CIRCULAIRE
MAAKINDUSTRIE

ROUTEKAART KRITIEKE MATERIALEN

Verwerking en recycling van kritieke grondstoffen in Nederland:

kansen, knelpunten en handelingsperspectieven, aan de hand van twee eerste casussen permanente magneten en zonnepanelen

Leeswijzer

Dit document is opgebouwd van algemeen naar specifiek. Hoofdstuk 1 tot en met 5 beschrijven de context, uitgangspunten en doelstellingen rond recycling van kritieke grondstoffen en vormen het analytische kader voor deze routekaart. In hoofdstuk 2 wordt daarnaast toegelicht waarom is gekozen voor de twee uitgewerkte productstromen en hoe deze selectie tot stand is gekomen. Dít hoofdstuk geeft de achtergrond en onderbouwing voor de keuzes die in de verdere uitwerking worden gemaakt. Ook worden hier de relaties met de andere routekaart documenten gelegd.

Lezers die vooral geïnteresseerd zijn in de concrete oplossingsrichtingen en het handelingsperspectief kunnen ervoor kiezen om direct door te gaan naar hoofdstukken 6 en 7. Deze hoofdstukken bevatten de oplossingsrichtingen voor respectievelijk het terugwinnen van kritieke grondstoffen uit permanente magneten en uit zonnepanelen. Per productstroom worden de bestaande waardeketens in Nederland en de Europese Unie beschreven, worden de belangrijkste knelpunten geanalyseerd en worden oplossingsrichtingen en bijbehorende actielijnen uitgewerkt. Hoofdstuk 6 en 7 kunnen daardoor onafhankelijk van elkaar worden gelezen en zijn relevant voor verschillende ketenpartijen en doelgroepen, afhankelijk van de betreffende materiaalstroom.

De routekaart is opgezet als een document dat in de tijd kan worden uitgebreid. Nieuwe productstromen kunnen in de toekomst als aanvullende hoofdstukken worden toegevoegd, zodat de routekaart stapsgewijs kan uitgroeien tot een bredere en samenhangende routekaart voor de recycling van kritieke grondstoffen. De routekaart geeft daarmee een momentopname van de stand van zaken eind 2025/begin 2026. Gezien de snelle ontwikkelingen op dit gebied, mede onder invloed van geopolitieke spanningen en het toenemende belang van strategische autonomie en defensie, zal deze routekaart periodiek moeten worden geactualiseerd.

De beschikbare literatuur en studies op het gebied van permanente magneten en zonnepanelen is omvangrijk en beslaat meerdere decennia en geografische regio's. Daarbij gaat het om een grote hoeveelheid rapporten en analyses. In deze routekaart is daarom een selectie gemaakt van informatie die noodzakelijk is voor het onderbouwen van de voorgestelde oplossingsrichtingen. Een routekaart moet naast inhoudelijk onderbouwd ook leesbaar blijven voor niet-experts, zodat het document bruikbaar is voor een brede groep betrokken partijen.

Samenvatting

Deze routekaart beschrijft hoe Nederland een actieve en strategisch relevante rol kan innemen in Europese waardeketens voor kritieke grondstoffen door inzet op terugwinning, verwerking en – waar relevant – raffinage van secundaire stromen. Omdat Nederland nauwelijks primaire grondstofreserves heeft, richt de routekaart zich volledig op secundaire materiaalstromen. De analyse is uitgewerkt aan de hand van twee strategisch gekozen eerste casussen:

