een vergunningstermijn van 25 jaar, conform Strootman et al. (2022). Voor offshore windturbines wordt uitgegaan van 35 jaar, omdat offshore vergunningen langer zijn en het turbineontwerp steeds meer wordt afgestemd op die vergunningsduur. Voor meer informatie over deze technische levensduur en vergunningsduur van windturbines, zie Bijlage A: *Onderbouwing grondstoffen- en volume analyse.*

Periode	Offshore NL (MW en aantallen)	Onshore NL (MW en aantallen)	Noordzegebied (MW en aantallen)	Totaal (MW en aantallen)
2025 – 2035	357 MW 139 turbines	1.021 MW 676 turbines	5 MW 10 turbines	1.406 MW 839 turbines
2035 – 2045	600 MW 150 turbines	2.159 MW 761 turbines	1.588 MW 585 turbines	4.348 MW 939 turbines
2045 – 2055	3.791 MW 381 turbines	3.891 MW 922 turbines	19.780 MW 4.007 turbines	28.268 MW 5.310 turbines
Totaal	4.748 MW 670 turbines	7.071 MW 2.359 turbines	21.373 MW 4.602 turbines	34.022 MW 7.088 turbines

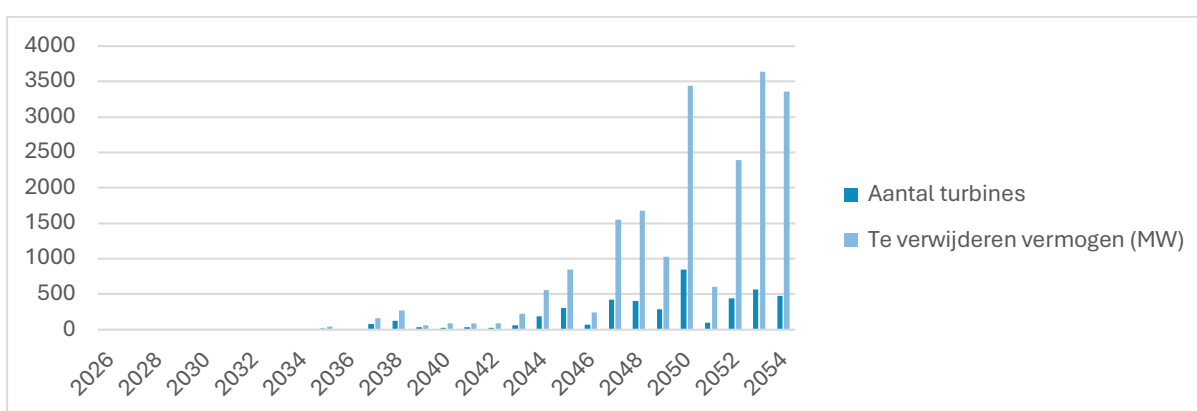
Tabel 3. Volume aantallen en vermogens van operationele windturbines



Grafiek 1. Overzicht decommissioning volumes per jaar offshore NL



Grafiek 2. Overzicht decommissioning volumes per jaar onshore NL



Grafiek 3. Overzicht decommissioning volumes per jaar offshore Noordzeegebied

2.5 Totale grondstoffenvolumes

In dit hoofdstuk zijn in 2.3 de materiaalintensiteiten van type windturbines onderscheiden per MW en in 2.4 de vermogen in MW van te ontmantelen windturbines gegeven. Deze informatie wordt samengebracht in onderstaande tabellen 4, 5 en 6, waarin totale grondstoffen volumes wordt weergegeven die vrijkomen uit windturbines de komende decennia.

Grafiek 4 t/m 7 biedt vervolgens een concreet overzicht van de toekomstige volumes per materiaalstroom voor zowel offshore turbines uit Nederland, als ook onshore turbines en offshore turbines uit de overige landen in het Noordzeegebied.

Deze tabellen en grafieken geven samen een robuuste kwantitatieve basis voor het verdere onderzoek naar circulaire verwerking, inclusief logistiek, waardebeoordeling van materialen en scenario's voor een circulariteitshub.

De laatste grafiek geeft een afspiegeling van de hoeveelheden van de belangrijkste kritieke grondstoffen, die als individuele materialen terug te winnen zijn uit windturbines. Zie voor meer toelichting hoofdstuk 3 en Bijlage B.

Materiaalstroom	2025-2035	2035-2045	2045-2055
Staal volledige verwijdering	71.400	120.000	758.100
Staal gedeeltelijke verwijdering	50.694	85.200	538.393
Aluminium	500	960	2.723
Koper	299	510	11.012
IJzer	6783	11.400	72.020
Composiet	2678	4.500	28.429

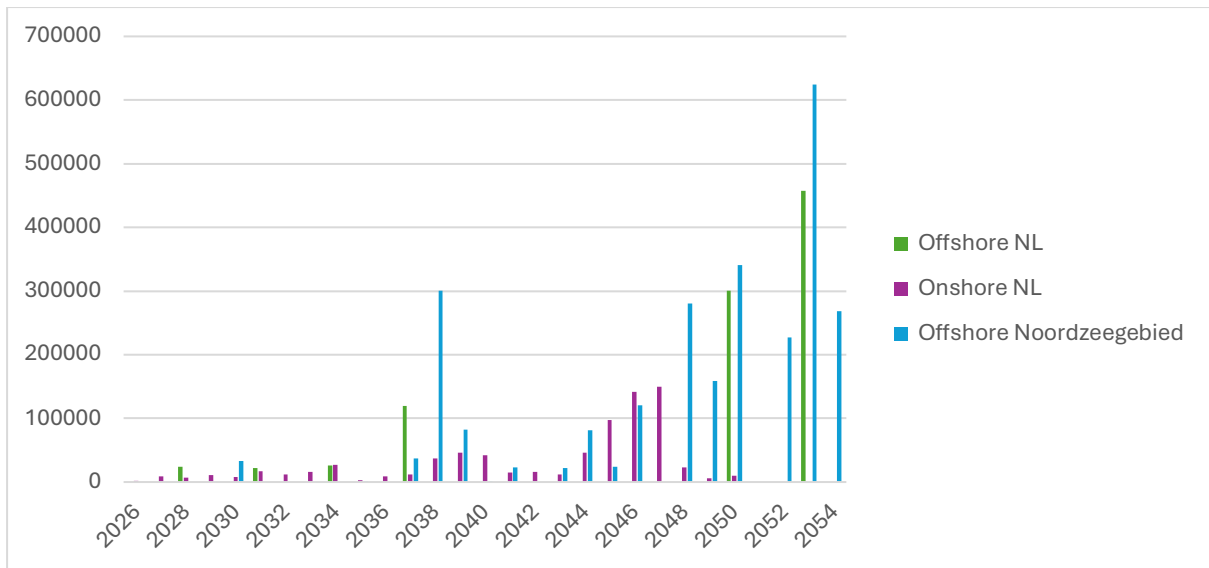
Tabel 4. Verwachte vrijkomende materiaalstromen in ton uit offshore turbines Nederland

Materiaalstroom	2025-2035	2035-2045	2045-2055
Beton	408.556	863.776	1.556.568
Staal	112.353	237.538	428.056
Aluminium	1.430	3.023	5.448
Koper	1.379	2.915	5.253
IJzer	19.406	41.029	73.937
Composiet	7.660	16.196	29.186

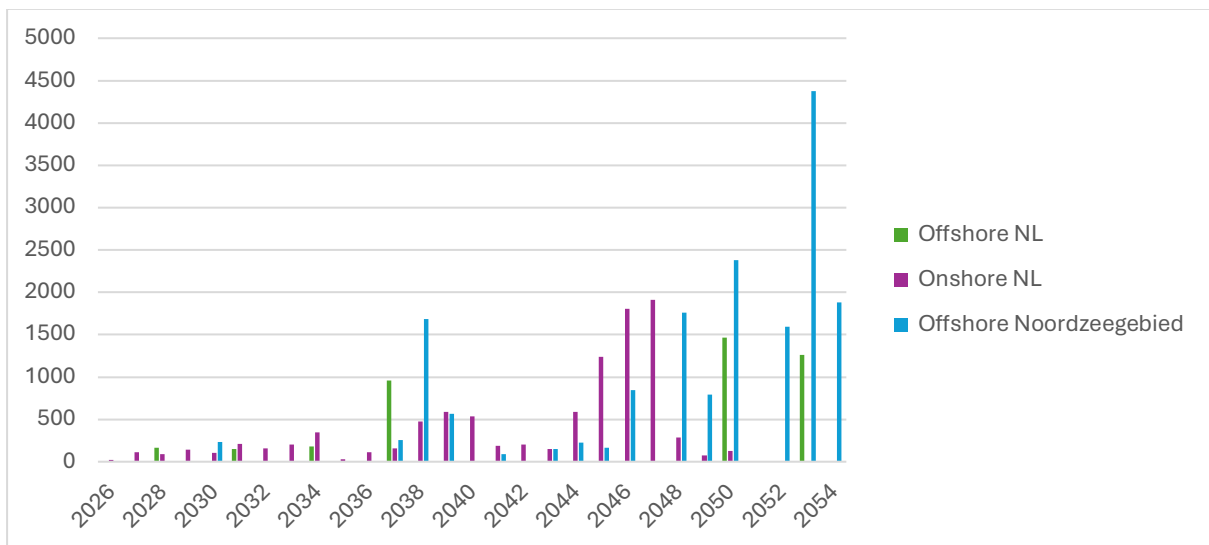
Tabel 5. Verwachte vrijkomende materiaalstromen in ton uit onshore turbines Nederland

Materiaalstroom	2025-2035	2035-2045	2045-2055
Staal volledige verwijdering	33.000	548.340	2.045.504
Staal gedeeltelijke verwijdering	23.430	389.321	1.452.307
Aluminium	231	2982	13.799
Koper	132	4.902	10.276
IJzer	3.135	52.092	194.323
Composiet	1.238	20.563	76.706

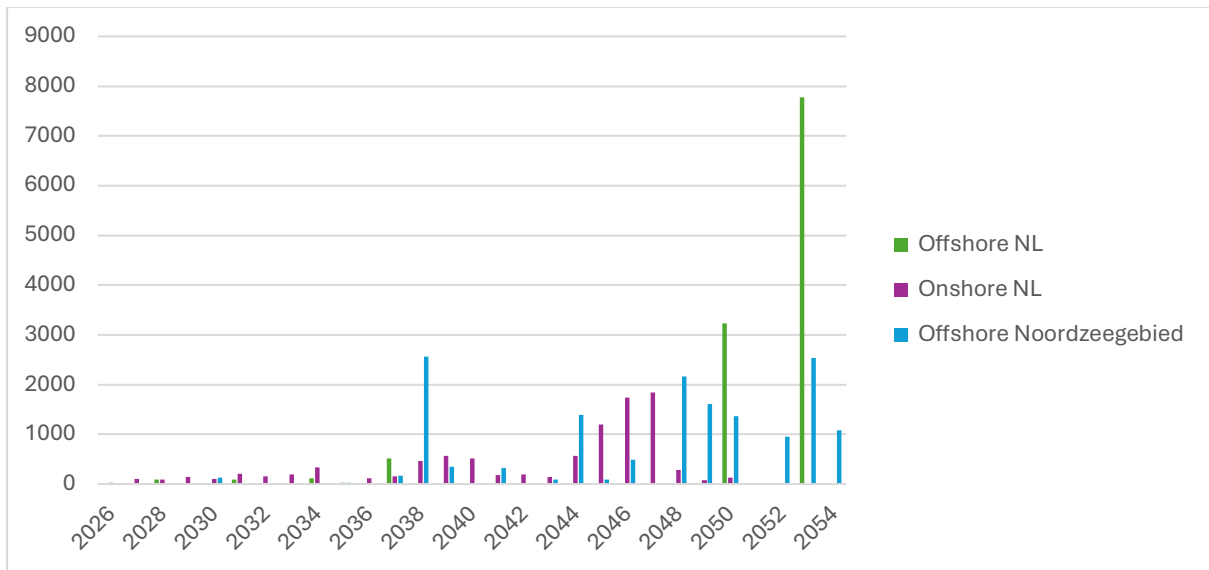
Tabel 6. Verwachte vrijkomende materiaalstromen in ton uit offshore turbines overige landen Noordzeegebied



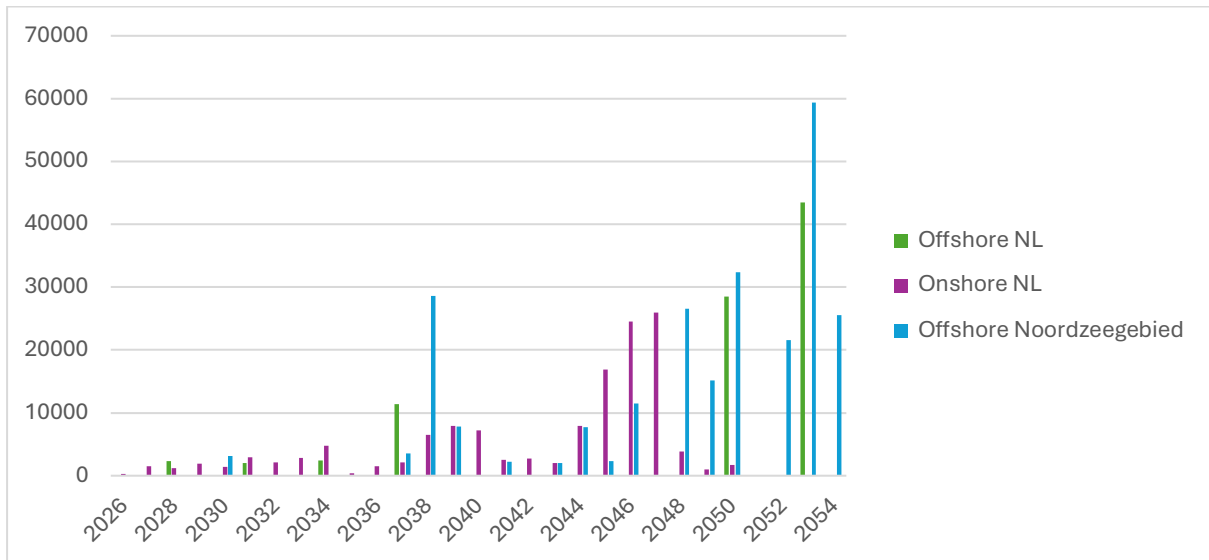
Grafiek 4: Verwachte hoeveelheden staal in ton



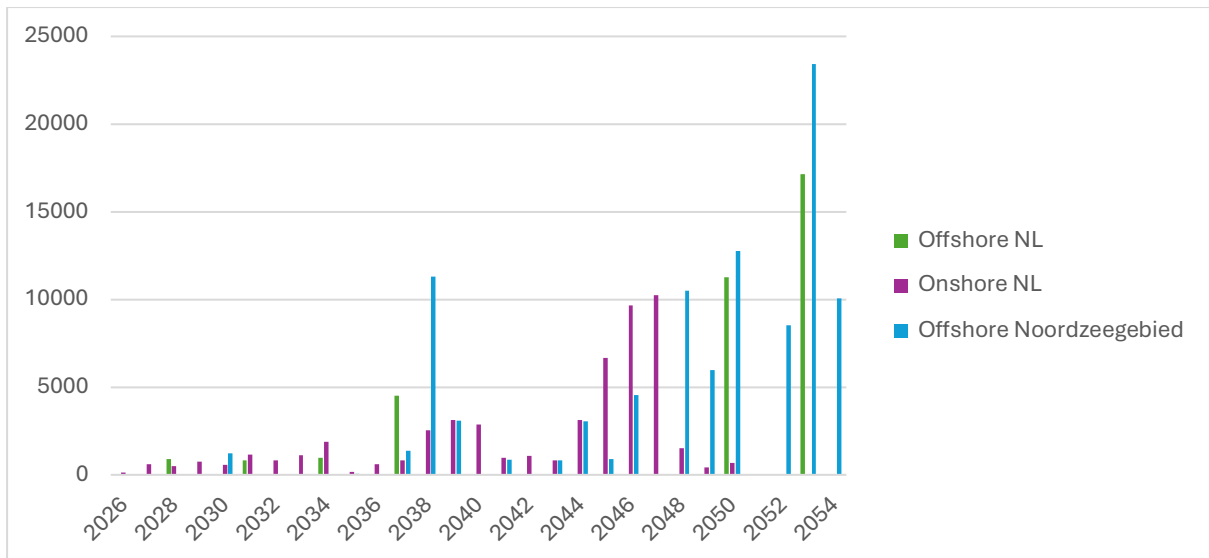
Grafiek 5: Verwachte hoeveelheden aluminium in ton



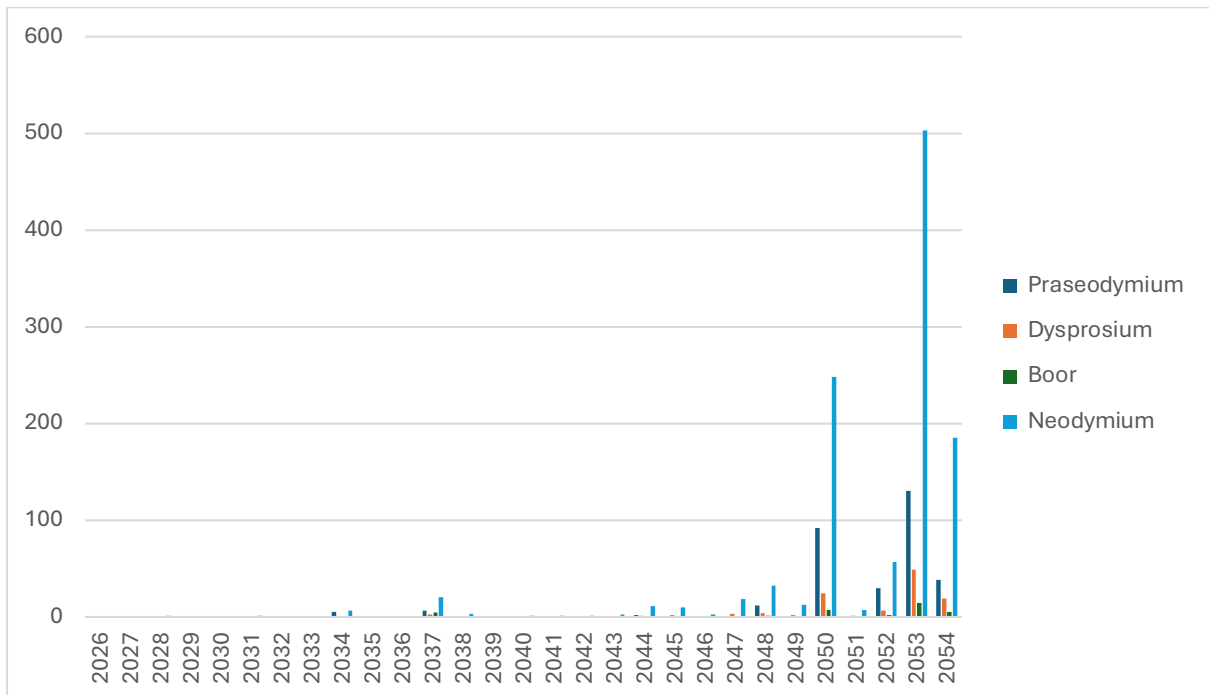
Grafiek 6: Verwachte hoeveelheden koper in ton



Grafiek 7: Verwachte hoeveelheden ijzer in ton



Grafiek 8: Verwachte hoeveelheden composiet in ton



Grafiek 9: Verwachte hoeveelheden kritieke grondstoffen (offshore Nederland en Noordzeegebied)

2.4 Conclusie

De analyse van de materiaalstromen laat zien dat vanaf 2045 een duidelijke schaalvergroting uit decommissioning verwacht kan worden. In de periode daarvoor blijven de volumes relatief beperkt, met name vanuit offshore windparken. Onshore materiaalstromen vertonen een stabiel en minder piekgedreven verloop dan offshore stromen, waar juist sprake is van fluctuaties. De Nederlandse offshore volumes laten een duidelijke dip zien tussen 2038 en 2050. Voor de circulariteitshub kan deze afname in toestroom worden opgevangen door (een deel van de) materiaalstromen uit onshore windturbines en offshore windparken in het bredere Noordzeegebied aan te trekken, waarmee capaciteit gelijkmatiger benut kan worden.

Verder blijkt dat kritieke grondstoffen uit offshore turbines voornamelijk pas in latere fases vrijkomen, wat betekent dat hoogwaardige verwerkingsketens hiervoor pas op langere termijn op schaal relevant worden. Hierbij geldt als kanttekening dat in de analyse van onshore turbines is uitgegaan van een generiek kengetal met een relatief lage aanwezigheid van kritieke grondstoffen terwijl dit in de praktijk per turbinetype kan variëren en mogelijk hoger ligt. Nader onderzoek naar de materiaalsamenstelling van specifieke turbines is daarom nodig om deze stromen nauwkeuriger in kaart te brengen.

A large red crane on an offshore oil rig is lifting a massive red cylindrical component over the ocean. The crane's lattice structure is prominent, and the component is suspended by cables. The background shows the blue sea and sky. A white decorative line is on the right side, and a white wavy line is at the bottom.

3. CIRCULAIRE VERWERKINGSROUTES

3. Circulaire verwerkingsroutes

In hoofdstuk 2 wordt inzicht gegeven in de verwachte volumes van materiaalstromen die de komende decennia vrijkomen uit te ontmantelen windturbines. Dit hoofdstuk bouwt hierop voort door te analyseren hoe turbines, componenten en materialen circulair kunnen worden verwerkt. De focus ligt daarbij op de circulaire verwerkingsstrategieën aan de hand van de R-ladder. Dit model kan worden gebruikt om circulaire strategieën te selecteren die helpen om de waarde van turbines, componenten en materialen zo hoog mogelijk te behouden binnen de keten.

Dit hoofdstuk is als volgt opgebouwd:

3.1 Uitleg R-strategieën
3.2 R-strategieën op componentniveau
3.2.1 Re-use van mechanische componenten
3.2.2 Re-use van permanente magneten
3.2.3 Repurpose van bladen
3.3 R-strategieën op materiaalniveau
3.3.1 Recycling van staal en ijzer
3.3.2 Recycling van composieten en polymeren
3.3.3 Recycling van koper
3.3.4 Recycling van aluminium
3.3.5 Recycling van zeldzame aardmetalen
3.4 Conclusies voor circulariteitshub

3.1 Uitleg R-strategieën

De circulaire verwerking van windturbines kan worden gestructureerd aan de hand van de zogeheten R-ladder, een model dat strategieën ordent op basis van de mate waarin waarde behouden blijft (zie afbeelding 2, TNO). Het toepassen van hogere R-strategieën, waarbij hele windturbines of componenten zo lang mogelijk in gebruik blijven, is vanuit circulair perspectief het meest wenselijk. Strategieën als repower, reuse, repair, refurbish en remanufacture behouden doorgaans meer functionele waarde dan directe recycling. Een werkende turbine of turbineonderdeel vertegenwoordigt aanzienlijk meer waarde dan dezelfde materialen als schroot. Daarnaast vermindert hergebruik de vraag naar nieuwe grondstoffen, wat leidt tot lagere energieconsumptie, minder CO₂-uitstoot en een kleinere afhankelijkheid van primaire en kritieke materialen. Circulaire verwerking kan dus bijdragen aan een veerkrachtigere sector doordat de afhankelijkheid van internationale toeleveringsketens en volatiele grondstoffenmarkten afneemt.

R-Strategies	
Narrowing the loop:	R0 - Refuse
	R1 - Rethink
	R2 - Reduce
Slowing the loop:	R3 - Reuse
	R4 - Repair
	R5 - Remanufacture
	R6 - Refurbish
	R7 - Repurpose
Closing the loop:	R8 - Recycle
	R9 - Recover
	R10 - Remine

Afbeelding 2. R-strategieën. Bron: TNO (2024)

Vervolgens kan binnen de R-ladder onderscheid worden gemaakt naar het niveau waarop circulaire strategieën worden toegepast: product-, component- of materiaalniveau. Hoe hoger dit niveau, hoe meer functionele waarde behouden blijft. Op productniveau ligt de focus op het verlengen of opnieuw inzetten van complete windturbines, bijvoorbeeld via levensduurverlenging, repowering of re-use. Wanneer dit niet mogelijk is, verschuift de strategie naar componentniveau, waar onderdelen worden hergebruikt, gerepareerd, gereviseerd of herbestemd (repurpose). Pas wanneer ook dit niet haalbaar blijkt, komt materiaalniveau in beeld, waarbij grondstoffen via recycling worden teruggewonnen.

In dit hoofdstuk worden alleen de relevante R-strategieën voor de end-of-life fase van offshore windturbines uitgewerkt. Strategieën van vóór deze fase, zoals levensduurverlenging en repowering, blijven buiten beschouwing omdat de inzet hiervan afhankelijk is van keuzes in een eerdere periode. Daarnaast wordt het hergebruik (re-use) van complete turbines niet behandeld; hoewel dit in de onshore markt voorkomt, wordt deze strategie voor offshore turbines vanwege technische, logistieke en economische beperkingen niet als realistisch gezien. De focus ligt daarom nadrukkelijk op offshore toepassingen en op strategieën vanaf re-use van componenten tot en met materiaalrecycling. Per strategie wordt beschreven wat deze inhoudt, welke activiteiten en ketenstappen hiervoor nodig zijn, en hoe de huidige markt zich ontwikkelt.

3.2 R-strategieën op componentniveau

3.2.1 Re-use, repair, remanufacture en refurbish van mechanische componenten

Wanneer windturbines worden ontmanteld kan eerst worden onderzocht of er op componentniveau waarde kan worden herwonnen. Re-use, repair, refurbish en remanufacture vormen hierbij geen strikt gescheiden routes, maar een geïntegreerde aftermarket-keten waarin onderdelen worden geogst, technisch beoordeeld, hersteld en opnieuw ingezet.

Deze strategieën behouden een groot deel van de functionele waarde van complexe turbineonderdelen en staan daarmee aanzienlijk hoger op de R-ladder dan materiaalrecycling.

Direct hergebruik (re-use) is mogelijk wanneer componenten in goede technische staat verkeren en compatibel zijn met bestaande turbines. Dit geldt vooral voor kostbare en technisch complexe onderdelen zoals gearboxes, generatoren, hoofdlagers, hubs, transformatoren en besturingskasten. In veel gevallen is echter eerst technische bewerking nodig. Bij repair worden defecte delen vervangen of hersteld; refurbishment omvat volledige demontage, inspectie, vervanging van slijtageonderdelen en uitgebreide testing; remanufacture gaat nog verder en brengt een component terug naar (nagenoeg) oorspronkelijke specificaties, soms met technische verbeteringen.

Deze strategieën zijn economisch aantrekkelijk omdat zij de hoge materiaalkosten en energie-intensieve productie van nieuwe componenten vermijden. Tegelijkertijd zijn niet alle onderdelen geschikt voor hergebruik of revisie. Componenten met vermoeiingsschade, structurele scheurvorming of verouderde elektronica kunnen technisch of economisch ongeschikt blijken. Bij offshore turbines spelen daarnaast strengere betrouwbaarheidseisen en garantieverplichtingen een belangrijke rol. Een internationale markt voor revisie van specifieke offshore-onderdelen, zoals generatoren en transformatoren, is niet uitgesloten maar bevindt zich nog in de beginfase. Voor offshore windturbines is de verwachting dat repurposing en lagere R-strategieën zoals recycling van componenten de meest schaalbare circulaire verwerkingsroutes vormen.

3.2.2 Re-use van permanente magneten

Het onderdeel met de hoogste kritieke grondstoffen-concentratie is de permanente magneet in de generator. Niet alle windturbines bevatten permanente magneten; turbines met een tandwielkast gebruiken vaak een conventionele generator zonder magneten. De trend in de industrie gaat echter duidelijk richting direct-drive en hybride generatoren, die wel permanente magneten bevatten. Offshore turbines maken hier vaker gebruik van dan onshore turbines, vanwege de wens naar hogere betrouwbaarheid en lagere onderhoudsbehoefte voor toepassing op zee.

De magneten in windturbinegeneratoren zijn vrijwel zonder uitzondering neodymium-ijzer-boor (NdFeB) magneten. De terugwinning van (materialen uit) deze permanente magneten begint bij specialistische demontage van de generator: magneten zijn sterk, vaak ingegoten of gecoat, en vereisen zorgvuldige demontage om de materiaalkwaliteit te borgen.

De demontage van permanente magneten uit de generator omvat verwijdering van magneetmodules, demagnetisatie van de magneten, scheiding van staal- en kopercomponenten en sortering op magneetsoort. In deze voorbereiding liggen enkele uitdagingen (Li, et al., 2019). Ten eerste kan er sprake zijn van coatings, lijm, of andere contaminatie van de magneten door de manier waarop ze in turbines verwerkt zitten. Ten tweede is demagnetisatie ingewikkeld; dit gebeurt vaak via een thermisch proces waarbij temperaturen tot ongeveer 350 graden Celsius benodigd kunnen zijn.

Ten derde zijn NdFeB magneten over het algemeen kwetsbaar en broos; het verwijderen van magneten uit turbines kan leiden tot schade aan de magneet.

Ondanks deze uitdagingen is het technisch gezien mogelijk om permanente magneten uit windturbines te verwijderen en te hergebruiken. In de praktijk gebeurt dit nog vrijwel niet, al is de verwachting dat de afzetmarkt voor permanente magneten de komende decennia sterk gaat groeien, onder aanvoering van Duitsland (WindEurope, 2025).

3.2.3 Repurpose van componenten

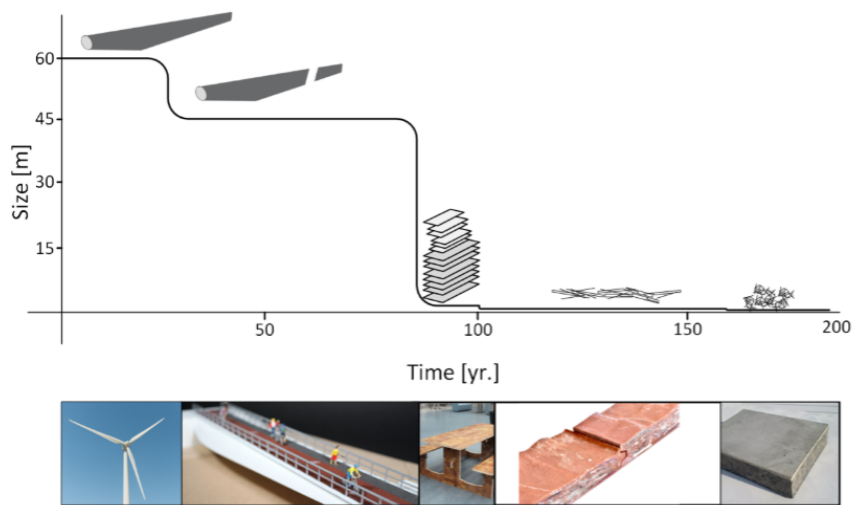
Wanneer hergebruik binnen de oorspronkelijke functie niet mogelijk is, kunnen windturbinecomponenten worden ingezet in een alternatieve toepassing. Deze strategie, repurpose, behoudt een deel van de structurele en materiële waarde van de component, maar niet langer de oorspronkelijke energieopwekkende functie. Vanuit circulair perspectief is repurpose aantrekkelijk omdat het energie-intensieve recycling van materialen vermijdt en de structurele waarde van het component behoudt.

In de praktijk richt repurpose zich vooral op rotorbladen, die door hun lengte, sterkte en slanke vorm geschikt zijn als dragende of overspannende constructie in civiele en architectonische toepassingen. Voorbeelden zijn voetgangers- en fietsbruggen, geluidswallen, overkappingen, straatmeubilair, speelobjecten en tijdelijke paviljoens. Daarnaast kunnen bladen verder worden verzaagd tot kleinere, modulaire onderdelen zoals balken, planken of platen. Dit vraagt om extra bewerking en verkleining, maar vergroot de flexibiliteit in de toepasbaarheid van het materiaal. Dergelijke gestandaardiseerde elementen zijn breder inzetbaar in uiteenlopende bouwtoepassingen, wat de schaalbaarheid van repurpose vergroot ten opzichte van unieke, projectspecifieke ontwerpen.

De cascading-benadering, zoals weergegeven in de afbeelding hieronder, laat zien hoe een rotorblad stapsgewijs wordt ingezet in toepassingen met afnemende functionele eisen. Eerst blijft het blad grotendeels intact en wordt het gebruikt in grootschalige constructies, waarna het in latere fasen wordt verkleind tot modulaire elementen zoals balken en platen. Elke stap betekent een afname in structurele waarde, maar vergroot vaak de toepasbaarheid. Zo kan er meerdere malen waarde uit het materiaal worden gehaald voordat het uiteindelijk toe is aan recycling.

Ook andere componenten, zoals torensegmenten en nacelle-behuizingen, kunnen worden ingezet in infrastructurele of bouwkundige constructies. De toepasbaarheid is echter sterk projectafhankelijk en vereist maatwerk ontwerp, constructieve berekeningen en vaak aanvullende certificering.

Voor onshore rotorbladen en componenten zijn repurpose oplossingen in volle ontwikkeling. Offshore bladen zijn echter groter, zwaarder en moeilijker te transporteren, wat de logistieke drempel aanzienlijk verhoogt. Daarnaast zijn veel repurpose-toepassingen gericht op stedelijke of regionale infrastructuur, terwijl offshore bladen vaak verder van de uiteindelijke toepassingslocatie worden ontmanteld. Hierdoor is repurpose offshore technisch mogelijk, maar economisch en logistiek nog niet aantrekkelijk op schaal.



Afbeelding 3: Cascading Diagram Repurposing van windturbine bladen (Joustra 2026)

3.3 Recyclen van materialen

Wanneer repurpose op componentniveau niet (meer) haalbaar is, verschuift de end-of-life fase naar materiaalniveau. Het doel is dan om grondstoffen zo hoogwaardig mogelijk terug te winnen en opnieuw in te zetten in industriële ketens. In deze benadering worden turbines en infrastructuur beschouwd als “materiaaldragers” waaruit stromen zoals staal, koper, aluminium, beton, composieten en kritieke grondstoffen vrijkomen.

Verwerking op materiaalniveau vraagt om andere typen activiteiten en organisaties dan componenthergebruik. De nadruk ligt op (1) het scheiden en opschonen van materiaalstromen, (2) het realiseren van voldoende schaal en continuïteit, en (3) het organiseren van afzetmarkten voor secundaire grondstoffen. Daarbij is de kwaliteit van de input sterk bepalend: vervuiling, coatings, mixen van materiaaltypen en zoutbelasting (bij offshore) kunnen de verwerkingsroute en kwaliteit beïnvloeden.

In de volgende subparagrafen worden per materiaalstroom het recyclingsproces beschreven, inclusief de ketenstappen en de huidige markt.

3.3.1 Recycling van staal en ijzer (torens, funderingen, substructures, secundair staal)

Staal biedt verreweg de grootste materiaalstroom uit ontmantelde windturbines. De dominante route voor staal uit windturbines is recycling via bestaande ferro-metaalketens.

Constructiestaal wordt na ontmanteling gesegmenteerd, gesorteerd, verkleind en afgevoerd als schroot naar staalproducenten. Daar wordt het omgesmolten in elektrische vlamboogovens (EAF) of, ingezet als schroottoevoeging in primaire hoogovenprocessen.

Ketenstappen

1. Demontage en segmentatie (op locatie of in de haven)
2. Transport naar schrootverwerker
3. Sortering en kwaliteitscontrole (ferro/non-ferro, legeringen)
4. Levering aan staalproducent
5. Omsmelting tot nieuw staal

Huidige markt

In Nederland is deze keten aanwezig. Metaalrecyclingbedrijven verzamelen en verwerken schroot, waarna staalproducenten nationaal (Tata Steel Nederland) of internationaal, het secundaire materiaal inzetten in hun productieprocessen.

In vergelijking met andere materiaalstromen is recycling van staal de meest robuuste en schaalbare circulaire route binnen de windsector. De uitdaging ligt minder in technologie en meer in logistieke organisatie, volumebundeling en het realiseren van hoogwaardige, eventueel gesloten, ketens.

3.3.2 Recycling van composiet (rotorbladen, nacelle covers)

Composieten vormen een complexe materiaalstroom binnen de end-of-life fase van windturbines. In tegenstelling tot metalen is er nog geen dominante, volledig volwassen recyclingroute voor composiet. Rotorbladen bestaan voornamelijk uit glasvezelversterkte kunststoffen (GFRP) en in toenemende mate uit koolstofvezelversterkte materialen (CFRP), gecombineerd met harsen, schuimkernen en coatings. Deze thermohardende materialen kunnen niet eenvoudig worden omgesmolten of gescheiden, waardoor hoogwaardige recycling technisch en economisch uitdagend is.

Vanwege de enorme afmetingen moeten bladen eerst worden gesegmenteerd of versnipperd voordat recycling mogelijk is. Deze stap is cruciaal om de logistiek beheersbaar te houden; het maakt zowel de opslag als het vervoer naar verwerkingslocaties fysiek mogelijk en houdt de hiermee gepaard gaande kosten betaalbaar.

Mechanische recycling

Bladen worden gezaagd, geknipt of versnipperd tot granulaat of vezelhoudende fracties. Dit materiaal kan worden ingezet als vulstof in nieuwe composietmaterialen met toepassingen voor bouw en infrastructuur, zoals planken, balken en plaatmateriaal. Door virgin grondstoffen te vervangen wordt ook energie en daarmee CO₂ bespaard. De oorspronkelijke structurele vezelkwaliteit (licht en buigzaam) gaat grotendeels verloren en daarvoor komt een robuuster materiaal in de plaats. Deze route is technisch relatief eenvoudig en schaalbaar.

Co-processing in cementindustrie

Bij co-processing wordt het versnipperde composietmateriaal als brandstof en vervangende grondstof ingezet in cementovens. Het voordeel hiervan is dat de minerale fractie grondstoffen vervangt en de organische fractie energetisch wordt benut. Deze route is robuust, direct toepasbaar en momenteel de meest grootschalig bewezen oplossing in Europa.

De circulaire meerwaarde is echter beperkt, omdat vezels en polymeren niet als zodanig worden teruggewonnen. Het betreft eerder materiaal- en energierugwinning dan gesloten kringlooprecycling.

Thermische recycling

Door middel van processen zoals pyrolyse, waarbij het composiet onder hoge temperaturen zonder zuurstof wordt verhit, kunnen glasvezels, koolstofvezels en andere grondstoffen worden teruggewonnen. Met name voor koolstofvezel biedt dit potentieel voor hogere restwaarde. Hoewel verkleining van de bladen noodzakelijk is voor het proces, zou volledige versnippering nadelig zijn; dit doet het voordeel van de terugwinning van hoogwaardige, gehele vezels namelijk grotendeels teniet.

In Nederland en Europa lopen pilots en onderzoeksprogramma's om deze technologie verder te ontwikkelen en op te schalen. Opschaling is afhankelijk van voldoende feedstock en gegarandeerde afzet. Voor een rendabele pyrolyse-installatie is een hoge jaarlijkse input nodig. Windturbinebladen alleen leveren die volumes niet; bundeling met composietreststromen uit andere sectoren (scheepsbouw, luchtvaart, automotive en industriële productie) is zeer wenselijk.

Een uitdaging van pyrolyse is de hoge energievraag. De benodigde verhitting leidt tot een aanzienlijke CO₂-uitstoot, wat de duurzaamheidswinst beperkt. Bovendien bemoeilijkt de huidige netcongestie de realisatie van deze installaties, omdat de benodigde zware stroomaansluitingen vaak niet beschikbaar zijn.

Ketenstappen

1. Demontage en veilige segmentatie
2. Transport naar gespecialiseerde verwerker
3. Mechanische, thermische of cementroute
4. Afzet van recyclaat naar industrie

Markt in Nederland

Naast windenergie genereren ook de luchtvaart, botenbouw en composietproductie vergelijkbare reststromen. Hoewel deze bredere marktkansen biedt voor schaalvergroting en gezamenlijke infrastructuur, staat de sector voor een grote uitdaging. Momenteel is de markt voor composietrecycling in Nederland en Europa nog kleinschalig en gefragmenteerd. Er is bovendien een duidelijke mismatch tussen de huidige verwerkingscapaciteit en de enorme composietstromen uit windturbines die in de nabije toekomst worden verwacht.

3.3.3 Recycling van koper (kabels, generatoren, transformatoren)

Koper is een relatief kleine maar economisch zeer waardevolle materiaalstroom binnen windturbines. Het wordt toegepast in generatorwikkelingen, transformatoren, vermogenslektronica en in zowel interne als externe kabelinfrastructuur (inter-array en exportkabels offshore, netaansluitingen onshore). Door de hoge geleidbaarheid en de blijvende vraag naar koper in de energietransitie is deze stroom strategisch relevant.

In lijn hiermee wordt koper door de Europese Unie aangemerkt als een kritieke grondstof, vanwege het grote economische belang voor sectoren zoals energie, mobiliteit en digitale technologie, en de kwetsbaarheden in de internationale toeleveringsketens. Dit onderstreept het belang van hoogwaardige recycling en het behoud van koper binnen Europese waardeketens.

Recyclingsproces

De dominante route voor koper uit windturbines is hoogwaardige recycling. Koper kan zonder kwaliteitsverlies worden omgesmolten en opnieuw worden ingezet in elektrische toepassingen. Hergebruik op componentniveau (bijvoorbeeld herinzet van complete kabels of wikkelingen) is zeldzaam; meestal wordt koper teruggewonnen als secundaire grondstof.

Bij kabels vindt recycling plaats door mechanische scheiding van koper en isolatiematerialen (PVC, PE of XLPE). Bij generatoren en transformatoren worden wikkelingen gedemonteerd of na shredding gescheiden via magnetische en dichtheits-gebaseerde technieken. Het doel is een zo zuiver mogelijke koperfractie te verkrijgen die geschikt is voor raffinage en herverwerking.

Ketenstappen

1. Demontage van kabels, generatoren en transformatoren
2. Mechanische scheiding (strippen, shredden, granuleren)
3. Sortering en kwaliteitscontrole (kopergehalte, vervuiling)
4. Levering aan raffinaderijen of koperproducenten
5. Omsmelting tot secundair koper

Huidige markt

Nederland beschikt over een goed ontwikkelde non-ferro recyclingsector die koperstromen inzamelt, sorteert en opwerkt tot secundaire grondstoffen, die vervolgens worden afgezet bij smelters en raffinaderijen in Nederland, Europa en daarbuiten.

In vergelijking met composieten en beton is koperrecycling technisch en economisch zeer robuust. De belangrijkste uitdaging ligt in het efficiënt organiseren van demontage, volumebundeling en logistiek, met name bij offshore kabelcampagnes.

3.3.4 Recycling van aluminium (kabels, vermogenselektronica, componentbehuizingen)

Aluminium komt in windturbines voor in kabels (geleiders of mantels), vermogenselektronica, behuizingen en diverse lichtere constructieve onderdelen. In volumetermen is het kleiner dan staal en koper, maar het blijft relevant vanwege de hoge energie-intensiteit van primaire aluminiumproductie. Recycling levert daarom aanzienlijke CO₂-besparing op.

Recyclingproces

De dominante route is omsmelting tot secundair aluminium. Aluminium kan vrijwel onbeperkt worden gerecycled zonder significant kwaliteitsverlies, mits de legering zuiver blijft. Hergebruik op componentniveau (bijvoorbeeld complete behuizingen) komt weinig voor; meestal wordt aluminium als metaalfractie teruggewonnen.

Bij kabels wordt aluminium mechanisch gescheiden van isolatiemateriaal via shredding en granulatie. Behuizingen en andere onderdelen worden gedemonteerd en gesorteerd voordat ze naar een smelter gaan.

Ketenstappen

- Demontage en materiaal-scheiding
- Mechanische voorbewerking (shredding, granulatie)
- Sortering op legering
- Levering aan aluminiumsmelter
- Omsmelting tot secundair aluminium

Huidige markt

De Nederlandse non-ferro recyclingsector beschikt over installaties voor kabelverwerking en metaal-scheiding, waarna het materiaal doorgaans naar Europese smelters wordt afgezet. Aluminiumrecycling is technisch volwassen en goed schaalbaar, maar speelt strategisch een minder bepalende rol in de waardeketen dan staal of koper.

3.3.5 Recycling van zeldzame aardmetalen

In voorgaande alinea's worden al een aantal kritieke grondstoffen behandeld, zoals koper en aluminium. Ook wordt hergebruik van permanente magneten besproken. Het is echter ook mogelijk om zeldzame aardmetalen uit deze permanente magneten te verwijderen door middel van een aantal recyclingtechnologieën.

Recyclingproces

De twee belangrijkste routes zijn magnet-to-magnet recycling en hydrometallurgische scheiding. Bij magnet-to-magnet recycling worden NdFeB-magneten via een chemisch proces direct omgezet naar nieuw magneetmateriaal. Dit is de meest hoogwaardige verwerkingsroute omdat functionele eigenschappen grotendeels behouden blijven. Bij hydrometallurgische scheiding worden magneten opgelost en gescheiden tot individuele zeldzame aardoxiden, wat technisch complexer is maar meer flexibiliteit biedt in zuiverheid en samenstelling.

Aan ieder van deze methoden hangen verschillende voor- en nadelen, die in Bijlage C: *Verdieping kritieke grondstoffen* meer detail besproken worden.

Ketenstappen

- Demagnetisatie, demontage, en scheiding
- Verwijderen van coating of overige contaminatie
- Transporteren naar verwerkers
- Verwerking afhankelijk van gekozen methode

Huidige markt

De afzetmarkt voor deze grondstoffen in Europa is nog niet ver genoeg ontwikkeld is om grootschalige productie ervan te rechtvaardigen (Van der Velden & Poll, 2026). De verwachting is echter dat deze afzetmarkt de komende decennia sterk zal groeien, mede als gevolg van de *Critical Raw Materials Act* (WindEurope, 2025). Hoewel verwerking op grote schaal zich nog in een vroeg stadium van ontwikkeling bevindt zijn de technologieën ver genoeg ontwikkeld voor commerciële toepassing. Het recyclen van zeldzame aardmetalen is echter nog een onvolwassen markt met belangrijke onzekerheden (Taglieri, 2025).

3.4 Conclusies voor circulariteitshub

Dit hoofdstuk laat zien dat de haalbaarheid van circulaire verwerkingsroutes voor offshore windturbines sterk verschilt per component- en materiaalstroom en dat hoge R-strategieën in de praktijk slechts beperkt toepasbaar zijn. Hoewel strategieën als re-use, repair, refurbish en remanufacture vanuit circulair perspectief de voorkeur hebben, bestaat er op dit moment nog geen volwassen markt voor de herinzet van offshore turbinecomponenten. De verwachting is daarom dat, zeker op korte en middellange termijn, repurpose van componenten en recycling op materiaalniveau de meest realistische en schaalbare routes vormen voor offshore wind.

Voor staal, koper en aluminium geldt dat recycling de meest robuuste en economisch aantrekkelijke verwerkingsroute is. De markt is bestaande, technologisch volwassen en biedt de hoogste opbrengst in verhouding tot volume en inspanning. Hierdoor vormt staalrecycling een logische kernactiviteit binnen een circulariteitshub, waarbij de uitdaging vooral ligt in logistieke organisatie en volumebundeling, niet in marktontwikkeling.

Voor rotorbladen en andere composieten bevinden zowel repurpose als recycling zich nog in een ontwikkelfase. Repurpose biedt potentieel om structurele waarde langer te behouden, maar is voor offshore bladen op dit moment beperkt schaalbaar door logistieke complexiteit en projectmatige afzet. Recyclingroutes voor composieten – mechanisch, thermisch of via de cementindustrie – zijn deels beschikbaar en deels in ontwikkelfase en vraagt om een georganiseerde afzetmarkt.

Voor permanente magneten geldt dat re use technisch mogelijk is, maar momenteel nog geen bestaande afzetmarkt kent voor offshore toepassingen. Tegelijkertijd is recycling van zeldzame aardmetalen uit magneten nog niet verankerd in Nederland of Europa. Hoewel technologieën zoals magnet to magnet recycling en hydrometallurgische scheiding in ontwikkeling zijn, ontbreekt het vooralsnog aan schaal, verwerkingscapaciteit en zekere vraag. Daarnaast komen relevante volumes uit Nederlandse offshore windturbines naar verwachting pas na 2045 in grotere hoeveelheden beschikbaar, wat verdere opschaling op korte termijn bemoeilijkt. Hierdoor blijft deze stroom voorlopig een strategische uitdaging zonder directe grootschalige circulaire oplossing.

The image features a blue-tinted photograph of an offshore wind farm. Two large wind turbines are visible in the middle ground, standing on concrete foundations in the sea. The sky is a clear, deep blue. On the right side of the image, there is a white line-art outline of a wind turbine, which is partially cut off by the edge of the frame. The text '4. KOSTEN EN BATENANALYSE' is centered in the lower half of the image in a bold, white, sans-serif font.

4. KOSTEN EN BATENANALYSE

4. Kosten en batenanalyse

In de voorgaande hoofdstukken is uiteengezet uit welke componenten en materialen windturbines bestaan, in welke hoeveelheden deze momenteel aanwezig zijn in Nederland en het bredere Noordzeegebied, en welke circulaire verwerkingsroutes technisch mogelijk zijn. Dit hoofdstuk benadert dit vanuit een economisch perspectief. Het doel is inzicht te geven in (1) de kosten van ontmanteling van offshore windparken, (2) de minimale economische waarde van vrijkomende materialen in de vorm van schrootwaarden, en (3) de implicaties hiervan voor de businesscase van een circulariteitshub.

Aan de opbrengstenkant van circulaire verwerking wordt uitsluitend uitgegaan van schrootprijzen die passen bij recycling, omdat dit voor de dominante materiaalstromen momenteel de meest waarschijnlijke verwerkingsroute is (zie hoofdstuk 3). Hogere circulaire strategieën (zoals hergebruik of repurpose) kunnen in de toekomst tot hogere opbrengsten leiden, maar deze kwantificeren valt buiten de scope van dit onderzoek.

Het hoofdstuk is als volgt opgebouwd:

4.1 Kosten ontmanteling
4.2 Schrootwaarde van de materialen
4.2.1 Staal
4.2.2 Aluminium
4.2.3 Koper
4.2.4 IJzer
4.2.5 Composiet
4.3 Business case circulariteitshub
4.4 Conclusie

4.1 Kosten ontmanteling

Zoals eerder beschreven verschillen de technische en logistieke vereisten voor ontmanteling van onshore en offshore windparken aanzienlijk. Offshore ontmanteling vereist gespecialiseerde schepen, maritieme expertise en gunstige weersomstandigheden. Daarnaast is wereldwijd nog relatief weinig praktijkervaring met het grootschalig ontmantelen van offshore windparken. Bij onshore windparken is daarentegen al geruime tijd ervaring opgedaan met ontmantelingsprojecten, daar opgedane kennis is tot op zekere hoogte overdraagbaar naar offshore scenario's. De kosten voor offshore ontmanteling wijken echter wel af van de onshore tegenhanger; in dit hoofdstuk wordt een overzicht gegeven van de relevante kosten.

Hoewel offshore ontmanteling in de praktijk nog beperkt heeft plaatsgevonden, is er internationaal veel onderzoek verricht naar de te verwachten kosten. Uit deze literatuur blijkt dat kostenramingen sterk uiteenlopen. Dit hangt samen met verschillen in aannames en project specifieke omstandigheden.

Belangrijke factoren die de kosten beïnvloeden zijn onder meer:

- het vermogen en formaat van de turbines;
- de afstand tot de kust;
- de waterdiepte;
- het type fundering;
- nationale regelgeving en vergunningsvereisten;
- beschikbaarheid van geschikt materieel.

Voor de cijfers in dit rapport is aansluiting gevonden bij een recent rapport van TNO over de ontmantelingskosten van offshore windparken (Mancini, et al., 2025). De gehanteerde aannames zijn overgenomen in dit rapport.

De studie gaat uit van:

- een windpark met een opgesteld vermogen van 2 GW;
- turbines van 15 MW;
- een afstand tot de kust van 105 kilometer.

Dit resulteert in de volgende kostenstructuur:

- €172.500 per MW voor volledige verwijdering van het windpark (inclusief kabels en volledige monopiles).
- €110.600 per MW voor gedeeltelijke verwijdering (exclusief kabels, monopiles tot 6 meter onder de zeebodem verwijderd).

Dezelfde studie benadrukt dat de verwijderingskosten per MW stijgen wanneer het een kleiner windpark betreft, en dalen wanneer het een windpark met turbines van een grotere capaciteit betreft. Voor dit rapport gaan we uit van het bovenstaande scenario en dus de bovengenoemde beraamde kosten.

4.2 Schrootwaarde van de materialen

De materiaalstromen die in deze paragraaf worden meegenomen komen overeen met de dominante massastromen uit hoofdstuk 2. Het betreft staal, aluminium, koper, ijzerhoudende legeringen en composieten. Samen vertegenwoordigen zij het overgrote deel van het gewicht van een windturbine en beschikken zij (met uitzondering van composieten) over een bestaande afzetmarkt.

De materiaalintensiteiten zijn gebaseerd op een Type D-PM turbine, conform de aannames in het TNO-rapport, om consistentie tussen kosten- en opbrengstberekeringen te waarborgen. De opbrengsten zijn uitgedrukt in euro per MW opgesteld vermogen, zodat directe vergelijking met ontmantelingskosten mogelijk is.

De gehanteerde schrootprijzen zijn gemiddelde bandbreedtes, gebaseerd op marktindices en expertinterviews. In de praktijk kunnen opbrengsten afwijken door kwaliteit, vervuiling, scheiding en timing.

Tabel 7 toont per materiaal de gebruikte schrootprijs (in €/ton) en de resulterende opbrengst per MW. De tabel laat zien dat staal veruit de grootste bijdrage levert aan de totale opbrengst, terwijl koper een hoge waarde per ton heeft maar in kleinere hoeveelheden voorkomt. Composieten vormen een negatieve opbrengst, omdat verwerking geld kost.

In onderstaande sub paragrafen worden de schootwaarden van de materialen in tabel 7 toegelicht.

Materiaal	Opbrengst €/ton	Opbrengst €/MW
Staal	200 tot 350	€55.000
Aluminium	1250 tot 2200	€985
Koper (kabels)	3000	€5.100
Koper (overige vormen)	8000 tot 9400	€14.790
IJzer	200 tot 350	€5.225
Composiet	-200 tot -300	-€1.875

Tabel 7. Opbrengsten van grondstoffen

4.2.1 Staal

De schrootprijs van staal wordt in veel gevallen bepaald door (inter)nationale prijsindexen zoals Plats, Argus, BDSV of de Tijd. Staal in windturbines is veelal hoogwaardig constructiestaal; uit expertinterviews blijkt dat dit meer waard is dan reguliere staallegeringen. De waarde van staal kan op dagelijkse basis verschillen maar ligt de afgelopen tijd gemiddeld tussen 200 tot 350 Euro per ton (op basis van Doornbos Metals en expertinterviews). De daadwerkelijke waarde hangt af van de specifieke legering en eventuele andere vervuilende toevoegingen.

4.2.2 Aluminium

De schrootprijs van aluminium wordt bepaald op basis van (inter)nationale prijsindexen. In windturbines komt aluminium met name voor in niet-dragende constructiedelen en tegenwoordig steeds vaker in kabels. Gezien de vorm en kwaliteit van het aluminium dat uit een windturbine verwijderd kan worden is het vrijwel altijd mogelijk dit metaal van andere materialen te scheiden.

De prijs van aluminium verschilt wederom per dag en hangt ook sterk af van de kwaliteit, puurheid en overige contaminatie van het schroot. Doornbos Metals plaatst de waarde van aluminium gemiddeld tussen de 1250 en 2200 Euro per ton.

Aluminium wordt door Europa tegenwoordig bestempeld als strategische grondstof, dat wil zeggen dat erkend wordt dat het van grote waarde is voor industrieën zoals defensie, digitale technologieën en duurzame energievoorzieningen. Deze status heeft als gevolg dat aluminium onder beleid valt dat erop gericht is om het materiaal binnen de Europese grenzen te houden, wat de vraag ernaar vergroot. Hoewel prijsvolatiliteit op korte termijn aanwezig blijft is de verwachting dat het prijsniveau op (middel)lange termijn stabiel blijft of lichtelijk zal stijgen.

4.2.4 Koper

Secundaire koperprijzen worden bepaald op basis van internationale handelsmarkten, zoals de LME-index. Het is één van de meest waardevolle metalen en komt in windturbines bijvoorbeeld voor in kabels, als generatorwikkelingen of in andere transformator- en vermogenselektronica. Het kan bij ontmanteling gemakkelijk gescheiden worden en komt vaak als schoon en puur product terug.

Voor koper is een belangrijk onderscheid te maken: de prijs van koper in relatief pure vorm ligt tussen de 8000 en 9400 Euro per ton, terwijl die van koperen kabels op ongeveer 3000 Euro per ton ligt (Doornbos Metalen). Volgens de Copper Development Organisation (2022) zit ongeveer de helft van het koper in een windturbine in bekabeling.

Gezien de nog altijd stijgende vraag naar elektronische componenten in Europa is het waarschijnlijk dat de koperprijs stabiel stijgend zal blijven. Het wordt erkend als één van de belangrijkste materialen in de energietransitie, wat de lange termijnpositie ten goede komt.

4.2.5 IJzer

De schrootwaarde van ijzer en mangaan wordt hoofdzakelijk bepaald door (inter)nationale handelsmarkten voor ferro- of staalschroot. Voor deze materialen geldt dat het niet als afzonderlijk metaal in windturbines voorkomt; het is een baselement voor verschillende legeringen. Het wordt daarom verwijderd in de vorm van grote constructie-elementen zoals staal van de toren of wapeningsstaal in beton.

Voor verdere toelichting, zie 5.2.2.

4.2.6 Composiet

De schrootprijs van glasvezelversterkte en koolstofvezelversterkte composieten (GFRP en CFRP, respectievelijk) is negatief; het kost dus geld om deze materialen te laten verwerken. Deze materialen komen met name voor in de turbine-bladen en als kap van de nacelle. Het zijn met composiethars verlijmde componenten, die zeer stevig en licht zijn. Juist door die stevigheid zijn ze moeilijk circulair te verwerken.

De economische waarde zit momenteel niet in de waarde van de grondstoffen maar in het vermijden van stortkosten. Daarnaast wordt het storten van dergelijke materialen beleidsmatig steeds verder ingeperkt.

Momenteel kost het in Nederland zo'n 200 tot 300 Euro per ton om deze materialen uit turbinebladen te laten verwerken, blijkt uit expertinterviews. Door schaalvoordelen en procesoptimalisatie kan het in de toekomst voorkomen dat verwerkingskosten gaan dalen. Een stijgende vraag vanuit de luchtvaart- en automotive-industrie kan op termijn zorgen voor volledige reductie van de verwerkingskosten of zelfs een positieve opbrengst.

4.3 Business case circulariteitshub

Dit deelhoofdstuk heeft als doel het verduidelijken van de businesscase voor de circulaire verwerking van een offshore windpark. TNO heeft in eerder onderzoek de offshore decommissioningskosten in detail berekend (TNO, 2025). In datzelfde rapport worden opbrengsten uit materialen en kosten voor onshore verwerking echter buiten beschouwing gelaten. In dit rapport wordt de schrootwaarde van materialen toegevoegd die vrijkomt bij de circulaire strategie recycling. Zo kunnen deze minimale opbrengsten worden vergeleken met de kosten voor decommissioning om een beeld te schetsen van de business case van circulaire verwerking.

De businesscase voor decommissioning van een offshore windpark wordt met name bepaald door de volgende 3 aspecten:

- Opbrengsten uit componenten of materialen;
- Decommissioningskosten offshore;
- Kosten voor logistiek, voorbereiding en circulaire verwerking onshore.

De opbrengsten uit circulaire verwerking van windturbines bestaan dus in dit onderzoek uit de schrootwaarde van de materialen, zie tabel 8. Daartegenover staan de kosten voor decommissioning offshore, gevolgd door kosten voor logistiek, voorbereiding en circulaire verwerking onshore. Deze laatstgenoemde kostenpost is niet gekwantificeerd. De aanname is dat de kosten voor logistiek, voorbereiding en circulaire verwerking onshore aanzienlijk worden verlaagd wanneer de circulariteitshub grotere volumes verwerkt en de schaal vergroot.

Tabel 9 schaaft de opbrengsten op naar het niveau van de totale schrootwaardes van alle operationele offshore windturbines in Nederland. Ook laat tabel 9 daarbij de totale schrootwaardes zien van onshore windturbines in Nederland en het totale offshore Noordzeegebied, wat laat zien dat uitbreiding van de circulariteitshub potentie heeft voor significante materiaalwaarden, die oplopen tot miljarden euro's op Noordzeeschaal.

Kosten decommissioning €/MW	Minimale opbrengst schrootwaarden €/MW
€172.500 per MW voor volledige verwijdering van het windpark	Totaal opbrengsten: (bij volledige verwijdering monopile) €79.225
€110.600 per MW voor gedeeltelijke verwijdering	Totaal opbrengsten: (bij gedeeltelijke verwijdering monopile) €63.275

Tabel 8. Vergelijking kosten en minimale opbrengsten per MW (uitgaande van type turbine D-PM)

Offshore NL	Onshore NL	Noordzeegebied
4.748 MW offshore in NL , betekent ongeveer €376 miljoen aan schrootwaarde van de materialen.	7.071 MW onshore in NL , betekent ongeveer €560 miljoen aan schrootwaarde van de materialen.	21.373 MW in het offshore Noordzeegebied , betekent ongeveer €1,7 miljard aan schrootwaarde van de materialen.

Tabel 9. Totale minimale opbrengsten van schrootwaarden uit windturbines

De potentiële materiaalwaarden uit tabel 9 laten zien dat circulaire verwerking op Noordzeeschaal kan oplopen tot miljarden euro's. Deze waarden komen echter niet gelijkmatig beschikbaar in de tijd. Uit de volumeanalyse (hoofdstuk 2) blijkt dat de aanvoer van offshore windturbines gefaseerd verloopt: tot circa 2040 gaat het om beperkte volumes met incidentele pieken per windpark, gevolgd door een duidelijke dip in de periode 2038–2050. Pas vanaf circa 2045–2050 ontstaat een substantiële schaalvergroting. Dit betekent dat een businesscase die uitsluitend is gebaseerd op Nederlandse offshore volumes in de tussenliggende periode risico loopt op onderbenutting van capaciteit.

Het combineren van materiaalstromen uit onshore windturbines en offshore windparken in het bredere Noordzeegebied kan bijdragen aan een constantere aanvoer en een stabielere benutting van logistieke en verwerkingscapaciteit. Onshore stromen vertonen daarbij een gelijkmatiger verloop en kunnen fluctuaties in offshore volumes deels opvangen. Daarmee wordt duidelijk dat schaalvoordelen niet alleen afhangen van totale volumes, maar ook van de mate waarin deze in de tijd en over regio's worden gebundeld. Dit onderstreept dat de ontwikkeling van een circulariteitshub vraagt om een gefaseerde aanpak, waarbij in de eerste decennia nadruk ligt op het combineren van stromen en vanaf circa 2045 op het efficiënt verwerken van grootschalige offshore volumes.

De toegevoegde waarde van een circulariteitshub zit vooral in het verlagen van kosten in het onshore deel van de keten: kosten voor logistiek, voorbereiding en circulaire verwerking:

1. Logistieke optimalisatie

De ontmanteling van windturbines vindt volgens TNO plaats in een campagne waarbij alle hoofdcomponenten van windturbines zoals toren, nacelle en bladen gezamenlijk naar een zeehaven worden vervoerd. Vanuit deze aanlandingshaven worden materialen vervolgens verder vervoerd naar eindverwerkers. De afstand tussen haven en eindverwerker is hierbij bepalend voor de kosten. Een circulariteitshub kan deze afstand beperken door verwerking geografisch te concentreren en directe verbindingen met eindverwerkers te faciliteren, bijvoorbeeld tussen haven en staalproducent. Hoe korter deze keten en hoe minder omwegen via tussenbesteders, hoe lager het aantal tonkilometers en de bijbehorende kosten. Dit effect is vooral groot voor staal, aangezien dit het grootste deel van de massa vertegenwoordigt.

Door andere materiaalstromen hierop aan te laten sluiten, kan de keten als geheel efficiënt worden ingericht.

2. Operationele efficiëntie

Elke extra handeling, zoals overslag, opslag, hijsen, verplaatsen, knippen, snijden, schoonmaken en sorteren, verhoogt de kosten door extra inzet van materieel, arbeid en tijd. In een gefragmenteerde keten vinden deze stappen vaak op meerdere locaties plaats. Door ontvangst, demontage, scheiding en voorbereiding zo veel mogelijk te clusteren kan een circulariteitshub het aantal handelingen beperken. Dit verlaagt direct de kosten en zorgt voor een efficiëntere en beter beheersbare operatie.

3. Schaalvoordelen

Het bundelen van grote volumes windturbines en materialen op één locatie maakt het mogelijk om kosten per ton structureel te verlagen. Bij hogere volumes kunnen processen efficiënter worden ingericht, personeel en materieel beter worden benut en vaste kosten over meer output worden uitgesmeerd. Daarnaast maakt schaal het economisch aantrekkelijk om te investeren in gespecialiseerde installaties en innovatieve verwerkingsroutes, bijvoorbeeld voor composieten of kritieke metalen. Zonder voldoende aanvoer blijven dergelijke investeringen vaak financieel onhaalbaar. Op deze manier vormt schaalgrootte een cruciale randvoorwaarde voor zowel kostenreductie als verdere circulariteitsinnovatie.

4.4 Conclusie

Op basis van de huidige aannames en marktprijzen wegen de opbrengsten uit recycling van materialen niet op tegen de kosten van offshore ontmanteling. In de businesscase die in dit hoofdstuk is uitgewerkt, betekent dit echter niet dat circulaire verwerking daarmee economisch irrelevant is. De kosten voor offshore decommissioning moeten ongeacht de gekozen verwerkingsstrategie worden gemaakt, omdat volledige of gedeeltelijke verwijdering wettelijk en technisch onvermijdelijk is. Deze kosten vormen daarmee grotendeels een vast gegeven en zijn slechts in beperkte mate beïnvloedbaar door keuzes in de circulaire keten.

Vanuit dit perspectief ligt de economische relevantie van circulariteit niet in het compenseren van offshore ontmantelingskosten, maar in het optimaliseren van het onshore deel van de keten. Circulaire verwerking is daarmee primair een strategie voor kostenbeheersing en toekomstbestendigheid, niet voor directe winstgevendheid.

Tegelijkertijd laat de analyse zien dat schaal, standaardisatie en clustering via een circulariteitshub substantiële kostenreducties kunnen opleveren in logistiek en verwerking. In combinatie met technologische ontwikkeling, strengere regelgeving en volwassener secundaire markten kan dit de economische balans in de toekomst verschuiven. Project-specifieke analyses blijven daarbij noodzakelijk, maar op systeemniveau onderbouwt deze analyse de strategische waarde van investeren in circulaire infrastructuur.



5. STAKEHOLDERANALYSE

5. Stakeholderanalyse

Dit hoofdstuk richt zich op de betrokken stakeholders bij het proces van ontmanteling tot circulaire verwerking van windturbines. Het doel van dit hoofdstuk is om inzichtelijk te maken welke stakeholdergroepen in Nederland relevant zijn voor de circulariteitshub. Per stakeholdergroep is het bestaande Nederlandse ecosysteem in kaart gebracht in de bijlage *Overzicht ecosysteem*.

Voor deze analyse worden negen stakeholdergroepen onderscheiden die gezamenlijk het fundament vormen in de samenwerking richting een gecoördineerde circulariteitshub. Het hoofdstuk is opgebouwd als volgt:

5.1 Asset owners & operators
5.2 Offshore decommissioning & marine contractors
5.3 Transport & heavy logistics providers
5.4 Haven- en marshallingbedrijven
5.5 Componenthergebruik specialisten
5.6 Metaalverwerkers
5.7 Composietverwerkers
5.8 Recyclers van kritieke grondstoffen & magneetverwerkers
5.9 Systeem- en governancepartijen

5.1 Asset owners & operators

Asset owners en operators zijn juridisch en financieel eindverantwoordelijk voor windparken gedurende de gehele levenscyclus, inclusief de ontmantelingsfase. Dit betekent dat zij in eerste instantie verantwoordelijk zijn voor de verwijdering van het windpark. In de praktijk besteden zij deze verantwoordelijkheid uit via een decommissioning tender, waarop marktpartijen kunnen inschrijven met een integraal plan voor de uitvoering.

In dergelijke tenders wordt vastgelegd hoe taken en verantwoordelijkheden voor demontage, transport en circulaire verwerking van componenten en materialen worden georganiseerd en verdeeld over (onder)aannemers. Asset owners bepalen hierbij de scope, planning en contracteringsstrategie, en stellen randvoorwaarden op het gebied van veiligheid, milieu, rapportage en in toenemende mate circulariteit. Daarmee hebben zij een doorslaggevende rol in hoe circulaire ambities daadwerkelijk worden vertaald naar de uitvoering van decommissioningprojecten.

Binnen een nationale circulariteitshub zijn zij daarmee bepalend. Zij genereren het aanbod van vrijkomende materialen en kunnen via bundeling van projecten, standaardisatie van eisen en langjarige afspraken de investeringszekerheid voor verwerkende partijen vergroten. Voor een hub is vooral relevant in hoeverre deze aansluit bij de gewenste verwerkingsroutes van de asset owner en aantoonbare meerwaarde biedt. Die meerwaarde zit in logistieke optimalisatie, schaalvoordelen en operationele efficiëntie, en moet zich vertalen in lagere totale projectkosten en hogere duurzaamheid binnen de aanbestedingsstrategie.

De offshore ownershipmarkt in Nederland is geconcentreerd en opereert op gigawatt-schaal. Deze partijen beschikken over substantiële organisatorische capaciteit en contracteringsmacht, wat kansen biedt voor coördinatie en volumebundeling. Tegelijkertijd zijn deze partijen door hun omvang en complexiteit soms lastig te betrekken en bewegen besluitvormingsprocessen relatief traag. Daarnaast is het belangrijk te onderkennen dat de oorspronkelijke bouwers en ontwikkelaars na enkele decennia niet per se meer de eigenaar zijn, wat gevolgen heeft voor langetermijnafspraken en betrokkenheid in de ontmantelingsfase.

Belangrijke actoren in deze stakeholdergroepen zijn onder andere Eneco, RWE, Shell, Ørsted en Vattenfall. Voor meer informatie en overige partijen, zie tabel 1 in de bijlage C: *Overzicht ecosysteem*.

5.2 Offshore decommissioning & marine contractors

Offshore decommissioning & marine contractors voeren de fysieke ontmanteling op zee uit. Hun kernfunctie ligt in het veilig en gecontroleerd demonteren, hijsen, stabiliseren en transporteren van grote turbinecomponenten (bladen, nacelle, torensegmenten) en, afhankelijk van de scope, het verwijderen of (gedeeltelijk) terugwinnen van funderingen en kabelinfrastructuur. Deze stakeholdergroep bepaalt in hoge mate of een circulariteitshub operationeel betrouwbaar kan zijn, omdat zij de aanvoerlogistiek en campagneplanning domineren. Een circulariteitshub die aansluit op hun werklogica (standaardisatie van interfaces, voorspelbare aanlandingscapaciteit, heldere afspraken over segmentatie en conditionering) verlaagt kosten en risico's en vergroot de kans dat materiaalstromen daadwerkelijk in Nederland landen.

Marine contractors zijn actief in de ketenstappen die het meest kapitaalintensief en risicogedreven zijn: engineering en uitvoeringsplanning, mobilisatie van schepen en kranen, offshore demontagecampagnes, subsea- en kabeloperaties, en het maritieme transport naar een aanlandingshaven. Daarbij bepalen zij in sterke mate de uitvoeringsvolgorde (campagne-logica), de snelheid van aanvoer naar land (piekbelasting) en de staat/kwaliteit van de aangeleverde componenten (bijv. schade, vervuiling, zoutbelasting, mate van segmentatie).

In Nederland is de spelerbasis in de offshore windketen relatief sterk, maar de relevante markt is feitelijk Noordzee-breed: assets worden internationaal ingezet en opdrachten worden in een bredere Noordwest-Europese arena verdeeld.

Dit betekent dat “Nederlandse” aanwezigheid niet automatisch gelijkstaat aan gegarandeerde beschikbaarheid; planning en contractering zijn gekoppeld aan internationale orderboeken. De internationale, asset-gedreven markt vraagt om vroegtijdige contractering en regionale afstemming.

Decommissioning en marine contractors zijn bijvoorbeeld partijen als Allseas, Boskalis, Heerma Marine Contractors, HSM Offshore Energy, Koole, N-Sea en Van Oord. Voor meer informatie en overige partijen, zie tabel 2 in de bijlage *Overzicht ecosysteem*.

5.3 Transport & heavy logistics providers

Transport- en heavy logistics providers verzorgen de verplaatsing van vrijgekomen turbinecomponenten en materiaalstromen na ontmanteling. Hun kernfunctie ligt in het organiseren en uitvoeren van zwaar wegtransport, maritiem projecttransport en logistieke coördinatie tussen locatie, haven, opslag en verwerker.

In de decommissioningfase zijn zij actief zodra componenten zijn gedemonteerd en vervolgttransport nodig is vanaf aanlandingshaven naar opslag- of verwerkingslocaties. In de end-of-life fase faciliteren zij de koppeling tussen marshalling, recycling en industriële afzet. Voor een circulariteitshub zijn zij faciliterend. Zij bepalen niet de ontmantelingsstrategie, maar beïnvloeden wel direct de kosten, doorlooptijd en mate van volumebundeling.

Belangrijke actoren binnen deze stakeholdergroep zijn bijvoorbeeld Bolk Transport, Broekman Logistics, Jumbo Maritime, Mammoet, Van der Vlist en Wagenborg Nedlift. Voor meer informatie en overige partijen, zie tabel 3 in de bijlage *Overzicht ecosysteem*.

5.4 Haven- en marshallingbedrijven

De kernfunctie van haven- en marshallingbedrijven is het is het faciliteren van aanlanding, lossen, tijdelijke opslag, segmentatie en verdere distributie van grote turbinecomponenten en funderingsdelen. In de end-of-life fase bieden zij ruimte en infrastructuur voor eerste verbewerking, zoals snijden, sorteren en conditioneren van materialen voordat deze naar gespecialiseerde verwerkers gaan.

Zij zijn actief in de ketenstappen rondom aanlanding, overslag, laydown, tijdelijke buffering en logistieke doorvoer. Deze stakeholder kan ook een rol spelen bij lichte industriële activiteiten binnen een circulariteitshub op het terrein, zoals snijwerk of demontage van grote staalstructuren.

In de Nederlandse context zijn Maasvlakte/Rotterdam, Eemshaven, Vlissingen (North Sea Port) en het Noordzeekanaalgebied (IJmuiden/Amsterdam) de meest logische locaties voor offshore aanlanding en marshalling, omdat deze havens als enige in Nederland een offshore wind terminal hebben. Dit betekent dat deze havens over de combinatie van diepe vaargeulen, heavy-duty kades en grote aaneengesloten terreinen beschikken die nodig zijn voor offshore windactiviteiten. Voor meer informatie over deze havenpartijen, zie tabel 4 in de bijlage *Overzicht ecosysteem*.

5.5 Component hergebruik specialisten

Componenthergebruik-specialisten spelen in offshore een rol bij hergebruik van componenten uit turbines die op zee worden ontmanteld. Omdat offshore turbines extreem groot, zwaar en kostbaar zijn, ligt volledige herplaatsing van complete turbines vrijwel nooit voor de hand. De waarde zit vooral in selectief hergebruik van hoofdcomponenten zoals generatoren, transformatoren, sensoren, pitch- en yaw-systemen, power electronics en bepaalde mechanische onderdelen die na demontage nog een tweede levenscyclus aankunnen.

Kernactiviteiten van deze stakeholder bestaan uit offshore inspectie (remote of met rope access), condition assessment, selectieve uitname tijdens demontagecampagnes, gevolgd door revisie, testen, certificering en remarketing aan onshore windprojecten of industriële afnemers. Voor sommige componenten geldt dat zij via remanufacturing-processen weer naar OEM-specificaties worden gebracht zoals aandrijfsystemen of elektrische modules.

In een nationale decommissioninghub zijn componenthergebruik specialisten belangrijk omdat ze een hoge R-strategie (hergebruik boven recycling) mogelijk maken en zo de economische waarde van offshore assets maximaliseren. Tegelijkertijd zijn deze partijen sterk afhankelijk van:

- selectieve demontage offshore,
- schade-arme handling in de haven,
- tijdige planning door asset owners en marine contractors, anders verschuift de waarde automatisch richting materiaalrecycling.

Voorbeelden van component herbruik partijen in Nederland zijn Business in Wind, DOT Wind, IVER, IX Decom, Siemens Gamesa Renewable Energy Nederland, Spares in Motion en Wind Turbine Market Place. Voor meer informatie en overige partijen, zie tabel 5 in de bijlage *Overzicht ecosysteem*.

5.6 Metaalverwerkers

Metaalrecyclers en smelters vormen de ruggengraat van de end-of-life fase op materiaalniveau. Zij verwerken belangrijke metaalstromen uit windturbines: staal, ijzer, koper en aluminium, en brengen deze terug in industriële productieketens. De Nederlandse metaalrecyclingsector verwerkt jaarlijks miljoenen tonnen ferro- en non-ferromateriaal. De toekomstige volumes uit offshore decommissioning zijn substantieel, maar blijven relatief beperkt in verhouding tot de totale nationale metaalstromen. Dit betekent dat technische verwerkingscapaciteit aanwezig is.

Staal is veruit de grootste materiaalstroom. Torens, offshore funderingen en delen van de nacelle bestaan grotendeels uit constructiestaal. Deze volumes bepalen in belangrijke mate de logistieke schaal van de decommissioningketen. Ferrorecyclers knippen, shredderen en sorteren staal tot schrootkwaliteit; staalproducenten zetten dit om in nieuw staal, in toenemende mate via elektrische vlamboogovens.

Door de omvang en relatief stabiele afzetmarkt kan staal de basis vormen voor een businesscase voor een nationale hub: grote, geconcentreerde volumes maken investeringen in segmentatie, opslag en logistieke optimalisatie rendabel.

Koper is volumematisch kleiner maar economisch zeer waardevol. Het komt vrij uit kabels, generatoren en transformatoren. Non-ferrorecyclers strippen en granuleren kabels of scheiden koper via mechanische processen. Het materiaal wordt vervolgens geraffineerd tot secundair koper. De hoge marktwaarde stimuleert zorgvuldige demontage, maar volumes zijn meer verspreid en projectafhankelijk dan bij staal.

Aluminium is qua volume en strategisch gewicht beperkter. Het wordt gescheiden via wervelstromscheiding en omsmelting. De recyclingtechniek is volwassen, maar aluminium vormt zelden een sturende factor in de ketenorganisatie.

Metaalrecycling en vooral smeltactiviteiten zijn sterk locatiegebonden. Installaties zijn kapitaalintensief, energie-intensief en gebonden aan vaste industriële locaties met milieuruimte en zware netaansluitingen. Voor staal is koppeling aan industriële clusters cruciaal. Voor koper en aluminium geldt dat verwerking vaak plaatsvindt in gespecialiseerde installaties die eveneens geconcentreerd zijn in grote industriële gebieden. De locatiekeuze van een hub kan daarom het beste aansluiten bij bestaande metaalclusters om dubbele logistiek te vermijden.

De markt is overwegend aanbodgestuurd: recyclers verwerken wat vrijkomt en handelen binnen mondiale prijsvorming. Specifieke windvolumes worden opgenomen in bredere schrootstromen. Zonder aanvullende afspraken ontstaat niet zomaar een aparte wind-specifieke keten.

Belangrijke actoren binnen deze stakeholdergroep zijn onder andere Tata Steel, EMR, HKS Metals, Hoeben Recycling en Jansen Recycling Groep. Voor meer informatie en overige partijen, zie tabel 6 in de bijlage *Overzicht ecosysteem*.

5.7 Composietverwerkers

Composietverwerkers zijn een cruciale, maar nog opschalende stakeholdergroep in de end-of-life windketen. Het circulair verwerken rotorbladen tot nieuwe toepassingen zal gaan via hergebruik, repurpose of nieuwe secundaire grondstof via recycling.

Repurpose-bedrijven geven afgedankte windturbinebladen een tweede leven door ze zonder recycelen om te vormen tot nieuwe producten en infrastructuur. Ze benutten de bestaande sterkte en vorm van de bladen om er o.a. meubilair, speelobjecten, geluidsschermen en bruggen van te maken, waardoor afval wordt voorkomen en CO₂-uitstoot sterk daalt. BladeMade maakt bijvoorbeeld stadsmeubilair, speeltoestellen en geluidsschermen uit oude bladen en InfraBlades zet balden in als dragende elementen in duurzame bruggen en andere infrastructuurtoepassingen.

Er zijn verschillende vormen van composietrecycling (zie 3.3.2), elk met een eigen techniek, toepassingsniveau en mate van volwassenheid. Mechanische recycling bestaat uit het shredden en malen van composieten tot vezelrijke recycelaatstromen, die doorgaans worden hergebruikt in laagwaardige toepassingen. Dit is de meest volwassen en commercieel beschikbare techniek. Nederlandse partijen zoals CRC passen deze methode op schaal toe en winnen hierbij ongeveer 70% van de glas- en koolstofvezels terug. Thermische recycling omvat processen waarbij composieten bij hoge temperaturen worden afgebroken, wat kan leiden tot materiaal- of energieretrouwning, maar vaak met hogere energie-intensiteit en risico op vezeldegradatie. Een specifieke thermische methode is pyrolyse, waarbij het materiaal in een zuurstofvrije omgeving ontleedt en vezels relatief intact kunnen worden teruggewonnen. Dat is wat onder andere waar DOPS Recycling Technologies mee experimenteert.

De markt van composietverwerkers is gefragmenteerd: een klein aantal gespecialiseerde mechanische recyclers, enkele thermische technologieontwikkelaars en ontwerpgedreven repurpose-initiatieven. Er is geen partij die de volledige keten beheerst. Hun eisen, zoals intacte, schoon gezaagde bladsegmenten, beïnvloeden direct de segmentatie, logistiek en kosten in de decommissioningfase. Door beperkte volumes, opschalingsuitdagingen en het ontbreken van stabiele afzetmarkten vormt composietverwerking het meest kwetsbare onderdeel van de EoL-keten. Zonder volumebundeling, infrastructuur en investeringen blijft hoogwaardige verwerking achter en groeit het risico op knelpunten bij toekomstige offshore decommissioning.

Voor overige Nederlandse partijen in het ecosysteem van composietverwerkers, zie tabel 7 in de bijlage *Overzicht ecosysteem*.

5.8 Recyclers van kritieke grondstoffen en magneetverwerkers

Recyclers van kritieke grondstoffen en magneetverwerkers richten zich op de terugwinning van zeldzame aardmetalen (zoals neodymium, praseodymium, dysprosium en terbium) uit permanente magneten in direct-drive generatoren. De terugwinning van kritieke grondstoffen uit offshore windturbines is strategisch belangrijk, maar in Nederland staat deze keten nog praktisch in de kinderschoenen. Er zijn geen bestaande gespecialiseerde verwerkers die magneten of REE-stromen (Rare Earth Elements) op industriële schaal kunnen terugwinnen, en er is geen binnenlandse afzetmarkt voor nieuwe of gerecyclede magneten.

Ook op Europees niveau vormt CRM-recycling een structurele uitdaging: technologie is in ontwikkeling, vergunningen zijn complex, volumes zijn laag en raffinagecapaciteit is sterk afhankelijk van landen buiten de EU. Daardoor bevindt de sector zich nog in een fase van pilots en consortia, waarbij bundeling van stromen uit meerdere sectoren (EV's, industrie, elektronica) noodzakelijk is om überhaupt een rendabele keten op te bouwen. Stakeholders in tabel 8 van de bijlage *Overzicht ecosysteem* kunnen potentieel een rol gaan spelen in de ontwikkeling van technologieën voor voorbereiding en recycling van kritieke grondstoffen.

5.9 Systeem- en governancepartijen

Systeem- en governancepartijen bepalen de institutionele en normatieve randvoorwaarden waarbinnen de decommissioning- en end-of-life keten functioneert. De kernfunctie van deze stakeholder ligt in wet- en regelgeving, vergunningverlening, normontwikkeling, certificering, kennisopbouw en sectorcoördinatie. Systeem- en governancepartijen vormen de institutionele randvoorwaarde voor een nationale circulariteitshub. Zonder heldere en consistente kaders voor ontmanteling, hergebruik en recycling blijft de businesscase onzeker. Door circulariteit expliciet te verankeren in vergunningen, tenders en normering kunnen zij volumebundeling en hoogwaardige verwerking stimuleren. De haalbaarheid van een hub is daarmee in belangrijke mate afhankelijk van bestuurlijke voorspelbaarheid en beleidsmatige consistentie.

Normering en certificering zijn deels nationaal georganiseerd, maar sterk verweven met Europese en internationale kaders. Certificeringsinstanties en classificatiebureaus opereren internationaal. Brancheorganisaties functioneren als intermediair tussen markt en overheid. Onderzoeksconsortia en kennisinstellingen zijn projectmatig georganiseerd, vaak met Europese cofinanciering.

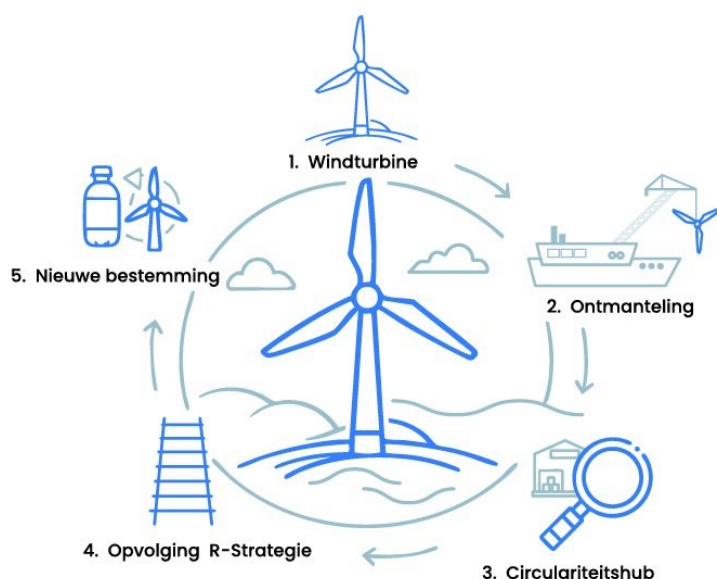
De structuur is daarmee niet één hiërarchisch systeem, maar een netwerk van publieke en semi-publieke partijen met verschillende bevoegdheden en belangen. Dit maakt afstemming cruciaal, met name wanneer circulaire doelstellingen moeten worden geïntegreerd in bestaande regelgeving.

Voorbeelden van relevante systeem- en governance partijen zijn AYOP, Energie Samen, Ministerie van Economische Zaken en Klimaat (EZK), Ministerie van Klimaat en Groene Groei (KGG), NedZero, Rijksdienst voor Ondernemend Nederland (RVO), Rijkswaterstaat, Tennet en TNO. Voor meer informatie en overige partijen, zie tabel 9 in bijlage: *Overzicht ecosysteem*.

A blue-tinted photograph of a tunnel interior. A metal staircase leads up towards a person in the distance. The tunnel walls are lined with metal supports and cables. The overall scene is dimly lit, with a strong blue color cast.

6. BLAUWDRIK CIRCULARITEITSHUB

6. Blauwdruk circulariteitshub



In dit hoofdstuk wordt ingezoomd op de randvoorwaarden en processtappen die noodzakelijk zijn om offshore windturbines, na ontmanteling op zee, te verwerken via een centraal georganiseerde circulariteitshub.

Een circulariteitshub wordt in dit onderzoek gedefinieerd als een centraal georganiseerde faciliteit waar materialen en componenten uit ontmantelde windturbines worden verzameld, gesorteerd en voorbereid voor circulaire verwerking. De hub fungeert daarmee als het knooppunt tussen ontmanteling, logistiek en circulaire verwerking en vervult een systeemfunctie voor samenwerking, schaal, voorspelbaarheid en efficiëntie in de windenergieketen.

Afbakening en uitgangspunten

Voor het ontwerpen van een toekomstbestendige circulariteitshub is het essentieel om rekening te houden met de sterke technologische evolutie van offshore windturbines. In ruim vijftien jaar tijd zijn windparken gegroeid van relatief kleine turbines naar de nieuwste generatie megaturbines met grotere afmetingen, hogere vermogens en zwaardere componenten. Deze snelle schaalvergroting heeft directe gevolgen voor onderdelen binnen de circulariteitshub.

Daarom vergelijken we voor dit hoofdstuk drie generaties Nederlandse windparken: Amalia (verwacht decommissioning jaar 2028), Gemini (verwacht decommissioning jaar 2037) en Hollandse Kust Zuid (verwacht decommissioning jaar 2053), zie tabel 10. Samen representeren zij hoe de specificaties van turbines veranderen over tijd: van 2 MW naar 11 MW vermogen, van bladen van 40-meter naar 97-meter lang, en van 13.200 ton staal naar ruim 168.000 ton per windpark. Dit hoofdstuk schetst aan de hand van deze drie generaties de voorwaarden voor ruimte en verwerkingscapaciteit en hoe die zullen moeten opschalen in de komende decennia.

	Decommissioning generatie '30	Decommissioning generatie '40	Decommissioning generatie '50
Windpark voorbeeld	Amalia	Gemini	Hollandse Kust Zuid
Jaar commissioning	2008	2016	2023
Verwacht jaar decommissioning	2028	2037	2053
Aantal turbines	60	150	139
MW per turbine	2	4	11
Rotordiameter in m	80	130	200
Bladlengte in m	40	63	97
Torenhoogte in m	60	89,5	128
Tiphoogte in m	100	154	225
Staal massa in ton	13.200	66.000	168.190

Tabel 10. Specificaties van 3 generaties windparken

Analyse kader en opbouw van hoofdstuk

De volgende componenten worden geanalyseerd in dit hoofdstuk: torens, nacelles, rotorbladen, en kabels. Hoewel de materiaalstromen van ontmantelde funderingen en inter-array kabels zich onderscheiden in schaal, logistiek en ketendynamiek, volgen zij geen wezenlijk andere ontmantelings- en verwerkingsprincipes dan de beschouwde staal- en kabelstromen uit windturbines. Deze worden daarom niet afzonderlijk toegelicht.

Om de randvoorwaarden voor een circulariteitshub systematisch te kunnen bepalen en toepasbaar te maken op een concrete locatie of systeemconfiguratie, hanteert dit hoofdstuk een gestructureerd analysekader. Dit kader is samengevat in tabel [X], waarin per component en materiaalstroom de vereisten worden geordend langs de opeenvolgende processtappen binnen de hub: ontvangst, opslag, sortering en voorbereiding, en circulaire verwerking. De tabel fungeert daarmee als een praktisch invulbaar overzicht: pas wanneer voor elke combinatie van component en processtap de relevante randvoorwaarden zijn gespecificeerd, ontstaat een compleet beeld van de ruimtelijke, logistieke en operationele eisen waaraan een circulariteitshub moet voldoen. Het invullen van deze ‘vakjes’ maakt het mogelijk om verschillende hubs of ontwerpvarianten met elkaar te vergelijken en om schaal- en capaciteitskeuzes expliciet te onderbouwen.

De opbouw van dit hoofdstuk volgt direct deze structuur. Paragraaf 6.1 bespreekt de voorbereidende stappen voorafgaand aan de feitelijke decommissioningfase op zee. Paragraaf 6.2 behandelt het eerste operationele deel van het hubproces: de ontvangst van componenten. Hierbij wordt ingegaan op vereisten voor kadefaciliteiten, handling, en hijscapaciteit. Deze analyse vult de kolom ‘Ontvangst’ in tabel 11. In paragraaf 6.3 staat het tweede procesdeel centraal: de opslag van componenten en materialen. De uitwerking in deze paragraaf correspondeert met de kolom ‘Opslag’ in de tabel. Paragraaf 6.4 behandelt vervolgens het derde en vierde procesdeel: sortering en voorbereiding, gevolgd door de daadwerkelijke circulaire verwerking van componenten en materialen.

Dit omvat onder meer demontage, materiaal-scheiding, bewerking voor hergebruik of herbestemming, en voorbereiding voor recycling van staal, composieten, elektrische componenten en kritieke grondstoffen. Deze paragraaf vult de laatste twee kolommen van tabel 11 en maakt inzichtelijk hoe verschillen tussen componenten leiden tot uiteenlopende ruimtelijke en procesmatige eisen binnen de hub.

Tabel 11 kan daarnaast worden gebruikt als analysekader, waarbij de lege velden worden ingevuld met de uitkomsten van de analyse per component en processtap.

Samen vormen deze paragrafen een samenhangende analyse die de randvoorwaarden per component en per processtap expliciteert en daarmee de basis legt voor het ontwerp van een toekomstbestendige circulariteitshub voor offshore wind.

Component/ materiaal	1) Ontvangst	2) Opslag	3) Sortering & voorbereiding	4) Circulaire verwerking
Torens – recycling (staal)				
Nacelles – re-use (componenten)				
Nacelles – recycling (metalen)				
Nacelles – kritieke grondstoffen				
Rotorbladen – repurpose (composiet)				
Rotorbladen – recycling (composiet)				
Kabels – recycling (koper/aluminium)				
Kabels – kunststof reststromen				

Tabel 11. Analyse kader blauwdruk circulariteitshub

Het hoofdstuk is dus opgebouwd als volgt:

6.1 Voorbereiding en decommissioning fase
6.2 Ontvangst
6.3 Opslag
6.4 Sortering, voorbereiding en circulaire verwerking
6.5 Conclusie

6.1 Voorbereiding en decommissioning fase

De voorbereidingsfase voor het opzetten van een circulariteitshub is cruciaal. In deze fase wordt bepaald welke rol een circulariteitshub inneemt: een logistieke doorvoerlocatie of een strategische schakel in hoogwaardige verwerking. Deze keuze bepaalt welke materialen in

Nederland worden verwerkt, welke circulaire eisen gelden en welke ruimtelijke en organisatorische randvoorwaarden nodig zijn. Ook wordt in deze fase vastgesteld welke governance-structuren en beleidsinstrumenten nodig zijn om investeringen mogelijk te maken. Dit hoofdstuk werkt deze voorbereidingsfase verder uit door achtereenvolgens in te gaan op strategische besluitvorming en investeringen, de rol van tenders en de belangrijkste vergunningstechnische randvoorwaarden.

6.1.1 Besluitvorming en investeringen

De voorbereidingsfase vereist gezamenlijke besluitvorming tussen overheid, havenbedrijven, OEM's, asset owners en circulaire verwerkers. Een belangrijk knelpunt is het gebrek aan voorspelbaarheid van materiaalstromen door keuzes zoals repowering, levensduurverlenging of uitgestelde ontmanteling. Daarnaast ontbreken verplichtingen of prikkels om voor hoogwaardige circulaire verwerking te kiezen, waardoor lineaire routes economisch aantrekkelijker blijven.

Ook ontbreekt een overkoepelende governance-structuur die verantwoordelijk is voor planning, datadeling, volume-borging en ketenafspraken. Zolang partijen individueel opereren, ontstaan geen schaalvoordelen en blijft de investeringsbereidheid beperkt. Een publiek-private governance-structuur kan deze coördinatie organiseren en richting geven aan gezamenlijke investeringen of pilots. Publieke stimulering of risicodeling is vaak noodzakelijk om de eerste investeringsdrempel te overbruggen.

6.1.2 De rol van het kavelbesluit en tenders

Kavelbesluiten en tenders bieden mogelijkheden om circulariteit in de windenergiesector structureel te borgen. Aan de voorkant kan de overheid via het kavelbesluit eisen stellen aan de bouw, exploitatie en ontmanteling van windparken. Omdat het eigenaarschap van windmolens met deze besluiten via de tender worden vastgelegd, kan de verantwoordelijkheid voor circulaire verwerking expliciet bij de asset owner worden gelegd. Nederland kan daarbij, via minimumstandaarden zoals de Circular Material Plans (CMP), vastleggen wat de minimaal beoogde verwerkingsstap is voor windturbinecomponenten aan het einde van de levensduur. Via aanbestedingen kan aanvullend worden gestuurd op traceerbaarheid, samenwerking met een circulariteitshub en minimale eisen voor hergebruik, repurposing en recycling. Door ook volumezekerheid of vaste verwerkingsroutes op te nemen, wordt de businesscase voor circulaire verwerkers versterkt.

Aan de achterkant van de levenscyclus kan de asset owner deze verantwoordelijkheid verder invullen via een tender voor decommissioning. Door circulaire prestaties expliciet mee te nemen in de vergunning, kan gericht worden gekozen voor partijen die hoogwaardige circulaire verwerking realiseren. Zo fungeren kavelbesluiten en tenders gezamenlijk als instrumenten om zowel eigenaarschap als materiaalstromen te verbinden aan circulaire ambities.

6.1.3 Vergunningen

De realisatie van een circulariteitshub vereist een integrale vergunningaanpak, omdat ontmantelde windturbineonderdelen in principe de afvalstatus krijgen en de verwerking

milieubelastend kan zijn.

Afvalstatus

Na ontmanteling worden turbineonderdelen juridisch als afval beschouwd. Dit maakt dat vergunningen moeilijker aan te vragen zijn, omdat afval wordt gezien als een risicovolle materialenstroom. Er bestaan vier wettelijke criteria waar een product aan moet voldoen om na end-of-life géén afval status te krijgen:

- Doel/gebruik: er is een duidelijke, nuttige toepassing voor het materiaal;
- Marktvraag: er bestaat aantoonbare vraag naar het materiaal of product;
- Technische geschiktheid: het materiaal voldoet aan kwaliteits- en veiligheidseisen voor de toepassing;
- Geen milieuschade: het gebruik leidt niet tot risico's voor mens of milieu.

Zodra een product of materiaal voldoet aan de vier wettelijke criteria en de status officieel is toegekend, wordt het niet langer beschouwd als afval maar als een marktwaardig product. In dit geval kan de rol van een circulariteitshub ook juridisch veranderen van afvalverwerker naar een producent van hoogwaardige grondstoffen. Dit zou niet alleen de administratieve lasten verminderen, maar verbetert ook de economische positie van de hub, omdat materialen met einde-afvalstatus vrij verhandelbaar zijn, gemakkelijker kunnen worden opgeslagen en verplaatst, en voor verwerkers aantrekkelijker worden vanwege voorspelbare kwaliteit en lagere complianceregels.

Omgevingsvergunning

Omdat windturbines na ontmanteling, zonder een einde-afvalstatus, worden beschouwd als afval, is voor opslag, voorbereiding en recyclingactiviteiten doorgaans een omgevingsvergunning vereist, inclusief milieu-, bouw- en eventueel wateraspecten. Met name stof- en emissiegevoelige processen (zoals bladbewerking) vragen om gesloten installaties en aanvullende milieutoetsen. De duur van een omgevingsvergunning traject kan in de praktijk tot twee jaar oplopen, ondanks de wettelijke streeftermijn van zes maanden, omdat vaak aanvullende onderzoeken nodig zijn op het gebied van lucht, geluid, bodem, afvalwater, veiligheid en technische bedrijfsvoering.

Overige vereisten

Daarnaast zijn onder meer een BIBOB-toets en, afhankelijk van de activiteiten, een MER-(beoordeling) van toepassing, met name bij de aanwezigheid van zeer zorgwekkende stoffen.

De realisatie van een circulariteitshub voor windturbinecomponenten vereist een zorgvuldig gecoördineerd en multidisciplinair vergunningenpakket.

6.1.4 Decommissioning fase

De decommissioningfase omvat alle activiteiten op zee die nodig zijn om een offshore windpark te ontmantelen en de componenten naar land te transporteren. Voor dit onderzoek is deze fase

relevant omdat zij bepaalt in welke vorm, volgorde en volumes materialen aankomen bij een circulariteitshub.

TNO beschrijft decommissioning als een reeks afzonderlijke campagnes met elk hun eigen planning en materieel (TNO, 2025). Deze campagnes omvatten onder andere de verwijdering van windturbines, funderingen, secondary steel en kabelinfrastructuur en worden projectmatig uitgevoerd.

Binnen dit onderzoek ligt de focus op de windturbinecampagne, omdat deze de primaire stroom van componenten vormt die aankomt bij een circulariteitshub. In deze campagne worden turbines ontmanteld met behulp van een jack-up vessel: een schip dat zichzelf met poten op de zeebodem positioneert en zo een stabiel werkplatform creëert voor zware hijsoperaties. Per turbine worden alle hoofdcomponenten verwijderd, waaronder rotorbladen, hub, nacelle en torensegmenten. Hoewel de turbine op zee wordt gesegmenteerd, worden alle onderdelen per turbine op hetzelfde schip geladen en gezamenlijk naar de haven gebracht. Dit is de norm, omdat overslag tussen schepen op zee te risicovol en complex is.

De exacte werkwijze bij de verwijdering van rotorbladen kan per windpark verschillen. In eerste instantie wordt uitgegaan van reverse installation. Bij oudere turbines zijn bladen vaak in sterformatie geïnstalleerd, waarbij drie bladen nog aan de rotor bevestigd zijn. Bij nieuwere turbines worden bladen individueel geïnstalleerd en naar verwachting ook per blad verwijderd. In dat geval worden de bladen doorgaans overdwars op het jack-up vessel geplaatst. Zowel sterformatie als deze overdwarse plaatsing zorgen voor een bredere vaargang van het schip, wat invloed heeft op logistiek en havenoperaties.

6.2 Ontvangst

In deze paragraaf worden de eerste randvoorwaarden voor een circulaire hub geïntroduceerd. Daarbij wordt eerst gekeken naar de vereisten voor het ontvangen van materialen en componenten die vanuit zee worden aangevoerd.

Zoals in de vorige paragraaf beschreven, worden turbines op zee ontmanteld en per schip naar een zeehaven gebracht, waar de componenten worden gelost. Per cyclus worden doorgaans 3 tot 4 turbines tegelijk aangevoerd. De ontmanteling verloopt naar verwachting in een tempo van circa 25 turbines per maand, vergelijkbaar met commissioning (TKI, 2026). Dit tempo is bepalend voor de benodigde capaciteit en doorlooptijd van een circulaire hub.

Een belangrijke bevinding uit het TKI-rapport uit 2025 over haveninfrastructuur voor offshore wind is dat decommissioning grotendeels dezelfde eisen stelt aan havens als commissioning. Dezelfde typen schepen moeten worden ontvangen, kades moeten geschikt zijn voor zware en grote componenten, en voldoende lay-down capaciteit is nodig om materialen tijdelijk op te slaan.

Tegelijkertijd is de supply chain voor decommissioning nog beperkt ontwikkeld. Hierdoor is de kans op langere verblijftijden van materialen in de haven groot. Dit maakt het beheersen van dwell time een kritische randvoorwaarde voor een circulaire hub: lange verblijftijden leiden tot extra ruimtebeslag, hogere kosten en verstoringen in de logistieke doorstroming. De inrichting van een hub moet daarom gericht zijn op snelle overslag, efficiënte verwerking en minimale opslagduur.

Havenvereisten voor schepen

- Jack-up vessels vereisen een waterdiepte van circa 10–15 meter
- Feeder barges vereisen circa 7–10 meter waterdiepte
- Door de lengte van jack-up vessels (circa 120–160 meter) zijn voldoende lange ligplaatsen en manoeuvreerruimte noodzakelijk

Kadevereisten

- Draagkracht van circa 35–40 ton/m²
- Kadelengtes van 200–500 meter om gelijktijdig grote componenten te kunnen lossen
- Voldoende lay-down ruimte voor tijdelijke opslag en logistieke afhandeling van componenten

6.3 Opslag

Bij offshore decommissioning fungeert de haven als decommissioning port en vormt de terminal het primaire aankomstpunt waar gedemonteerde turbineonderdelen worden gelost. Zodra een jack-up vessel aanmeert, moet de haven beschikken over voldoende fysieke ruimte en logistieke capaciteit om deze onderdelen tijdelijk op te slaan voordat zij worden getransporteerd naar hun volgende bestemming, zoals faciliteit voor het opslaan, sorteren of (voor)verwerken van materialen.

De benodigde opslagcapaciteit in de haven wordt bepaald door de mate waarin aanvoer en verwerking in de tijd op elkaar aansluiten. Componenten en materialen komen niet gelijkmatig binnen, maar in campagnes, batches en piekmomenten, afhankelijk van weersomstandigheden, scheepsbeschikbaarheid en de gekozen ontmantelingsvolgorde. Tegelijk verschilt de verwerkingscapaciteit sterk per component- en materiaalstroom: sommige stromen kunnen na aankomst relatief snel worden doorgezet, terwijl andere eerst moeten worden geïnspecteerd, getest, gesorteerd of voorbewerkt voordat een circulaire route kan worden gekozen. Naarmate de aanvoerpiek groter is of de verwerkingsnelheid lager ligt, neemt de behoefte aan tijdelijke opslag toe. De opslagfunctie van een circulariteitshub is daarmee niet alleen een ruimtelijke voorziening, maar vooral een buffer tussen een onregelmatige maritieme aanvoer en een meer continue verwerking aan land.

Vanuit logistiek en kostenperspectief is het wenselijk de opslaglocatie zo dicht mogelijk bij de offshore wind terminal te situeren. Offshore windturbineonderdelen zijn uitzonderlijk groot, zwaar en moeilijk te manoeuvreren, waardoor intern transport duur en risicovol is. Dit geldt met

name voor rotorbladen (80–100 meter), toresegmenten (120–450 ton) en nacelles (68–450 ton). Elke extra verplaatsing vraagt inzet van zwaar materieel zoals Self-Propelled Modular Transporters (SPMT's) en verhoogt de kans op vertragingen of beschadiging.

Uit recent onderzoek van TKI en Haskoning (2025) blijkt dat de ruimte-indicaties voor commissioning in grote lijnen ook toepasbaar zijn op decommissioning. Op basis van dit onderzoek worden bandbreedtes gehanteerd voor een windpark van gemiddeld 1,5GW. Dit komt overeen met de grootte van Hollandse Kust Zuid (generatie 3). Voor de eerste twee generatie windparken die worden gedecommissioned zijn deze bandbreedtes omgerekend naar het aantal MW van deze windparken:

- 2 hectare voor windturbineonderdelen (20.000 m²) voor generatie '30 Amalia
- 10 hectare voor windturbineonderdelen (100.000 m²) voor generatie '40 Gemini
- 25 hectare voor windturbineonderdelen (250.000 m²) voor generatie '50 Hollandse Kust Zuid
- Draagkracht van circa 35–40 ton/m²
- Brede interne wegen voor SPMT-transport (Self-Propelled Modular Transporter-transport)
- Heavy lifting

Bovenstaande oppervlaktes geven een orde van grootte van de ruimte die in totaal nodig is als volledige materiaalstromen tijdelijk worden opgeslagen. De daadwerkelijke ruimtebehoefte wordt echter bepaald door de verblijftijd van materialen in de haven. Als componenten lang blijven liggen door beperkte verwerkings- en afvoercapaciteit, zijn bovengenoemde opslagruimtes nodig. Door de verwerkingscapaciteit en logistieke doorstroming te vergroten, kan de verblijftijd worden verkort en daarmee ook de benodigde ruimte aanzienlijk worden beperkt.

Naast voldoende ruimte bepaalt ook de fysieke infrastructuur de geschiktheid van een haven voor offshore decommissioning en de ontwikkeling van een circulariteitshub. Opslagterreinen moeten een zeer hoge draagkracht hebben, bij voorkeur tussen de 35 en 40 ton per vierkante meter, om de extreme massa van toresecties, nacelles en funderingsdelen veilig te kunnen dragen. De interne logistiek vraagt om brede, rechte en volledig SPMT-toegankelijke rijroutes, zodat componenten zonder obstructies tussen kade, opslag en voorbewerkingszones kunnen worden verplaatst. Daarnaast moet het terrein beschikken over adequate voorzieningen zoals brandstof- en energie-infrastructuur (waaronder walstroom), en moet er voldoende gekwalificeerd personeel beschikbaar zijn voor hijswerkzaamheden, inspecties, logistieke aansturing en veiligheidsprocedures. Alleen wanneer deze fysieke, organisatorische en operationele voorwaarden samenkomen, kan een haven functioneren als een robuust knooppunt in de keten van offshore decommissioning en hoogwaardige circulaire verwerking.

6.4 Sortering, voorbereiding en circulaire verwerking

In de voorgaande paragrafen zijn de randvoorwaarden voor ontvangst en opslag beschreven voor de componentstromen die vanuit zee bij een circulaire hub aankomen. Hoewel deze componenten verschillen in afmeting, massa en materiaaltype, gelden de eerste randvoorwaarden voor ontvangst, overslag en tijdelijke opslag in grote lijnen voor alle stromen: zij komen gelijktijdig aan, vragen zware haveninfrastructuur en vereisen voldoende ruimte en logistieke capaciteit.

In deze paragraaf verschuift de focus naar de vervolgstappen die nodig zijn voor circulaire verwerking: van voorsorteren en voorbereiden tot eindverwerking en afzet. Deze processen verschillen sterk per component en bijbehorende materiaalstroom. Daarom worden de verwerkingsroutes en randvoorwaarden in dit hoofdstuk op componentniveau uitgewerkt.

De analyse richt zich op vier hoofdcomponentgroepen:

- torens (staal)
- nacelles (gemengde materialen, inclusief kritieke grondstoffen)
- rotorbladen (composiet)
- kabels (koper en aluminium)

Voor elk van deze componenten worden de meest waarschijnlijke circulaire strategieën beschreven, evenals de implicaties voor ontwerp, ruimte, uitrusting en logistiek binnen een circulaire hub. De analyse volgt daarbij de logica uit hoofdstuk 3: verwerking op componentniveau heeft de voorkeur, maar wanneer hergebruik of repurpose niet haalbaar is, verschuift de verwerking naar materiaalniveau en uiteindelijk naar recycling. Waar relevant wordt onderscheid gemaakt in formaten en massa's tussen de drie generaties windparken, zoals uitgelegd in de inleiding van dit hoofdstuk.

6.4.1 Torens (staal)

Voor alle staalcomponenten, inclusief torens en funderingsdelen, is recycling de verwachte en meest realistische circulaire route. Hergebruik of repurpose is technisch nauwelijks haalbaar vanwege vermoeiingsbelasting, projectspecifieke geometrie en certificeringseisen.

Tegelijkertijd vertegenwoordigen torens een uitzonderlijk hoogwaardige schrootstroom waar grote markt- en afzetvraag voor bestaat.

Toren specificaties op basis van generatie windturbines

- De afmetingen van de gehele toren is afhankelijk van de generatie;
 - 69 meter (generatie '30, Amalia)
 - 90meter (generatie '40, Gemini)
 - 128 meter (generatie '50, Hollandse Kust Zuid)
- Uitgaande van drie torendelen die na decommissioning worden afgeleverd op de kade zijn de afmetingen van de seperate delen afhankelijk van de generatie;
 - 20 meter lang x 4-4,2meter diameter (generatie '30, Amalia)
 - 30 meter lang x 5-5,5 meter diameter (generatie '40, Gemini)
 - 46,7 meter x 6,5-8 meter (generatie '50 Hollandse Kust Zuid)

- De massa van de gehele toren is afhankelijk van de generatie;
 - ~120 ton (generatie '30, Amalia)
 - ~235 ton (generatie '40, Gemini)
 - ~400 ton (generatie '50, Hollandse Kust Zuid)
- De massa van de torensegmenten (uitgaande van drie delen) is afhankelijk van de generatie;
 - ~40 ton per segment (generatie '30, Amalia)
 - ~78 ton per segment (generatie '40, Gemini)
 - ~133 ton per segment (generatie '50, Hollandse Kust Zuid)

Sortering en voorbereiding

- Segmenteren en snijden van torens en funderingen: staalschroot moet in stukken van 0,5 × 0,5 × 1,5 m worden aan staalproducenten. Dit is mogelijk met hydraulische guillotinescharen, stationaire pers-scharen, thermisch snijders of watersnijders.
- Reinigen van offshore staal (zoutbelasting)
- Verwijderen van coatings, boutverbindingen en niet-ferrometalen
- SPMT en hijs-infrastructuur voor verplaatsing van torensegmenten
- Korte logistieke lijnen tussen kade en snij-/schrootzones.

Uitgaande van 25 windturbines per maand die na decommissioning moeten worden verwerkt, is de massa van staal dat moet worden verwerkt per maand:

- 3.000 ton (generatie '30, Amalia)
- 5.875 ton (generatie '40, Gemini)
- 10.000 ton (generatie '50, Hollandse Kust Zuid)

Circulaire verwerking en afzet

De afzetmarkt voor secundair staal is breed en stabiel. De groeiende vraag naar “groen staal” en CO₂-reductie in de staalproductie versterkt de waarde van hoogwaardig schroot. Gerecycled staal gaat vrijwel direct naar staalproducenten in Nederland, Europese of daarbuiten en wordt opnieuw ingezet in bouw, industrie of energie. De hub moet vooral piekstromen bufferen en snelle doorzet mogelijk maken.

6.4.2. Nacelles (gemengde materialen, incl. kritieke grondstoffen)

Binnen een nacelle zitten componenten die hergebruikt kunnen worden (gearboxes, generatoren, transformatoren, lagers, yaw-systemen). Daarom is de eerste circulaire strategie re-use/refurbish van subsystemen (componentniveau). Voor de behuizing van de nacelle bestaan repurposing concepten. Recycling van koper, staal, aluminium en composiet is in principe de laatste circulaire strategie.

Nacelle-massa specificaties op basis van generatie windturbines

- ~70 ton (generatie '30, Amalia)
- ~125 ton (generatie '40, Gemini)
- ~425 ton (generatie '50, Hollandse Kust Zuid)

Sortering en voorbereiding

- Olie-afvoer en vloeistofscheiding.
- Demontage van hoogspanningscomponenten.
- Extractie van neodymium-magneten uit generatoren (CRM-keten).
- Sortering van stromen: staal / non-ferro / composiet / elektronica.
- Heavy-lift faciliteiten (≥800 ton).
- Bovenloopkranen in demontagehallen.
- Afgeschermd zones voor elektronica en kritieke materialen.

Benodigde verwerkingscapaciteit

Uitgaande van 25 windturbines in de maand die na decommissioning moeten worden verwerkt, is de massa van de nacelle dat moet worden verwerkt per maand:

- 1.750 ton (generatie '30, Amalia)
- 3.125 ton (generatie '40, Gemini)
- 10.625 ton (generatie '50, Hollandse Kust Zuid)

Circulaire verwerking en afzet

De afzet van nacelle-componenten verschilt per circulaire strategie. Re-use van turbinecomponenten staat voor offshore turbines nog in de kinderschoenen, maar zal naar verwachting, net als onshore, vragen om tijdelijke opslag totdat componenten individueel kunnen worden afgezet op een internationale markt. Voor repurposing geldt hetzelfde: toepassingen zijn vaak projectspecifiek en vraaggestuurd, waardoor flexibiliteit en opslagcapaciteit nodig zijn.

Voor recycling is vooral een goede logistieke aansluiting op bestaande verwerkingsketens van belang. Metalen zoals staal, koper en aluminium kunnen relatief snel worden afgezet richting Europese smelters en raffinaderijen. Voor permanente magneten geldt dat er binnen Europa nog geen volwassen end-of-life markt is, waardoor hoogwaardige verwerking nog beperkt is. Overigens geldt voor deze materiaalstroom dat deze pas op langere termijn in relevante volumes beschikbaar komt. Dit betekent dat specifieke verwerkingsfuncties hiervoor niet direct op grote schaal hoeven te worden ontwikkeld, maar gefaseerd kunnen worden toegevoegd.

6.4.3. Windturbinebladen (composiet)

Windturbinebladen vormen een van de meest complexe en ruimte-intensieve componentstromen binnen offshore decommissioning. De circulaire strategie voor bladen volgt een duidelijke voorkeursvolgorde. Repurpose is steeds de eerste optie, omdat bladen dankzij hun lengte, sterkte en vorm kunnen worden ingezet in nieuwe constructieve toepassingen, zoals bruggen, geluidsschermen, shelters en architectonische elementen. Door bladen op deze manier een tweede leven te geven blijft de structurele waarde behouden en wordt voorkomen dat het materiaal een energie-intensief recyclingproces moet ondergaan.

Bladlengte specificaties op basis van generatie windturbines

- 40 meter bladen (generatie '30, Amalia)
- 63 meter bladen (generatie '40, Gemini)

- 97 meter bladen (generatie '50, Hollandse Kust Zuid)

Bladmassa specificaties op basis van generatie windturbines

- ~6.5-15 ton bladen (generatie '30, Amalia)
- ~15-25 ton bladen (generatie '40, Gemini)
- ~25-55 ton bladen (generatie '50, Hollandse Kust Zuid)

Benodigde verwerkingscapaciteit

Uitgaande van 25 windturbines in de maand die na decommissioning moeten worden verwerkt:

- 75 bladen van 40 meter (generatie '30, Amalia)
- 75 bladen van 63 meter (generatie '40, Gemini)
- 75 bladen van 97 meter (generatie '50, Hollandse Kust Zuid)

Dat komt neer op de volgende aanvoer van bladmassa per maand:

- ~450-1.125 ton per maand (generatie '30, Amalia)
- ~1.125-1.875 ton per maand (generatie '40, Gemini)
- ~1.875-4.125 ton per maand (generatie '50, Hollandse Kust Zuid)

Sortering en voorbereiding

Repurpose is de voorkeursroute vanuit circulair perspectief. Er bestaan toepassingen waarbij complete bladen direct worden ingezet, bijvoorbeeld als geluidswallen of dragende constructies. Het voordeel hiervan is dat nauwelijks voorbereiding nodig is en de structurele waarde maximaal behouden blijft. Belangrijke randvoorwaarde is dat het blad tijdens transport en opslag niet beschadigt. Dit vraagt om zorgvuldige handling, ondersteuningsconstructies en logistieke routes die geschikt zijn voor zeer lange objecten.

Voor opslag en eventuele lichte voorbereiding is een grote, overdekte loods nodig (circa 50 × 100 meter en 5-8 meter hoog), voorzien van een bovenloopkraan voor veilige handling.

Daarnaast zijn inspectiefaciliteiten nodig om de constructieve kwaliteit van bladen te beoordelen en waar nodig reparaties of aanpassingen uit te voeren.

Voor de meeste toepassingen moeten bladen worden verkleind. Dit kan met technieken zoals zagen, knippen en shredden. Deze bewerkingen moeten plaatsvinden in een afgedekte loods of tent vanwege vrijkomend epoxy- en harsstof. Watersnijden vormt hierop een uitzondering: hierbij komt geen stof vrij, maar is wel opvang en behandeling van afvalwater noodzakelijk. Alle bewerkingen vereisen passende milieuvergunningen.

De mate van verkleining verschilt sterk per toepassing: van complete bladen bij directe repurpose, tot segmenten van enkele meters voor constructieve toepassingen, en tot fracties van tientallen centimeters of kleiner voor thermische recycling. Hoe kleiner het materiaal moet worden gemaakt, hoe intensiever en tijdrovender het proces, en hoe groter de benodigde opslagcapaciteit voor buffering tussen bewerkingsstappen.

Circulaire verwerking en afzet

De afzetmarkt verschilt per verwerkingsroute. Repurpose bevindt zich nog in een ontwikkelfase en is sterk projectgedreven, waardoor tijdelijke opslag en flexibiliteit nodig zijn om vraag en

aanbod te matchen. Daarbij kan het voordelig zijn om te zoeken naar lokale infrastructurele toepassingen, zodat transportafstanden en complexe logistiek worden beperkt.

Mechanisch verkleind composiet kan worden toegepast in nieuwe materialen, maar deze markt is nog beperkt opgeschaald. De huidige verwerkingscapaciteit ligt rond de 3.000 ton per jaar per installatie. Thermische recycling is in ontwikkeling; pyrolyse-installaties hebben technisch een capaciteit van circa 1.500 tot 2.000 ton per jaar. Er is nog geen volwassen markt voor hergebruikte vezels, maar het vrijkomende syngas kan worden benut door industriële afnemers. Co-processing in de cementindustrie is een volwassen en robuuste verwerkingsroute, al bevindt de dichtstbijzijnde afzetmarkt zich momenteel in Duitsland.

6.4.4 Kabels (koper/aluminium)

Kabels vormen binnen offshore decommissioning een afzonderlijke en waardevolle materiaalstroom. In tegenstelling tot componenten zoals bladen of nacelles is hergebruik op componentniveau vrijwel niet haalbaar, waardoor de verwerking direct verschuift naar materiaalniveau. De dominante circulaire strategie is daarom hoogwaardige recycling, met name gericht op koper en aluminium. Beide metalen zijn schaars, economisch waardevol en essentieel voor de energietransitie.

Kabelstromen bestaan uit inter-array- en exportkabels en variëren sterk in diameter, opbouw en massa. Ze worden doorgaans in gesegmenteerde lengtes aangevoerd en bevatten een combinatie van metalen, kunststoffen en in sommige gevallen oliehoudende componenten. Hoewel het totale volume kleiner is dan staalstromen, vertegenwoordigen kabels een hoge economische waarde per ton.

Sortering en voorbereiding

Vorbewerking is gericht op het scheiden en zuiveren van materiaalstromen. Offshore kabels zijn vaak vervuild met zout, coatings en organische resten en bestaan uit meerdere lagen. Het proces start met het verwijderen van isolatie- en mantellagen, gevolgd door technieken zoals strippen, shredden en granulatie om koper en aluminium vrij te maken. Bij geïntegreerde systemen, zoals generatorwikkelingen of transformatoronderdelen, is aanvullende demontage nodig, inclusief gecontroleerde afvoer van olie en koelvloeistoffen. Deze stappen zijn arbeids- en techniekintensief, maar verhogen de zuiverheid en daarmee de economische waarde van de metaalfracties aanzienlijk.

Voor kabelverwerking is relatief beperkte ruimte nodig, doorgaans circa 1 tot 2 hectare. De inrichting vraagt wel om gescheiden opslagzones voor verschillende kabeltypen, met name voor oliege vulde kabels vanwege veiligheids- en milieueisen. Daarnaast is zware handlingcapaciteit nodig voor het verplaatsen van grote haspels of bundels, evenals gespecialiseerde installaties zoals kabelsnijmachines, granulatoren en scheidingsinstallaties. Omdat offshore kabels vaak verzadigd zijn met zout en sediment, zijn ook reinigingsfaciliteiten nodig om corrosie en verontreiniging te verwijderen vóór verdere verwerking.

Circulaire verwerking en afzet

Na voorbereiding kunnen de gescheiden materiaalstromen direct worden afgezet in bestaande markten. Secundair koper heeft een sterke en structurele vraag vanuit de productie van kabels, elektromotoren, transformatoren en laadinfrastructuur. De groei van elektrificatie versterkt deze vraag en maakt hoogwaardige recycling economisch aantrekkelijk. Secundair aluminium vindt brede toepassing in onder meer bouw, automotive en elektrotechniek, al is de kans op een gesloten keten binnen de windsector kleiner. Kunststofmantels worden afhankelijk van samenstelling en vervuiling mechanisch gerecycled of energetisch verwerkt.

6.5 Conclusie

Dit hoofdstuk heeft inzichtelijk gemaakt welke randvoorwaarden en processtappen bepalend zijn voor het functioneren van een centraal georganiseerde circulariteitshub voor ontmantelde offshore windturbines. Door het volledige traject te volgen van voorbereiding en decommissioning tot en met ontvangst, opslag, sortering, voorbereiding en circulaire verwerking, wordt duidelijk dat de effectiviteit van een hub niet wordt bepaald door één afzonderlijke schakel, maar door de samenhang tussen alle processtappen.

Staal, composieten, elektrische componenten en kritieke grondstoffen kennen elk hun eigen technische, ruimtelijke en organisatorische vereisten. Dit impliceert dat een circulariteitshub niet als één uniforme verwerkingslocatie kan worden ontworpen, maar als een modulair systeem waarin verschillende verwerkingsroutes naast elkaar kunnen bestaan en in de tijd kunnen opschalen. De minimale basis van iedere hub is het kunnen ontvangen, lossen en tijdelijk opslaan van offshore turbinecomponenten. Deze functie is essentieel om piekstromen vanuit decommissioning op te vangen en vormt daarmee de logistieke ruggengraat van het systeem.

Samenvattend laat dit hoofdstuk zien dat een effectieve circulariteitshub voor offshore wind alleen kan functioneren wanneer ontwerp, logistiek en verwerking integraal worden benaderd en expliciet worden afgestemd op de verwachte generaties windparken. De hier geformuleerde randvoorwaarden leggen de basis voor verdere uitwerking van locatiekeuzes, ruimtelijke ontwerpen en organisatorische modellen in de vervolgstappen van dit onderzoek.

An aerial photograph of a large white wind turbine in a field. The turbine is the central focus, with its three blades extending outwards. In the background, several other wind turbines are visible, scattered across a flat landscape. The sky is a clear, light blue with some light clouds. The overall image has a blue tint. A white outline of a person's head and shoulder is visible on the right side of the image.

7. CONCLUSIE EN DISCUSSIE

7. Conclusie en discussie

7.1 Conclusie

Dit onderzoek laat zien dat de ontwikkeling van een circulariteitshub voor offshore windturbines in sterke mate wordt bepaald door logistieke en ruimtelijke randvoorwaarden in het havengebied, in combinatie met de beschikbare verwerkingscapaciteit voor componenten en materialen. De realisatie vraagt om gerichte coördinatie, beleidsmatige sturing en investeringszekerheid, waarbij aansluiting op bestaande industrie en infrastructuur een logische en noodzakelijke basis vormt.

Een circulariteitshub voor offshore windturbines kan alleen functioneren wanneer zij direct is verbonden met een offshore wind terminal met zware kadecapaciteit, voldoende waterdiepte en grootschalige lay-downruimte. Het ontvangen van componenten in campagnes vereist havens die piekstromen aankunnen, evenals verwerkers die in staat zijn om korte doorlooptijden te realiseren en daarmee verblijftijden en ruimtebeslag te beperken. Binnen deze stromen vormt staal verreweg de grootste en meest robuuste materiaalstroom, met een goed ontwikkelde afzetmarkt en bestaande industriële verwerkingscapaciteit. Dit maakt staalverwerking een logische ruggengraat voor de hub.

Tegelijkertijd laat de analyse zien dat hogere R-strategieën, zoals re-use en repurpose van offshore componenten, belangrijke kansen bieden om zowel de economische waarde als de duurzaamheid van de keten te vergroten. Deze markten bevinden zich echter nog in een vroege ontwikkelfase en vragen om aanvullende coördinatie, standaardisatie en vraagontwikkeling om op schaal toepasbaar te worden. Voor composieten en kritieke grondstoffen geldt dat hoogwaardige verwerking technisch mogelijk is, maar dat markten en verwerkingscapaciteit in Nederland en Europa nog onvoldoende ontwikkeld zijn. Voor kritieke grondstoffen geldt dat deze voornamelijk in latere fases vrijkomen, waardoor Nederland zich op korte termijn vooral richt op logistiek en voorbereiding, en pas op langere termijn op grootschalige verwerking.

Uit de blauwdruk volgt daarmee dat een circulariteitshub geen statische eindoplossing is, maar een ontwikkelpad kent. Niet elke locatie hoeft direct alle functies te vervullen. Een gefaseerde ontwikkeling van logistiek knooppunt naar een (gedeeltelijk) geïntegreerd verwerkingscluster ligt voor de hand en sluit aan bij de verwachte groei in decommissioningvolumes. De economische meerwaarde neemt toe naarmate functies zoals segmentatie, materiaalscheiding en voorbereiding worden geïntegreerd, doordat dit leidt tot minder transportbewegingen, lagere operationele kosten en betere benutting van materiaalstromen.

De potentie van een circulariteitshub wordt groter wanneer deze niet alleen gericht is op Nederlandse offshore windparken, maar ook volumes aantrekt uit onshore windturbines en offshore markten in het Noordzeegebied. Dit is nodig om voldoende schaal en een stabiele aanvoer te realiseren, met name in de periode tussen circa 2038 en 2050, waarin Nederlandse offshore volumes tijdelijk lager zijn.

Door materiaalstromen te bundelen ontstaat een constantere benutting van capaciteit, wat investeringen in verwerkingsinstallaties rendabeler maakt. Tegelijk is deze schaal nodig om nieuwe circulaire markten te ontwikkelen, bijvoorbeeld voor composieten en kritieke grondstoffen.

Deze inzichten onderstrepen dat de circulariteitshub primair een systeemfunctie vervult: het verbinden van ontmanteling, logistiek en verwerking tot een efficiënte en schaalbare keten. Wanneer aan de randvoorwaarden wordt voldaan en actief wordt ingezet op samenwerking en ketenregie, ontstaat de basis om circulaire verwerkingsroutes daadwerkelijk op te schalen, kosten in de keten structureel te verlagen en waardevolle materialen zo veel mogelijk binnen Nederland en Europa te behouden.

7.2 Discussie

Dit onderzoek laat zien dat de ontwikkeling van een circulariteitshub voor offshore windturbines kansrijk is, maar dat de daadwerkelijke haalbaarheid sterk afhankelijk is van een aantal aannames, keuzes in de keten en de mate waarin bestaande infrastructuur kan worden benut. In deze discussie worden de resultaten verdiept en in perspectief geplaatst.

Aannames en punten van aandacht

De uitkomsten van dit onderzoek zijn gebaseerd op een aantal belangrijke aannames die bepalend zijn voor de conclusies:

- **Voldoende en gebundelde volumes**

Er wordt verondersteld dat toekomstige materiaalstromen voldoende groot en geconcentreerd zijn om schaalvoordelen te realiseren. In de praktijk zijn deze volumes echter onzeker in zowel timing als spreiding. De analyse laat zien dat materiaalstromen niet gelijkmatig vrijkomen, maar worden gekenmerkt door pieken en tussenliggende dips, met name in de periode 2038–2050 voor Nederlandse offshore windparken. Daarnaast zijn volumes afhankelijk van keuzes rond levensduurverlenging, repowering en de fasering van decommissioning.

- **Wijze van decommissioning**

Het onderzoek gaat uit van een ontmantelingsaanpak waarbij componenten per turbine worden verwijderd en gezamenlijk naar land worden gebracht. In de praktijk kunnen variaties optreden, bijvoorbeeld in de wijze waarop rotorbladen worden verwijderd en vervoerd. Dit beïnvloedt direct de logistiek, piekvolumes en inrichting van de hub.

- **Lineaire materiaalintensiteit**

Voor de vertaling van vermogen (MW) naar materiaalstromen is uitgegaan van kengetallen. In werkelijkheid verandert de materiaalintensiteit per MW bij grotere turbines, bijvoorbeeld door schaalvoordelen in ontwerp en andere materiaalkeuzes.

- **Materiaalsamenstelling (met name onshore)**

Voor aanvullende markten, zoals onshore wind, is gewerkt met generieke aannames voor materiaalsamenstelling, terwijl deze in de praktijk sterk variëren per type turbine en generatie.

- **Bereidheid tot ketencoördinatie**

Het onderzoek veronderstelt dat asset owners, havens en verwerkers bereid zijn om samen te werken en materiaalstromen te bundelen. Deze coördinatie is momenteel nog beperkt aanwezig en vormt een cruciale randvoorwaarde.

- **Beleidsmatige ondersteuning**

Er wordt impliciet aangenomen dat beleid circulariteit stimuleert en lineaire verwerking minder aantrekkelijk maakt. Zonder dergelijke prikkels blijft de businesscase voor hoogwaardige verwerking onzeker.

- **Ontwikkeling van verwerkingsmarkten**

De businesscase veronderstelt dat markten voor circulaire producten en secundaire grondstoffen zich verder ontwikkelen, met name voor composieten en kritieke grondstoffen. Deze markten bevinden zich momenteel nog in een vroege fase.

- **Rol van Nederland in internationale ketens**

Voor bepaalde materiaalstromen wordt aangenomen dat Nederland vooral een logistieke en voorbereidende rol vervult, en niet per se volledige verwerking binnen de landsgrenzen realiseert.

Deze aannames zijn plausibel, maar brengen onzekerheden met zich mee die direct van invloed zijn op de uiteindelijke haalbaarheid en positionering van een hub.

Betrouwbaarheid en validiteit

De analyse is gebaseerd op een combinatie van literatuur, bestaande studies en marktconsultaties, wat zorgt voor een solide kwalitatieve onderbouwing. Tegelijkertijd zijn bepaalde kwantitatieve uitkomsten indicatief. Met name kostenramingen, materiaalwaarden en toekomstige volumes kennen een aanzienlijke bandbreedte.

Daarnaast is de sector nog in ontwikkeling, met beperkte praktijkervaring in grootschalige offshore decommissioning. Hierdoor zijn sommige inzichten gebaseerd op aannames of extrapolaties vanuit onshore praktijken en internationale studies. De werkelijke prestaties van logistieke ketens, verwerkingsroutes en markten zullen zich in de komende jaren moeten bewijzen.

Afbakening en context van het onderzoek

De resultaten van dit onderzoek zijn tot stand gekomen binnen een duidelijk afgebakend kader:

- **Onzekerheid in timing en volumes**

De exacte momenten waarop materiaalstromen vrijkomen zijn afhankelijk van marktontwikkelingen en strategische keuzes van asset owners. In dit onderzoek is alleen gekeken naar materiaalstromen uit operationele windturbines.

- **Beperkte uitwerking per materiaalstroom**

Hoewel de belangrijkste materiaalstromen zijn geanalyseerd, ontbreekt op onderdelen nog diepgang, met name voor kabels, funderingen en secundair staal.

- **Beperkte economische detaillering**

De kosten-batenanalyse geeft richting, maar geen volledig uitgewerkte businesscases per hubconfiguratie of locatie.

- **Geen locatiespecifieke toetsing**

De blauwdruk beschrijft randvoorwaarden, maar is niet concreet getoetst op specifieke potentiële hublocaties.

Vergelijking met bestaande inzichten

De bevindingen sluiten aan bij bredere literatuur en beleidsontwikkelingen rondom circulariteit en kritieke grondstoffen. Net als in andere studies blijkt dat schaal, ketencoördinatie en marktforming cruciale randvoorwaarden zijn voor circulaire businesscases. Ook de constatering dat hoogwaardige circulaire strategieën in de praktijk achterblijven bij recycling komt overeen met bestaande marktanalyses.

De toegevoegde waarde van dit onderzoek ligt met name in de nadruk op logistiek en haveninfrastructuur als sleutel tot systeemverandering. Waar veel studies focussen op technologie of materiaalinnovatie, laat dit onderzoek zien dat juist de organisatie van stromen, locaties en operaties bepalend is voor de haalbaarheid van circulaire verwerking.

Strategische implicaties voor hubontwikkeling

De resultaten van dit onderzoek impliceren dat de ontwikkeling van een circulariteitshub sterk samenhangt met de mate waarin kan worden aangesloten op bestaande industrie en infrastructuur. Hoewel dit duidelijke voordelen biedt in termen van kosten, doorlooptijd en schaal, is het in de praktijk onzeker in hoeverre bestaande clusters volledig aansluiten op de specifieke eisen van offshore decommissioning, zoals extreme componentafmetingen, piekvolumes en gespecialiseerde bewerking van composieten en kritieke grondstoffen.

Daarnaast blijkt uit de analyse dat de ontwikkeling van hubfuncties waarschijnlijk gefaseerd zal verlopen. In hoeverre deze fasering daadwerkelijk leidt tot kostenreductie en efficiëntieverbetering is afhankelijk van het tempo waarin volumes beschikbaar komen en de mate waarin materiaalstromen structureel kunnen worden gebundeld. Bij lage of gefragmenteerde volumes bestaat het risico dat investeringen in gespecialiseerde verwerkingscapaciteit onvoldoende worden benut. Het aantrekken van materiaalstromen uit onshore turbines, offshore turbines van andere Noordzeelanden of materiaalstromen uit andere sectoren (bijvoorbeeld composiet uit schepen en luchtvaart) kan dit risico beperken.

Een vergelijkbare onzekerheid geldt voor de toepassing van hogere R-strategieën. Hoewel deze strategieën potentieel meer waarde behouden dan recycling, is de marktvraag nog beperkt en sterk projectgedreven. Dit maakt het onzeker of en wanneer deze routes op schaal kunnen bijdragen aan de businesscase van een hub. Zonder aanvullende coördinatie, standaardisatie en vraagontwikkeling blijft recycling in veel gevallen de dominante route.

Suggesties voor vervolgonderzoek

Om de resultaten verder te concretiseren en toepasbaar te maken voor besluitvorming, zijn de volgende vervolgstappen relevant:

- **Toetsing van potentiële hublocaties**
Voer een concrete vergelijking uit van Nederlandse havengebieden (zoals Rotterdam, Eemshaven, NZKG en Vlissingen) op basis van de geïdentificeerde randvoorwaarden.
- **Samenhang tussen decommissioning en hubinrichting**
Analyseer hoe keuzes in decommissioningoperaties doorwerken in de inrichting van de hub. Denk aan transportvormen, bundeling van componenten en materiaalstromen, piekvolumes en de afstand tussen windparken en hub.
- **Uitwerking van concreet beleidsadvies**
Vertaal de randvoorwaarden naar instrumenten zoals tendercriteria, subsidies en regelgeving die circulariteit en volumebundeling stimuleren.
- **Verdiepende analyse van specifieke materiaalstromen**
Werk de verwerkingsketens en businesscases verder uit voor kabels, funderingen en secundair staal, in samenwerking met OEM's en industriepartijen.
- **Businesscase per hubconfiguratie**
Analyseer verschillende ontwikkelpaden van de hub, van logistiek knooppunt tot geïntegreerd verwerkingscluster, inclusief investeringen, risico's en opbrengsten.
- **Internationale positionering**
Onderzoek de rol van Nederland binnen de Noordzee- en Europese keten, inclusief logistieke en industriële samenwerking.



8. REFERENTIES EN BIJLAGEN

8. Referenties en bijlagen

8.1 Referenties

- AF Gruppen. (2026). *Strategy for the decommissioning of concrete foundations for offshore wind* (white paper). AF Gruppen.
- BVG Associates. (2025). *Guide to an offshore wind farm: Update 2025* (BVGA-16464-Fixed-Guide-rF.pdf). BVG Associates.
- Copper Development Organisation. (2022). *Renewables; wind*. Retrieved from <https://copper.org/environment/sustainable-energy/renewables/>
- European Commission, Joint Research Centre. (2020). *Raw materials demand for wind and solar PV technologies in the transition towards a decarbonised energy system* (Report No. KJ-NA-30095-EN-N). Publications Office of the European Union.
- European Commission, Joint Research Centre. (2025). *Material requirements for wind turbines* (JRC139701). Publications Office of the European Union.
- Kaya, M. (2024). An overview of NdFeB magnets recycling technologies. *Current Opinion in Green and Sustainable Chemistry*, 46, 100884.
- Li et al. (2019). Direct reuse strategies of rare earth permanent magnets for PM electrical machines – an overview study. *European Physical Journal of Applied Physics*, 86, 20901.
- Li et al. (2022). Future material requirements for global sustainable offshore wind energy development. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 164, 112603.
- Lobregt et al. (2023). *Decommissioning of offshore wind farms: The nature-based business case of scour protection* (Final report). ECHT-Regie in Transitie / The Rich North Sea.
- Mancini et al. (2025) Offshore Wind Farm Decommissioning Cost Estimates. *TNO 2025 R11554*.
- Meng et al. (2025). *End-of-life management for wind turbines*. *Nature Reviews Clean Technology*, 1(10), 677-698.
- Ministerie van Economische Zaken. (2015). *Draft offshore wind site decisions Borssele I & II: Published for consultation* (consultatiedocument).
- Patrahau, I., van Geuns, L., Stoop, R., & Jeuken, J. (2025). *Kritieke grondstoffen in Noord-Holland en Flevoland: Op weg naar veerkrachtige toeleveringsketens* (HCSS-rapport). The Hague Centre for Strategic Studies.
- Roelofs, B. M. (2020). *Material recovery from Dutch wind energy: A dynamic material flow analysis on Dutch wind turbines towards 2050 including recycling approaches for recovery of key materials* (Master's thesis). Delft University of Technology & Leiden University.
- Rijksdienst voor Ondernemend Nederland (RVO). (2022). *Appendix A: Applicable law – Project and Site Description Hollandse Kust (west) Wind Farm Zone*.
- Rijksdienst voor Ondernemend Nederland (RVO). (2025). *Dutch Offshore Wind Innovation Guide 2026*.
- Rijksdienst voor Ondernemend Nederland (RVO). (2025). *Roadmap offshore wind energy 21 GW: Routekaart v29, June 2025* (PDF). Rijksdienst voor Ondernemend Nederland.

- Royal Haskoning & TKI Offshore Energy. (2026). *Consequences of upscaling offshore wind for port infrastructure and logistics*. Topsector Energie.
- Strootman et al. (2022). *Ruimte voor circulaire windturbines: Ontwerpend onderzoek naar de ruimtelijke effecten van de circulaire verwerking en levensduurverlenging van windturbines*. Provincie Noord-Holland & Provincie Zuid-Holland.
- Taglieri, L., Fratocchi, L. (2025). Made in Europe Recovery of Rare Earth Elements: Is a Circular and Sustainable Value Chain Really Possible? *IFAC-PapersOnLine*, 59(10), p.1510-1515.
- Taherian-Fard, H et al. (2020). *Wind turbine drivetrain technologies*. *IEEE Transactions on Industry Applications*.
- Topham et al. (2019). *Challenges of decommissioning offshore wind farms: Overview of the European experience*. *IOP Conference Series: Journal of Physics: Conference Series*, 1222, 012035.
- Van der Meulen et al. (2020). *Offshore wind farm decommissioning: An orientation of possible economic activity in the South Holland region and the Rotterdam port area* (TNO-2020-R11329). TNO / Smartport.
- Van der Velden, L., Van Poll, M. (21 februari 2026). Europa's grootste raffinaderij voor zeldzame aardmetalen draait niet op volle kracht: 'Waarom zou ik?'. *Financieel Dagblad*, <https://archive.is/ThhRu>
- Solibakke, P., Kvadsheim, N.P. (2024) Material Intensity of Growing Wind Turbines. *Production Management Systems for Volatile, Uncertain, Complex, and Ambiguous Environments*. 728.
- WindEurope (5 augustus 2025). Permanent magnets – first steps towards more supply chain resilience. *WindEurope*, <https://windeurope.org/news/permanent-magnets-first-steps-towards-more-supply-chain-resilience/>.

8.2 Bijlagen

Bijlage A

Onderbouwing grondstoffen- en volume analyse

Huidige en geplande aantallen onshore en offshore Nederland

Op basis van data en informatie uit *WindStats* is een eigen dataset samengesteld met alle operationele onshore en offshore windparken in Nederland. Deze dataset bevat per windpark de naam, provincie, startdatum, het aantal turbines en het opgesteld vermogen in MW. Deze data is aangevuld met materiaalvolumes, berekend op basis van het opgesteld vermogen. Wanneer alle momenteel operationele turbines worden opgeteld, omvat dit in Nederland 2.584 onshore windturbines (7.153 MW) en 670 offshore windturbines (4.748 MW).

Land	Operationeel vermogen in MW (2026)
Nederland	4748
België	2262
Denemarken	2650
Duitsland	9048
Noorwegen	114
Verenigd Koninkrijk	16039

Tabel 1: Operationeel vermogen turbines Noordzeegebied

Huidige en geplande aantallen offshore Noordzeegebied

Voor de scope van het offshore Noordzeegebied is gebruikgemaakt van data afkomstig van *The Wind Power*. Voor de dataset van dit onderzoek zijn de volgende variabelen overgenomen: naam van het windpark, startdatum, status (goedgekeurd, gepland, in productie of ontmanteld), type turbine, aantal turbines en opgesteld vermogen. Het vermogen is omgerekend van kilowatt naar megawatt om consistentie te waarborgen bij de berekening van materiaalstromen op nationaal en internationaal niveau.

De technische levensduur van windturbines

Uit de literatuur blijkt dat de technische levensduur van windturbines gemiddeld tussen de 15 en 30 jaar ligt. Hierbij wordt geen onderscheid gemaakt tussen onshore en offshore windturbines. Van der Meulen, et al. (2020) gebruiken in een TNO-onderzoek bij berekeningen rondom het ontmantelen van windturbines een gemiddelde levensduur van 20-25 of 25-30 jaar. RVO geeft aan dat windturbines gemiddeld draaien tussen de 15 en 25 jaar.

De vergunningsduur van (offshore) windparken

De vergunningsduur voor windturbines verschilt voor onshore en offshore windturbines. Strootman et al. (2022) gaan in hun rapport 'Ruimte voor Circulaire Windturbines' uit van een

gemiddelde vergunningstijd van 25 jaar in Nederland, uitgaande van zowel offshore als onshore windturbines.

Voor offshore wind is de vergunningstermijn doorgaans langer. Op grond van de Wet windenergie op zee kan een vergunning worden verleend voor maximaal 40 jaar. In het Kavelbesluit Hollandse Kust (west) is onderbouwd dat windturbines technisch ongeveer 30 jaar meegaan en dat, inclusief voorbereiding, bouw en verwijdering (circa 5 jaar), een vergunningsduur van 35 jaar wordt aangenomen. Bestaande offshore windparken bevestigen dit beeld: Borssele heeft een vergunningsduur van 30 jaar (verlengd van 27 jaar) en Hollandse Kust 35 jaar, met de mogelijkheid tot verlenging richting 40 jaar. Hierdoor kan voor offshore windturbines in Nederland worden uitgegaan van een gemiddelde levensduur van 30–40 jaar.

Daarnaast is er een duidelijke trend zichtbaar dat de levensduur van windturbines toeneemt. Het ontwerp en de materiaalkeuze worden steeds meer afgestemd op de vergunningsduur, waardoor deze duur in toenemende mate de gegarandeerde levensduur van turbines en essentiële onderdelen bepaalt (Strootman et al., 2022). Om aan te sluiten bij deze ontwikkeling wordt in dit onderzoek gerekend met de bovengrens van de gebruikelijke vergunningsduur als representatief tijdsbestek voor ontmanteling.

Omdat de levens- en vergunningsduur voor windturbines op land en op zee structureel verschilt, wordt in dit onderzoek onderscheid gemaakt tussen onshore en offshore windturbines voor het bepalen van tijdsbestek tot ontmanteling. Voor onshore windturbines wordt uitgegaan van een tijdsbestek in Nederland van gemiddeld 25 jaar, terwijl voor offshore windturbines wordt gerekend op gemiddeld 35 jaar tot ontmanteling.

Materiaalintensiteit windturbines

De exacte materiaalcompositie van windturbines verschilt per fabrikant, type turbine en installatiejaar. Om een beeld te krijgen van de te verwachten materiaalstromen van windturbines in en om Nederland zal daarom moeten worden gewerkt kengetallen.

Deze kengetallen worden overgenomen van het rapport *Material Requirements for Wind Turbines* van het Joint Research Centre (JRC) van de Europese Commissie (2024). In dit rapport wordt de materiaalintensiteit van windturbines uitgedrukt in massa per eenheid opgesteld vermogen (kg/MW), uitgesplitst naar verschillende turbintypen en generatorconfiguraties. Deze benadering maakt het mogelijk om materiaalvolumes systematisch te koppelen aan het geïnstalleerde vermogen van windparken in Nederland en het Noordzeegebied.

Onderstaande tabel geeft de materiaalintensiteiten voor de meest voorkomende en belangrijkste materialen in moderne windturbines weer.

Material	Range	Type C GB-DFIG	Type D-EE DD-EESG	Type D-PM DD-PMSG	Type E E-PMSG	Type F F-SCIG
Concrete	300 000 - 500 000	400 000 ± 100 000				
Steel	90 000 - 130 000	110 000 ± 20 000				
Aluminium (Al)	150 - 1 900	1 400 ± 500	150 - 500	550 ± 150	1 400 ± 500	1 600 ± 150
Chromium (Cr)	410 - 510	460 ± 50				
Copper (Cu)	650 - 6 200	800 - 1900	5 700 ± 500	2 200 - 4 600	900 ± 250	850 ± 150
Iron (cast)	16 000 - 22 000	19 000 ± 3 000				
Manganese (Mn)	650 - 950	800 ± 150				
Molybdenum (Mo)	90 - 110	100 ± 10				
Nickel (Ni)	370 - 490	430 ± 60				
Zinc (Zn)	5 150 - 5 750	5 450 ± 300				
Polymers	3 900 - 5 500	4 700 ± 800				
Glass/carbon composites	6 000 - 9 000	7 500 ± 1 500				
Boron (B)	0.2 - 7	0.5 ± 0.3		5 ± 2	0.8 - 1.8	0.3 - 1.2
Dysprosium (Dy)	1 - 21	2 ± 1		17 ± 4	4 ± 3	1 - 4.7
Neodymium (Nd)	6 - 210	12 ± 6		180 ± 30	50 ± 20	7 - 34
Praseodymium (Pr)	0 - 35	0		35	4	0
Terbium (Tb)	0 - 7	0		7	1	0

Tabel 2: Materiaalintensiteiten per turbinetype. Bron: JRC (2024)

Turbinetypes

In de tabel wordt onderscheid gemaakt op basis van variaties in generator- en aandrijflijntechnologie. De verschillende types die worden genoemd:

- Type C (GB-DFIG) maakt gebruik van een *gearbox* (GB), oftewel een tandwielkast, in combinatie met een traditionele generator (DFIG – *Doubly Fed Induction Generator*).
- Type D maakt gebruik van een *Direct Drive* (DD) systeem zonder tandwielkast. Energie kan worden opgewekt door middel van een *Electrically Excited* generator (Type D-EE) of door middel van Permanente Magneten (Type D-PM).
- Type E en Type F zijn hybride systemen waarbij een tandwielkast wordt gekoppeld aan een generator met Permanente Magneten (Type D-PM) of een *Squirrel Cage Induction Generator* (Type F – SCIG).

Zoals te herleiden is uit Tabel 2.1 heeft het type turbine grote invloed op de aanwezige hoeveelheid van een aantal materialen, met name op zware aardmetalen zoals dysprosium en neodymium. In de volumeanalyse is dan ook rekening gehouden met het type turbine waar mogelijk. Voor de gebouwde offshore windparken in de Noordzee zijn de types bekend. Voor onshore windparken was geen openbare data beschikbaar over het type turbine, waardoor in de analyse is uitgegaan van een standaardtype (type C).

Toepassing van materiaalintensiteiten in dit onderzoek

De totaalvolumes van materialen zijn berekend door de materiaalintensiteiten (uitgedrukt in kg/MW) uit de JRC-tabel om te rekenen naar ton/MW en deze vervolgens te vermenigvuldigen met het opgesteld vermogen in MW van de windparken.

Voor de volumeanalyse van alle onshore windparken in Nederland is uitgegaan van Type C windturbines; dit is het meest voorkomende type dat met name in het verleden en onshore in Europa geïnstalleerd is (Taherian-Fard, et al., 2020). Daarnaast is voor onshore windturbines uitgegaan van een betonnen fundering (Roelofs, 2020), die volledig wordt meegenomen in de materiaalstromen bij ontmanteling.

Voor de totaalvolumes van offshore turbines is een analyse gemaakt van de specifieke turbinemodellen en het bijbehorende type zoals geclassificeerd in tabel 2. Bij de analyse van de offshore turbines is beton buiten beschouwing gelaten aangezien dit niet gebruikt wordt in de typen fundering in het Noordzeegebied (Chirosca, et al., 2022).

Funderingen: onderscheid tussen onshore en offshore

In dit onderzoek wordt expliciet onderscheid gemaakt tussen funderingen van onshore en offshore windturbines, omdat zowel de materiaalopbouw als de ontmantelmethode sterk verschilt.

Voor onshore windturbines wordt de fundering volledig meegenomen in de materiaalstromen. Deze bestaat uit beton, vaak gecombineerd met wapeningsstaal, en wordt bij ontmanteling grotendeels of volledig verwijderd. De materiaalintensiteiten voor funderingen uit de JRC-studie worden daarom integraal toegepast op de onshore dataset. Hierbij wordt uitgegaan van ongeveer 100 t/MW staal voor de turbine zelf, en 10 t/MW staal voor de fundatie, op basis van input van experts.

Voor offshore windturbines geldt een andere situatie. In het Noordzeegebied worden voornamelijk monopiles van staal toegepast als fundering. Omdat grootschalige ontmanteling van offshore windparken historisch gezien nog niet heeft plaatsgevonden, is er onzekerheid over de mate waarin funderingen daadwerkelijk (volledig) worden verwijderd en als materiaalstroom beschikbaar komen. TNO gaat in het rapport *Offshore Wind Farm Decommissioning Cost Estimates (2026)* uit van een verwijderingspercentage van 71% van het staal uit de monopile. Van een monopile van 90 meter zou 64 meter verwijderd worden, en de monopile wordt daarbij tot 6 meter onder de zeebodem verwijderd. Voor de dataset van Bridge of Europe is uitgegaan van deze norm. In onderstaande tabel 4 staan monopilemassa van 1500 ton. Dit is omgerekend naar massa per MW en komt uit tot het kerngetal 100 ton aan staal per MW voor een monopile van een turbine.

Omdat deze norm nog een schatting is, wordt in de tabel onderscheid gemaakt tussen volledige verwijdering van monopile, gedeeltelijke verwijdering (71% van monopile), en geen verwijdering van monopile. Deze vergelijkingen zijn belangrijk voor de business case van circulaire verwerking van staal uit windturbines.

Foundations	Baseline	Scenario A	Scenario B	Unit	Comment
Type	TP-less Monopile	TP-less Monopile	TP-less Monopile	-	-
MP length	90	90	90	m	-
MP diameter	8.5	8.5	9.2	m	-
MP mass	1500	1500	2000	ton	-
MP penetration	32	32	32	m	-
Secondary steel mass	125	125	150	ton	-

Tabel 3: Materiaalintensiteiten per turbinetype (...). Bron: TNO (2026)

Verdieping kritieke grondstoffen

Critical Raw Materials, of kritieke grondstoffen, vormen een bijzondere stroom aan materialen die in dit rapport vanwege hun economische en strategische belang los beschouwd worden van andere grondstoffen, in het bijzonder wanneer het aankomt op verwerkingsmogelijkheden. Deze bijlage adresseert wat kritieke grondstoffen precies zijn, welke ervan in windturbines aangetroffen kunnen worden, en hoe de hoeveelheden zich verhouden tot Europese totaalstromen. Zo wordt in deze bijlage verduidelijkt wat de uitdagingen en randvoorwaarden voor verwerking van kritieke grondstoffen uit windturbines zijn.

Definitie kritieke grondstoffen

De term ‘kritieke grondstoffen’ kan gezien worden als een verzamelterm voor mineralen en metalen die van groot belang zijn voor de economie en waarvan tegelijkertijd de beschikbaarheid kwetsbaar is. Het gaat bij kritieke grondstoffen vaak niet om schaarste in fysieke zin maar om een combinatie van economische onmisbaarheid voor cruciale sectoren als defensie, digitale technologieën, en duurzame energietechnologieën, en een fragiele toeleveringsketen.

De Europese Commissie produceert periodiek een lijst van kritieke grondstoffen; de meest recente versie uit 2023 bevat 34 materialen. Welke materialen op deze lijst belanden wordt bepaald aan de hand van twee assen: die van Economic Importance (EI) en die van Supply Risk (SR). De as van EI meet hoe zwaar een materiaal weegt in de Europese economie, op basis van de sectoren die er gebruik van maken en de toegevoegde waarde van die sectoren. Sectoren zoals energie, defensie, halfgeleiders en de automobielandustrie wegen zwaar mee. Hoe meer cruciale eindtoepassingen een materiaal heeft, hoe hoger de EI-score. De as van SR meet hoe kwetsbaar de aanvoer is. De belangrijkste factoren zijn de geografische concentratie van winning en verwerking, de politieke stabiliteit van producerende landen, en de mogelijkheden voor substitutie en recycling.

Een hoge concentratie van productie van zeldzame aardmetalen in een enkel land, zoals China, verhoogt het leveringsrisico sterk. Goede recyclingmogelijkheden of beschikbare substituten verlagen het risico juist. Wanneer een materiaal op beide assen aan een drempelwaarde voldoet, wordt deze aangemerkt als kritieke grondstof. Er zijn echter enkele uitzonderingen waarbij materialen net onder de drempelwaarde op één van de factoren scoort, maar wel is opgenomen in de lijst van de Europese Commissie. Dit is een doelbewuste beleidsmatige keuze. Tabel 1 geeft alle CRM's weer; de oranje gemarkeerde grondstoffen kunnen worden aangetroffen in windturbines. De gemarkeerde grondstoffen komen in verschillende vormen voor in windturbines, dit wordt verderop in deze bijlage verder toegelicht.

Aluminium / Bauxite	Antimony	Arsenic	Baryte
Beryllium	Boron / Borates	Fluorspar	Phosphate rock
Phosphorus	Feldspar	Gallium	Germanium
Natural Graphite	Hafnium	Helium	REEs
Silicon metal	Cobalt	Coking coal	Copper*
Lithium	Magnesium	Manganese	Nickel*
Niobium	PGMs	Scandium	Strontium
Tantalum	Titanium	Vanadium	Bismuth
Tungsten			

Tabel 1. CRM's in windturbines

Critical Raw Materials Act

Niet alleen de definitie van kritieke grondstoffen wordt op Europees niveau bepaald, hetzelfde geldt voor het beleid op deze materialen. In 2024 werd de *Critical Raw Materials Act* in het leven geroepen. Deze wet stelt 4 doelstellingen voor alle CRM-waardeketens in 2030:

- Minimaal 10% van het EU-verbruik van strategische grondstoffen moet uit binnenlandse winning komen;
- Minimaal 40% moet binnenlands worden verwerkt;
- Minimaal 25% moet afkomstig zijn uit recycling;
- De EU mag voor geen enkele strategische grondstof voor meer dan 65% afhankelijk zijn van één enkel niet-EU-land.

De CRMA introduceert daarnaast het instrument van strategische projecten: mijnbouw-, verwerkings- en recyclinginitiatieven kunnen door de Commissie worden aangewezen als prioritair en daardoor sneller door vergunningsprocedures kunnen worden geleid. Ook verplicht de wet lidstaten tot het opzetten van monitoring van CRM-stromen en het aanleggen van strategische voorraden voor de meest kwetsbare materialen.

Strategische grondstoffen en zeldzame aardelementen

Voordat verduidelijkt wordt welke kritieke grondstoffen zich voornamelijk in windturbines bevinden is het van belang om twee sub-groepen onder de CRM uit te lichten: strategische grondstoffen en zeldzame aardmetalen.

Strategische grondstoffen zijn een selecte subgroep van de kritieke grondstoffen: materialen die specifiek essentieel zijn voor de groene en digitale transitie en voor defensietoepassingen, én waarvoor de leveringsrisico's het grootst zijn. De CRMA identificeert 17 strategische grondstoffen, waaronder lithium, kobalt, grafiet, mangaan en de zeldzame aardmetalen. Voor deze materialen gelden de doelstellingen van de CRMA het zwaarst, en op deze materialen richt het beleid voor strategische projecten en voorraden zich primair.

Het onderscheid is relevant voor dit rapport: niet alle CRM in windturbines verdienen dezelfde beleidsaandacht. Materialen als staal en composieten zijn weliswaar aanwezig in grote volumes, maar vallen buiten de CRM-definitie. Materialen als niobium en vanadium zijn kritiek maar niet strategisch. De zeldzame aardmetalen in permanente magneten zijn zowel kritiek als strategisch, en vormen daarmee de hoogste prioriteit voor circulaire verwerking. Door deze grondstoffen te identificeren en een goede circulaire verwerkingsroute te ontwikkelen kunnen we de materialen in onze economie houden en onze afhankelijkheid verkleinen.

Zeldzame aardmetalen (*Rare Earth Elements, REE*) worden vaak gezien als synoniem aan kritieke grondstoffen, maar dat is een misverstand. REE vormen slechts één subgroep binnen de bredere categorie CRM. Binnen REE is nog een subdivisie: lichte zeldzame aardmetalen (*Light REE, LREE*) en zware zeldzame aardmetalen (*Heavy REE, HREE*) worden op andere manieren gedolven en kennen andere leveringsrisico's.

Kritieke grondstoffen zijn dus een punt van aandacht op Europees schaalniveau. Daarnaast is het een brede verzamelterm voor uiteenlopende materialen van verschillend economisch en strategisch belang. In dit hoofdstuk wordt daarom onderscheid gemaakt tussen de belangrijkste bronnen van kritieke grondstoffen in windturbines. Per bron wordt verduidelijkt welke CRM aangetroffen kunnen worden en wat de economische of strategische relevantie is.

Permanente magneten

Het onderdeel met de hoogste CRM-concentratie en de grootste beleidsurgentie is de permanente magneet in de generator. Niet alle windturbines bevatten permanente magneten; turbines met een tandwielkast gebruiken vaak een conventionele generator zonder magneten. De trend in de industrie gaat echter duidelijk richting direct-drive en hybride generatoren, die wel permanente magneten bevatten. Offshore turbines maken hier vaker gebruik van dan onshore turbines, vanwege de wens naar hogere betrouwbaarheid en lagere onderhoudsbehoefte voor toepassing op zee.

De magneten in windturbinegeneratoren zijn vrijwel zonder uitzondering neodymium-ijzer-boor (NdFeB) magneten, de sterkste permanent-magnetische materialen die commercieel beschikbaar zijn. De volgende kritieke grondstoffen kunnen zich in deze magneten bevinden. Neodymium (Nd) is het hoofdbestanddeel van de magneetlegering en bepaalt grotendeels de magnetische sterkte. Het is een licht zeldzaam aardmetaal en valt onder de strategische grondstoffen in de CRMA.

Praseodymium (Pr) wordt vrijwel altijd samen met neodymium gewonnen en verwerkt, de twee elementen zijn chemisch moeilijk te scheiden en worden in de industrie vaak als gecombineerd oxide (NdPr) verhandeld. Ook praseodymium is een strategische grondstof binnen de CRMA en een licht zeldzaam aardmetaal.

Dysprosium (Dy) is een zwaar zeldzaam aardmetaal dat in kleinere hoeveelheden aan de magneetlegering wordt toegevoegd om de thermische stabiliteit te verbeteren; essentieel voor turbines die bij wisselende temperaturen en hoge belastingen opereren. Dysprosium is schaarser dan neodymium, heeft een hoger leveringsrisico en is daarmee de meest kritieke van de drie. De hoeveelheid per turbine is kleiner maar de geopolitieke kwetsbaarheid is groter. Terbium (Tb) vervult een vergelijkbare functie als dysprosium en wordt soms als gedeeltelijk substituut gebruikt. Ook terbium is een zwaar REE met een hoog leveringsrisico.

Boor (B) completeert de NdFeB-legering. Boor staat op de EU CRM-lijst maar heeft een lager strategisch profiel dan de REE-componenten.

Verwerking van permanente magneten

De terugwinning van REE begint bij specialistische demontage van de generator: magneten zijn sterk, vaak ingegoten of gecoat, en vereisen zorgvuldige demontage om de materiaalkwaliteit te borgen. Vroege keuzes in de decommissioningfase, bijvoorbeeld of magneten intact worden verwijderd, bepalen in hoge mate wat er downstream mogelijk is met de materialen.

De demontage van permanente magneten uit de generator omvat verwijdering van magneetmodules, demagnetisatie van de magneten, scheiding van staal- en kopercomponenten en sortering op magneetsoort. In deze voorbereiding liggen enkele uitdagingen (Li, et al., 2019). Ten eerste kan er sprake zijn van coatings, lijm, of andere contaminatie van de magneten door de manier waarop ze in turbines verwerkt zitten. Ten tweede is demagnetisatie ingewikkeld; dit gebeurt vaak via een thermisch proces waarbij temperaturen tot ongeveer 350 graden Celsius benodigd kunnen zijn. Ten derde zijn NdFeB magneten over het algemeen kwetsbaar en broos; het verwijderen van magneten uit turbines kan leiden tot schade aan de magneet.

Voor verdere verwerking zijn twee hoofdroutes beschikbaar: magnet-to-magnet recycling en hydrometallurgische scheiding. Bij magnet-to-magnet recycling (ook wel short-loop recycling genoemd) worden NdFeB-magnetten via waterstofgebaseerde processen direct omgezet naar nieuw magneetmateriaal (Kaya, 2024). Dit is de meest hoogwaardige verwerkingsroute omdat functionele eigenschappen grotendeels behouden blijven. Daarnaast vereist het minder energie dan hydrometallurgische scheiding. Nadelen zijn dat deze route afhankelijk is van zuiver invoermateriaal en dat de eindproducten vaak duurder zijn dan 'nieuwe' magneten van buiten de EU (Kaya, 2024).

Er zijn enkele voorbeelden van magnet-to-magnet recycling op industriële schaal, al bevinden deze voorbeelden zich grotendeels in een pilotfase. Geen van deze toonaangevende projecten bevinden zich volgens de European Magnetism Association binnen Nederland. Wel is het duidelijk dat er een groeiende afzetmarkt bestaat voor permanente magneten in Europa dankzij de opkomst van onder andere groene energievoorzieningen en elektrische voertuigen.

Bij hydrometallurgische scheiding worden magneten opgelost en gescheiden tot individuele zeldzame aardoxiden (Nd_2O_3 , Dy_2O_3 , etc.), wat technisch complexer is maar meer flexibiliteit biedt in zuiverheid en samenstelling. Deze vorm van verwerking wordt ook wel long-loop recycling genoemd. In tegenstelling tot short-loop recycling is deze verwerkingsroute minder afhankelijk van een zuivere invoer van materialen. Verder levert het producten van hoge zuiverheid op die voor een veelvoud aan nieuwe doeleinden ingezet kunnen worden.

Daar staat tegenover dat deze processen een hoog energie- en waterverbruik én grote afvalstromen met zich meebrengen. Hoewel Europa vanuit de traditionele mijnbouw en grondstoffenhandel veel ervaring en kennis heeft op het gebied van hydrometallurgie zijn er tot op heden slechts enkele voorbeelden van commerciële projecten op industriële schaal wat betreft het verwerken van permanente magneten.

Een belangrijke factor hierin is het feit dat er in Europa vrijwel geen verwerkingscapaciteit is voor de eindproducten van long-loop recycling én het feit dat er tot op heden weinig invoermateriaal beschikbaar is geweest.

Grootschalige industriële verwerkingscapaciteit van permanente magneten bevindt zich momenteel dus buiten Nederland voor beide verwerkingsstromen. De Nederlandse strategische kans ligt in positionering in de waardeketen als logistieke hub: ketenorganisatie, demontage-expertise en volumebundeling, gekoppeld aan Europese recycling- en raffinagepartners. Die volumebundeling is van groot belang; windturbines alleen leveren in de beginfase beperkte magneetstromen, en integratie met reststromen uit elektrische voertuigen, industriële motoren en elektronica is nodig voor voldoende schaal.

Gerecyclede REE en magneetlegeringen zijn inzetbaar in nieuwe windturbinegeneratoren, elektrische voertuigen, industriële motoren en defensietoepassingen. De verwachting is dat de CRMA op termijn de Europese vraag naar gerecyclede REE vergroot door bindende doelstellingen voor binnenlandse verwerkings- en recyclingcapaciteit. Momenteel wordt circulaire verwerking echter afgeremd door de beperkte technologische ontwikkeling voor short-loop recycling enerzijds, en het ontbreken van een Europese afzetmarkt voor gerecyclede REE-grondstoffen vanuit long-loop recycling anderzijds. Daarnaast kampen beide verwerkingsstromen nog met een tekort aan invoerstromen vanuit bijvoorbeeld windenergie of elektrische voertuigen.

De voornaamste knelpunten voor opschaling zijn de beperkte huidige volumes uit end-of-life offshore wind, de complexiteit en kosten van verwerkingstechnologieën, onzekerheid over toekomstige magneetsamenstelling, en de structurele afhankelijkheid van internationale raffinagecapaciteit wat grensoverschrijdende ketensamenwerking tot een noodzakelijke randvoorwaarde maakt.

Waarden van REE

De waarde van deze zeldzame aardmetalen wordt bepaald op internationale handelsmarkten op basis van oxideprijzen, er gelden geen algemene schrootprijzen. Onderstaande schattingen gelden voor individuele oxiden; de producten van long-loop recycling. Die liggen momenteel op respectievelijk €20,000 per ton, €5,500 per ton, en €65,000 per ton voor Neodymium, Dysprosium en Praseodymium, en Terbium. Voor Boor geldt dat de schrootwaarde wordt gebaseerd op de marktprijzen van boraten en ferro-boor; deze liggen voor pure varianten op ongeveer €500 per ton en zijn dus significant minder waard dan bovengenoemde REE, mede door de minder grote strategische waarde.

Generator en elektrische systemen

Buiten de permanente magneet bevatten de elektrische systemen van een windturbine aanzienlijke hoeveelheden koper en aluminium. Koper zit in de wikkelingen van de generator, de transformatoren en de bekabeling van de toren en het fundament. Aluminium wordt gebruikt in behuizingen, koelsystemen en een deel van de bekabeling.

Koper en nikkel staan op de EU CRM-lijst vanwege hun uitzonderlijk groot economisch belang, ook al scoren ze net onder de drempelwaarde voor leveringsrisico.

Nikkel is aanwezig in kleinere hoeveelheden in legeringen binnen de generator en de elektrische systemen. Het is zowel kritiek als strategisch binnen de CRMA.

Verwerking van generatoren en elektrische systemen

De terugwinning van koper en aluminium uit windturbines is technologisch het meest volwassen onderdeel van de circulaire verwerkingsketen. Beide materialen hebben een goed functionerende secundaire markt, zijn relatief eenvoudig te scheiden en leveren een directe commerciële opbrengst op. De businesscase voor terugwinning is daarmee fundamenteel anders dan voor REE: minder strategisch urgent, maar economisch aantrekkelijker en op kortere termijn realiseerbaar.

De voorbereiding omvat het strippen van bekabeling uit toren en fundament, demontage van transformatoren en generatorwikkelingen, scheiding van koper- en aluminiumstromen, en verwijdering van isolatiemateriaal en coatings. De kwaliteit en daarmee de opbrengstwaarde van het teruggewonnen materiaal wordt sterk bepaald door de mate van scheiding: gemengde metaalstromen leveren significant minder op dan zuivere fracties. Selectieve demontage loont hier dus direct commercieel.

Twee verwerkingsroutes zijn gangbaar. Bij direct omsmelten wordt gesorteerd schroot via conventionele smeltprocessen omgezet naar secundair koper of aluminium, geschikt voor industriële toepassingen. Bij raffinage tot kathodegraad materiaal wordt het teruggewonnen metaal verder gezuiverd tot een kwaliteit die ook inzetbaar is in hoogwaardige toepassingen zoals nieuwe generatorwikkelingen of elektrische voertuigen. De tweede route vereist meer verwerkingsstappen maar levert hogere marktwaarden en sluit beter aan bij de circulariteitsdoelstellingen van de CRMA.

Nikkel vraagt een aparte behandeling. De hoeveelheden per turbine zijn beperkt en nikkel is doorgaans aanwezig als legeringselement in staal en gietijzer, niet als zuivere fractie. Directe terugwinning van nikkel als zelfstandig materiaal is daardoor zelden economisch rendabel op turbine-niveau. De meest realistische route is hoogwaardig hergebruik van de nikkelstaallegering als geheel, waarbij de legeringseigenschappen behouden blijven en de stroom wordt aangeboden aan staalproducenten die hoogwaardige input vereisen.

De voornaamste knelpunten voor opschaling zijn de arbeidsintensiviteit van selectieve demontage, de logistieke kosten van het transport van bulkmateriaal vanuit offshore locaties, en de kwaliteitsdegradatie die optreedt wanneer metaalstromen worden gemengd tijdens ontzorging op zee. Vroege afspraken in de decommissioningfase over scheiding aan boord of op de kade zijn ook hier bepalend voor wat downstream mogelijk is.

Staallegeringen

De stalen toren van een windturbine bevat grote hoeveelheden constructiestaal, maar geen CRM in de gangbare betekenis. Wel worden aan hoogwaardig constructiestaal kleine hoeveelheden legeringselementen toegevoegd die op de CRM-lijst staan.

Zo wordt Niobium (Nb) in kleine concentraties (typisch minder dan 0,1%) toegevoegd aan constructiestaal om de sterkte en taaiheid te verbeteren zonder de massa te verhogen, essentieel voor de hoge mechanische belastingen in windturbinestructuren. Niobium is een strategische grondstof; meer dan 90% van de mondiale productie is afkomstig uit Brazilië, wat een geografische concentratie oplevert die vergelijkbaar is met de Chinese dominantie bij REE.

Verwerking van staallegeringen

Directe extractie van niobium of andere legeringselementen uit torenstaal is bij deze concentraties niet realistisch. De verwerkingsstrategie voor dit onderdeel is daarom hoogwaardig staalhergebruik als geheel: door de staalstroom zuiver te houden en aan te bieden aan staalproducenten die de legeringseigenschappen kunnen benutten, blijft de waarde van de aanwezige CRM behouden zonder dat extractie nodig is. Menging met laagwaardig schroot, de meest voorkomende eindbestemming van torenstaal, betekent verlies van die legeringswaarde en moet worden vermeden waar mogelijk.

Metaallegeringen

De nacelle, die de tandwielkast en overige mechanische componenten bevat, bestaat uit staal en gietijzer, met daarnaast diverse legeringen voor specifieke onderdelen.

Mangaan (Mn) is een veelgebruikt legeringselement in constructiestaal en roestvrij staal en staat op de EU strategische grondstoffen lijst. Net als niobium is mangaan aanwezig in te lage concentraties voor directe extractie, maar het bepaalt wel de kwaliteit van de staalstroom.

Chroom (Cr) zit in de roestvrij stalen onderdelen van de gondel en de rotornaaf. Chroom is kritiek vanwege de concentratie van productie in een beperkt aantal landen.

Verwerking van metaallegeringen

Mangaan, chroom en titanium zijn alle drie aanwezig in de gondel, maar in sterk uiteenlopende concentraties en verwerkingsroutes. Mangaan en chroom zitten als legeringselementen in constructie- en roestvrijstaal in concentraties die directe extractie niet rendabel maken. De aangewezen strategie is dezelfde als bij torenstaal: zuivere scheiding van staalsoorten zodat de legeringseigenschappen behouden blijven en de stroom hoogwaardig kan worden hergebruikt. Vermenging van roestvrijstaal met gewoon constructiestaal betekent direct waardeverlies van de aanwezige chroom- en mangaanfracties.

Conclusie

De voorgaande paragrafen maken drie dingen duidelijk. Ten eerste bevatten windturbines een gelaagd palet aan kritieke grondstoffen met sterk uiteenlopende volumes, verwerkingsroutes en strategische of economische waarde. Ten tweede is de verwerkingstechnologie voor de meest strategische materialen, met name REE uit permanente magneten, beschikbaar maar bevindt deze zich grotendeels buiten Nederland. Ten derde zijn de volumes die vrijkomen uit Nederlandse turbines momenteel nog beperkt, maar worden strategisch significant wanneer ze worden gezien in de context van de bredere Noordzeeketen.

Die context bepaalt ook de meest realistische en strategisch sterkste rol voor een Nederlandse circulariteitshub. Volledige integratie van demontage tot raffinage tot magneetproductie is op korte termijn niet realistisch en niet noodzakelijk. REE-scheiding en raffinage tot oxiden of metalen vereisen bijvoorbeeld investeringen, vergunningen en technische expertise die de scope van een regionale hub overstijgen en waarvoor Europese partners al capaciteit opbouwen.

De toegevoegde waarde van een Nederlandse hub ligt in de voorschakel: veilige en gespecialiseerde demontage van turbineonderdelen, voorscheiding van materiaalstromen, volumebundeling uit de Noordzeeregio, en kwaliteitsborging en certificering zodat materiaalstromen geschikt zijn voor Europese downstream verwerkers. Dit is de schakel die momenteel ontbreekt en die bepaalt of waardevolle CRM de Europese recyclingketen bereiken. Een hub die deze rol vervult positioneert Nederland niet als eindverwerker, maar als logistieke en technische schakel in een Europese keten die de CRMA-doelstellingen voor gerecyclede strategische grondstoffen moet waarmaken.

Overzicht ecosysteem

Organisatie	Rol	Betrokken bij windparken	Type speler
Blauwwind-consortium	Owner	Borssele 3 & 4	Consortium (Shell, Partners Group, Eneco e.a.)
CrossWind-consortium	Owner	Hollandse Kust Noord	Consortium (Shell, Eneco)
Eneco	Owner / operator	Luchterduinen, Hollandse Kust West (Ecowende, met partners)	Nederlands energiebedrijf
Equinor	Co-owner	Hollandse Kust West (Noord)	Internationaal energiebedrijf
Northland Power	Co-owner	Gemini	Internationale onafhankelijke producent
Ørsted	Owner / operator	Borssele 1 & 2	Gespecialiseerde offshore windontwikkelaar
RWE	Owner / operator	Gemini, OranjeWind (in ontwikkeling)	Groot internationaal energiebedrijf
Shell (Renewables)	Consortiumpartner / co-owner	Hollandse Kust Noord (CrossWind)	Geïntegreerde energie- en industriepartij
Vattenfall	Owner / operator	Hollandse Kust Zuid (delen), Hollandse Kust West	Groot internationaal energiebedrijf

Tabel 1. Asset owners & operators ecosysteem

Organisatie	Type speler	Kernrol binnen windketen	Relevantie voor decommissioning / EoL
Allseas	Groot internationaal offshore contractor	Offshore constructie, pijpleg en heavy lift	Potentieel relevant voor grootschalige funderingsverwijdering
Ballast Nedam Offshore	Offshore bouw- en engineeringbedrijf	Engineering en constructie offshore wind	Ondersteunende rol in ontmantelingsprojecten

Boskalis Offshore Energy	Groot internationaal maritiem contractor	Offshore installatie, heavy lift, kabel- en subsea-operaties	Verwijdering turbines, funderingen en kabels; maritiem transport naar haven
Decom North (Eemshaven-initiatief)	Regionaal clusterinitiatief	Positionering Noord-Nederland als offshore decommissioning hub	Faciliteert clustering van offshore ontmantelingsactiviteiten
DEME Offshore	Groot internationaal maritiem contractor	Offshore installatie, transport en funderingswerk	Potentiële inzet bij turbine- en funderingsverwijdering
Heerema Marine Contractors	Groot internationaal heavy lift specialist	Zwaar hijswerk offshore (platforms, structuren)	Verwijdering grote offshore structuren en substructures
HSM Offshore Energy	Offshore constructiebedrijf	Fabricage en integratie offshore topsides en platforms	Potentiële rol bij segmentatie en handling offshore structuren
Jan De Nul Group	Groot internationaal maritiem contractor	Offshore installatie, kabellegging en funderingswerk	Kabelverwijdering en funderingsontmanteling
Koole	Offshore decommissioning & marine contractor	Ontmanteling, berging en zware offshore operaties	Veilig en traceerbaar ontmantelen van end-of-life offshore assets
N-Sea	Gespecialiseerde subsea contractor	Subsea- en kabeloperaties	Verwijdering inter-array- en exportkabels
Seaway 7	Internationaal offshore wind contractor	Installatie en transport offshore windcomponenten	Turbine- en funderingsdemontage; maritiem transport
Van Oord	Groot internationaal maritiem contractor	Installatie en transport van offshore windfunderingen en kabels	Reverse installation, funderingsverwijdering, kabeloperaties

Tabel 2. Offshore decommissioning & marine contractors

Organisatie	Type speler	Kernrol binnen windketen	Relevantie voor decommissioning / EoL
Bolk Transport	Nationale heavy transport specialist	Exceptioneel wegtransport van lange en zware lading	Transport van rotorbladen en torensegmenten bij repowering en EoL

Broekman Logistics	Nationale logistiek dienstverlener	Havenlogistiek en projectcargo handling	Overslag en doorvoer van windcomponenten richting opslag of verwerking
Deugro Netherlands	Internationale projectlogistiek specialist	Logistieke engineering en multimodale transportcoördinatie	Coördinatie van complexe transportketens bij decommissioning
Jumbo Maritime	Nederlandse heavy lift rederij	Maritiem transport van projectlading en zware componenten	Vervoer van offshore turbineonderdelen tussen havens
Mammoet	Groot internationaal heavy lift & transportbedrijf	Zwaar hijswerk en exceptioneel transport van windcomponenten	Transport van bladen, torens en nacelles vanaf locatie of haven naar verwerker
Neele-Vat Logistics	Nationale logistiek en projecttransport specialist	Weg-, zee- en multimodaal transport	Transport en forwarding van windcomponenten in EoL-fase
Roll Group	Internationaal heavy transport & maritiem logistiek bedrijf	Projectcargo en maritiem transport van zware lading	Interhaven- en internationaal transport van offshore componenten
Sarens Nederland	Internationaal heavy lift & kraanbedrijf	Zware kranen en hijsoperaties voor windprojecten	Hijs- en transportondersteuning bij demontage en overslag
Splithoff Group	Nederlandse projectcargo rederij	Shortsea- en projectladingtransport in Europa	Maritiem transport van windcomponenten richting verwerkers
Van der Vlist	Groot internationaal heavy transportbedrijf	Exceptioneel wegtransport en logistieke engineering voor windturbines	Transport van complete turbines en losse componenten bij ontmanteling
Van der Wees Transporten	Nationale zwaartransport specialist	Exceptioneel transport en route-engineering	Vervoer van lange rotorbladen en zware turbineonderdelen
Wagenborg Nedlift	Nationale heavy lift & transportdienstverlener	Zwaar hijswerk en speciaal transport	Hijs- en ondersteuning en afvoer van turbineonderdelen bij onshore ontmanteling

Tabel 3. Transport & heavy logistics providers

Organisatie	Type speler	Kernrol binnen windketen	Relevantie voor decommissie / EoL
BOW Terminal (Breakbulk & Offshore Wind Terminal Vlissingen)	Gespecialiseerde offshore windterminal	Heavy lift- en projectcargo-terminal met focus op offshore wind	Handling, buffering en potentiële segmentatie van offshore EoL-componenten
Buss Terminal Julianahaven en Beatrixhaven	Internationale offshore wind terminaloperator	Dedicated offshore wind terminal met zware kades en uitgebreide laydowncapaciteit	Opslag, overslag en logistieke bundeling bij offshore decommissie
Energiehaven IJmond (IJmuiden)	Regionale haven met offshore supportfunctie	Offshore support en logistieke faciliteiten voor windsector	Ondersteuning bij aanlanding en tijdelijke opslag van offshore componenten
Groningen Seaports (Eemshaven)	Regionaal havenbedrijf met offshore focus	Positionering Eemshaven als offshore wind hub met zware industrie en laydownruimte	Concentratiepunt voor aanlanding, opslag en voorbereiding van offshore componenten
North Sea Port (Vlissingen)	Grensoverschrijdend havenbedrijf (NL/BE)	Offshore windhub met deepseakades en zware draagkracht	Aanlanding en handling van funderingen en grote componenten bij EoL
Offshore Wind Terminal Rotterdam (Maasvlakte 2)	Gespecialiseerde offshore windterminal	Heavy load-out kades en grootschalige laydownruimte	Lossen, marshalling en tijdelijke opslag van offshore turbinecomponenten
Port of Amsterdam (NZKG)	Nationaal havenbedrijf	Ontwikkeling offshore windcluster in combinatie met zware industrie	Potentiële koppeling tussen aanlanding en industriële verwerking van materiaalstromen

Port of Rotterdam Authority (Maasvlakte 2)	Nationaal havenbedrijf	Ontwikkeling en facilitering van offshore windcluster en zware kade-infrastructuur	Strategische aanlandingslocatie voor grootschalige offshore ontmanteling en marshalling
SIF (Rotterdam)	Producent van offshore funderingen; industriepartner binnen havencluster	Productie en handling van monopiles en transition pieces; heavy-lift-kades en grote industriële terreinen voor offshore productie	Kan fungeren als industriële verwerkingslocatie voor segmentatie van funderingscomponenten; expertise in staalbewerking en zware handling biedt synergie met EoL-funderingen.
TMA Terminal (Amsterdam)	Multipurpose terminaloperator met offshore-capaciteit	Transshipment hub voor windcomponenten, projectcargo en offshore-installatieschepen; opslag, handling en intermodale verbindingen	Ruime laydown-capaciteit voor grote bladen en torensegmenten; inzet als marshalling hub voor EoL-transport en overslag
TOWER Terminal (Rotterdam)	Offshore Wind Terminal	Opslag, (pre-)assemblage, installatievoorbereiding en heavy-duty handling van toekomstige windparken	Bereid voor op ontmantelingscapaciteit voor windparken, inclusief handling van grote funderingscomponenten en turbineonderdelen
Verbrugge Terminals (Vlissingen Offshore Terminal)	Particuliere offshore wind terminaloperator	Projectcargo- en offshore windoverslag met heavy lift-faciliteiten	Opslag en overslag van offshore componenten richting recycling
Wagenborg Stevedoring (Eemshaven)	Internationale offshore wind terminaloperator	Dedicated offshore wind terminal met zware kades en uitgebreide laydowncapaciteit	Opslag, overslag en logistieke bundeling bij

			offshore decommissioning
--	--	--	--------------------------

Tabel 4. Haven- en marshalling bedrijven

Organisatie	Type speler	Kernrol binnen windketen	Relevantie voor decommissioning / EoL
Business in Wind	Gespecialiseerde winddemontage- en handelsorganisatie	Inkoop, demontage en internationale verkoop van gebruikte windturbines	Re-use van complete turbines; onderdelenoogst en wereldwijde herplaatsing
Deutsche Windtechnik Nederland	Internationale onafhankelijke serviceprovider	Service, inspectie en componentrevisie	Repair en refurbishment van componenten buiten OEM-structuur
DOT Wind	Gespecialiseerde onafhankelijke serviceprovider	Onderhoud, revisie en retrofit van windturbines	Repair en refurbishment van hoofdcomponenten
Enercon Services Netherlands	OEM-serviceorganisatie	Onderhoud en revisie van Enercon-turbines	Refurbish, retrofit en spare parts binnen OEM-ecosysteem
IVER	Gespecialiseerde winddecommissioning- en refurbishpartij	Demontage, revisie en herinstallatie van turbines en componenten	Refurbishment en re-installatie van onshore turbines
IX Decom	Gespecialiseerde winddecommissioningpartij	Demontageplanning, onderdelenwinning en projectcoördinatie	Parts harvesting en voorbereiding voor hergebruik of revisie
Second Wind (online platform)	Internationale online marktplaats	Verkoop van gebruikte turbines en componenten	Wereldwijde afzetmarkt voor complete turbines en onderdelen
Siemens Gamesa Renewable Energy Nederland	OEM-serviceorganisatie	Service, retrofit en	Levensduurverlengingen

		onderdelenvoor ziening	componentupgrade s binnen OEM-keten
Spares in Motion	Online marktplaats voor windturbineonderdelen	Digitale handelsomgevi ng voor spare parts en componenten	Faciliteert internationale re- use en onderdelenhandel bij EoL
Ventolines	Gespecialiseerde windprojectdienstverlener	Technisch beheer, inspectie en levensduurverle nging	Condition assessme nt en voorbereiding op hergebruik of refurbish
Vestas Benelux	OEM-serviceorganisatie	Service en onderdelenvoor ziening voor Vestas- turbines	Aftermarket spare p arts en revisie binnen OEM- structuur
We4Ce	Gespecialiseerde blade repair & engineering partij	Inspectie, reparatie en structurele analyse van rotorbladen	Levensduurverlengin g en repair van bladen vóór of na demontage
Wind Turbine Market Place	Online handelsplatform	Aanbod en vraag van gebruikte windturbines en onderdelen	Digitale matching van vrijkomende EoL- componenten

Tabel 5. Component hergebruik specialisten

Organisatie	Type speler	Kernrol binnen windketen	Relevantie voor decommissioning / EoL
ArcelorMittal Nede rland	Staalindustrie	Staalproductie en - verwerking	Afname van secundair staal voor herintroductie in bouw- en industriesector
Aurubis Netherland s B.V.	Groot internationaal koperproducent en raffinaderij	Raffinage en productie van koper en koperproducten	Verwerking van koper uit kabels, generatoren en transformatoren
EMR (European Metal Recycling) Netherlands	Groot internationaal metaalrecyclingbedrijf	Inzameling en verwerking van ferro- en non-ferrometalen	Verwerking van staal, koper en aluminium uit windturbines

HKS Metals	Grote nationale ferrorecycler	Inzameling, knippen en verwerken van ferroschroot	Segmentatie en verwerking van staal uit turbines en funderingen
Hoeben Recycling	Metaalrecycler	Inzameling, sortering en verwerking van ferro- en non-ferrometalen	Ontmanteling en recycling van staal en metalen uit windturbines, torens en funderingen
Jansen Recycling Group	Recycling- en afvalverwerkingsbedrijf	Verwerking en recycling van metalen, beton en overige bouw- en sloopstromen	Integrale verwerking van vrijkomende materialen bij ontmanteling van windparken, inclusief metaal- en betonstromen
KMR Recycling	Gespecialiseerde non-ferrorecycler	Recycling van koper en aluminium	Mechanische scheiding en opwerking van kabelstromen
MIREC	Gespecialiseerde metaal- en e-waste recycler	Recycling van elektrische apparatuur en metalen	Terugwinning van koper en aluminium uit elektrotechnische componenten
Peute Recycling	Grote nationale metaalrecycler	Inzameling en verwerking van non-ferrometalen	Scheiding en verwerking van aluminium- en koperfracties
Riwald Recycling	Grote internationale metaalrecycler	Inzameling en verwerking van ferro- en non-ferroschroot	Verwerking van staal- en koperstromen uit ontmanteling
Sims Metal Netherlands	Groot internationaal metaalrecyclingbedrijf	Ferro- en non-ferrorecycling	Sortering en verwerking van metaalstromen uit decommissioning
Steinert Nederland	Gespecialiseerde technologie- en scheidingsinstallatieleverancier	Levering van scheidingstechnologie voor metaalrecycling	Ondersteuning bij hoogwaardige scheiding van ferro- en non-ferrofracties
Tata Steel Nederland	Groot internationaal staalproducent	Productie van staal uit primaire en secundaire grondstoffen	Afname en omsmelting van staalschroot uit torens en funderingen
Van Dalen Recycling	Grote nationale metaalrecycler	Inzameling en verwerking van schroot	Regionale verwerking van staal- en non-ferrostromen

Tabel 6. Metaalverwerkers

Organisatie	Type speler	Kernrol binnen windketen	Relevantie voor decommissie / EoL
Blade-Made (Superuse Studios)	Gespecialiseerde repurpose-ontwikkelaar	Ontwerp en toepassing van hergebruikte rotorbladen in bouw- en infrastructuurprojecten	Repurpose van complete bladdelen in civiele toepassingen
Circular Recycling Company (CRC)	Gespecialiseerde recycler	Mechanische recycling van thermohardende composieten	Verwerking van rotorbladen tot granulaat voor secundaire toepassingen
DOPS Recycling Technologies	Gespecialiseerde technologieontwikkelaar / recycler	Ontwikkeling en toepassing van mechanische recyclingtechnologie voor composieten	Verwerking van windturbinebladen en andere GFRP-stromen
Heidelberg Materials Nederland	Groot internationaal bouwmaterialenbedrijf	Cementproductie en inzet van alternatieve grondstoffen en brandstoffen	Co-processing van composietmateriaal in cementovens
Holcim Nederland	Groot internationaal bouwmaterialenbedrijf	Cement- en betonproductie	Inzet van composietreststromen in cementproductie (co-processing)
Koios Titan	Gespecialiseerde recycler	Thermo-chemische recycling (pyrolyse) van composieten	Hoogwaardige recycling van windturbinebladen waarbij vezels en harsfracties worden teruggewonnen voor hergebruik
NPSP Composites	Gespecialiseerde composietproducent	Toepassing van gerecyclede composietmaterialen in nieuwe producten	Afzetkanaal voor mechanisch gerecycled composiet
Re-Wind (NL betrokken partners)	Internationaal onderzoeks- en ontwerpconsortium	Ontwikkeling van structurele	Conceptontwikkeling en demonstratieproject

		toepassingen voor gebruikte rotorbladen	ten voor blade repurpose
Renewi	Groot internationaal afval- en recyclingbedrijf	Verwerking en logistiek van complexe afvalstromen	Inzameling en voorbereiding van composietafval, inclusief windbladen
SUEZ Recycling & Recovery Netherlands	Groot internationaal afval- en recyclingbedrijf	Industriële afvalverwerking en materiaalrecycling	Logistiek en voorbehandeling van composietstromen
TNO	Onafhankelijk onderzoeksinstituut	Onderzoek en pilotontwikkeling rond composietrecycling	Ontwikkeling en validatie van thermische en chemische recyclingroutes

Tabel 7. Composietverwerkers

Organisatie	Type speler	Kernrol binnen windketen	Relevantie voor decommissioning / EoL
ARN (Auto Recycling Nederland)	Nationale ketenorganisatie voor autorecycling	Organisatie van terugwinning kritieke metalen uit voertuigen	Ervaring met inzameling en ketenregie van magnet- en REE-stromen (cross-sectorale relevantie)
Circular Minerals (NL-initiatief, in ontwikkeling)	Gespecialiseerde recycler (in ontwikkeling)	Terugwinning kritieke mineralen uit industriële reststromen	Potentiële verwerking van REE-houdende componenten uit windturbines
EMR (European Metal Recycling) Nederland	Groot internationaal metaalrecyclingbedrijf	Inzameling en voorbereiding van ferro- en non-ferro metalen	Selectieve inzameling en voorbereiding van generatoren en magnethoudende componenten
Groningen Seaports – circulaire cluster	Regionaal havenbedrijf	Ontwikkeling circulaire industrie en offshore windcluster	Potentiële locatie voor bundeling en veilige opslag van magnetstromen
HKS Metals	Groot nationaal metaalrecyclingbedrijf	Ferro- en non-ferro metaalverwerking	Vorbewerking en scheiding van generatorcomponenten voorafgaand aan gespecialiseerde REE-verwerking

HVC (met focus op grondstoffen en energierugwinning)	Regionaal publiek energie- en grondstoffenbedrijf	Verwerking van afval- en reststromen	Potentiële rol in logistieke bundeling van complexe materiaalstromen
HyProMag Netherlands (voorgenomen activiteiten via EU-consortia)	Gespecialiseerde magneetrecycler (internationaal consortium)	Waterstofgebaseerde recycling van NdFeB-magneten	Hoogwaardige terugwinning van magneteleringen uit generatoren
Nyrstar (Budel)	Groot internationaal non-ferro metaalproducent	Verwerking en raffinage van non-ferro metalen	Potentiële rol in hydrometallurgische verwerking van zeldzame aardmetalen (niet specifiek windgericht)
Port of Rotterdam – circulaire initiatieven	Havenbedrijf (circulaire clusterontwikkeling)	Faciliteren van circulaire industrie en metaalverwerking	Logistieke bundeling en vestigingslocatie voor REE-voorbewerking of raffinage
TNO	Nationaal onderzoeksinstituut	Onderzoek naar circulaire technologie en kritieke grondstoffen	Ontwikkeling en validatie van recyclingtechnologieën voor magneten en zeldzame aardmetalen
TU Delft (Materials & Environment / 3mE)	Technische universiteit / kennisinstelling	Onderzoek naar materiaalrecycling en magnetentechnologie	Kennisontwikkeling rond REE-terugwinning uit windgeneratoren
Urban Mining Company Netherlands (UMC Netherlands)	Gespecialiseerde magneetrecycler	Magnet-to-magnet recycling van NdFeB-magneten	Terugwinning en herproductie van permanente magneten uit direct-drive generatoren

Tabel 8. Recyclers van kritieke grondstoffen en magneten

Organisatie	Type speler	Kernrol binnen windketen	Relevantie voor decommissioning / EoL
AYOP (Amsterdam IJmuiden Offshore Ports)	Regionale clusterorganisatie	Verbinding offshore bedrijven in NZKG	Positionering haven- en clusterinfrastructuur voor EoL-activiteiten
CIRCO	Nationaal circulair programma	Ondersteuning circulaire businessmodellen	Versnelt marktontwikkeling rond EoL-strategieën
Deltares	Nationaal kennisinstituut	Onderzoek mariene infrastructuur en bodem	Ecologische en technische onderbouwing offshore verwijdering

DNV Netherlands	Internationale certificeringsinstantie	Certificering en classificatie offshore wind	Technische beoordeling van hergebruik en levensduurverlenging
Energie Samen	Brancheorganisatie energiecoöperaties	Vertegenwoordiging energiecoöperaties	Bundeling van kleine onshore eigenaren bij EoL-vraagstukken
Maritime Offshore NL	Brancheorganisatie	Vertegenwoordiging offshore maritieme sector	Ketenafstemming rond offshore ontmanteling en logistiek
Ministerie van Economische Zaken en Klimaat (EZK)	Nationale overheid	Beleidsvorming energie en wind op zee	Bepaalt wettelijke kaders, tendercriteria en lange termijn planning voor ontmanteling
Ministerie van Infrastructuur en Waterstaat (IenW)	Nationale overheid	Afval-, circulaire economie- en milieubeleid	Kaders voor afvalstatus, recyclingnormen en circulaire doelstellingen
Ministerie van Klimaat en Groene Groei (KGG)	Nationale overheid	Klimaatbeleid en verduurzamingsstrategie	Strategische kaders voor circulariteit en grondstoffenzekerheid
NedZERO (voorheen NWEA)	Brancheorganisatie	Belangenbehartiging Nederlandse windsector	Agendering van circulariteit, standaardisatie en sectorafspraken
NEN (Koninklijk Nederlands Normalisatie Instituut)	Nationale normeringsinstantie	Ontwikkeling technische normen	Standaardisatie van secundaire materialen en componenthergebruik
Rijksdienst voor Ondernemend Nederland (RVO)	Nationale uitvoeringsorganisatie	Subsidies, tenders en marktregie windenergie	Contractvoorwaarden en monitoring van EoL-verplichtingen
Rijkswaterstaat	Nationale uitvoeringsorganisatie	Vergunningverlening en beheer Noordzee	Toezicht op offshore ontmanteling en verwijderingsverplichtingen
TenneT	Nationale netbeheerder (offshore TSO)	Offshore netinfrastructuur en aansluiting	Afkoppeling, verwijdering en planning netcomponenten bij EoL
TNO	Nationaal onderzoeksinstituut	Toegepast onderzoek energie en circulariteit	Ontwikkeling recycling- en hergebruiktechnologieën
Topsector Energie	Publiek-privaat innovatieprogramma	Innovatiestimulering energietransitie	Financiering en coördinatie van circulaire pilots

Tabel 9. Systeem en governance partijen