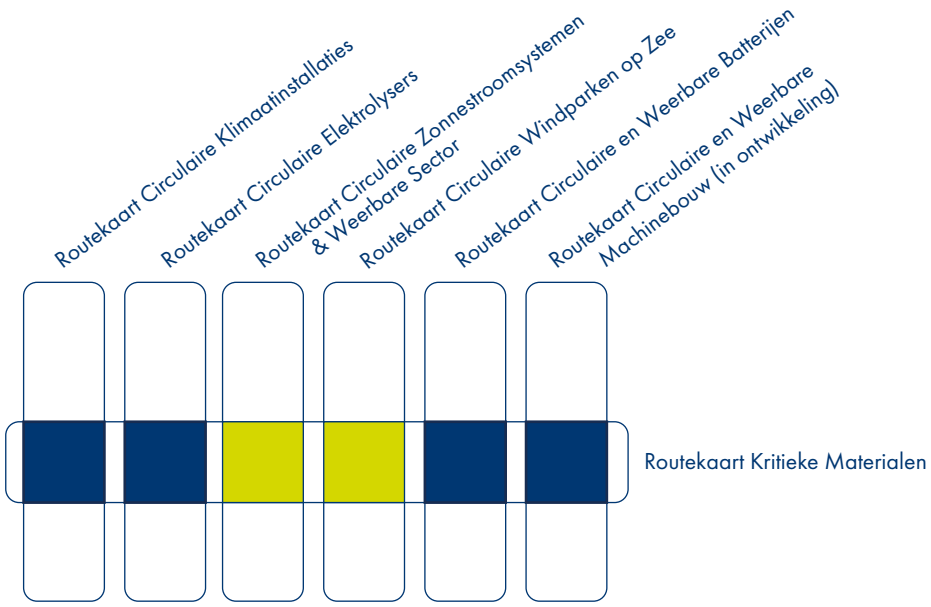
- het terugwinnen van kritieke grondstoffen uit permanente magneten en
- het terugwinnen van kritieke grondstoffen uit zonnepanelen.

Deze casussen maken inzichtelijk welke keuzes en acties nodig zijn om recyclingcapaciteit op te bouwen die bijdraagt aan zowel nationale als Europese doelstellingen.

De keuze voor deze twee productstromen betekent nadrukkelijk geen beperking tot deze materialen, maar betreft twee duidelijk afgebakende en goed definieerbare stromen die geschikt zijn om de aanpak voor het ontwikkelen van recyclingroutekaarten uit te werken. De selectie van deze twee stromen is een keuze van het productteam geweest, gebaseerd op Nederlandse en Europese grondstofprioriteiten, de aanwezigheid en omvang van secundaire stromen en de aansluiting op bestaande kennis, bedrijvigheid en waardeketens in Nederland en Europa. De gehanteerde aanpak is breder toepasbaar en bedoeld als basis voor verdere uitbreiding van de routekaart. Nieuwe productstromen kunnen in de toekomst als afzonderlijke hoofdstukken aan dit document worden toegevoegd, zodat de routekaart stapsgewijs kan uitgroeien tot een bredere en samenhangende routekaart voor kritieke grondstoffen.

De routekaart bestaat daarmee feitelijk uit twee afzonderlijke, zelfstandig leesbare routekaarten, elk gericht op een specifieke productstroom. De oplossingsrichtingen voor permanente magneten en zonnepanelen zijn inhoudelijk niet aan elkaar gekoppeld en bedienen verschillende ketenpartijen en doelgroepen, maar volgen wel dezelfde analytische benadering.

Binnen deze routekaart ligt de focus op terugwinning en verwerking van kritieke grondstoffen. Daarmee grijpt het idee van deze routekaart in op alle routekaarten uit het Uitvoeringsprogramma Circulaire Maakindustrie (UPCM) waar grondstoffen een thema is, zoals aangegeven in Figuur 1. Hogere circulaire strategieën als hergebruik en refurbishment van producten of componenten vallen buiten scope, aangezien deze onderwerpen reeds uitvoerig zijn uitgewerkt binnen de bestaande *Routekaart Circulaire Zonnestroomsystemen & Weerbare Sector* en de *Routekaart Circulaire Windparken op Zee*.



Figuur 1: Matrix routekaarten

Doelstellingen

De routekaart richt zich op drie samenhangende doelstellingen:

1. **Strategische relevantie van Nederland in internationale waardeketens van kritieke grondstoffen**
   Nederland streeft naar een substantiële en structurele positie in Europese waardeketens voor kritieke grondstoffen. *Dit impliceert een aandeel van circa 5–10 % in de Europese recycling (inclusief verwerking en raffinage) van geselecteerde kritieke grondstoffen.*
2. **Bijdragen aan de streefwaarden van de EU Critical Raw Materials Act (CRMA)**
   Bijdragen aan de Europese doelen voor winning, verwerking en recycling van kritieke grondstoffen.
3. **Bijdragen aan nationale circulaire doelen (NPCE)**
   Het vergroten van het aandeel secundaire en duurzame grondstoffen en het terugdringen van het gebruik van primaire grondstoffen.

Om te bepalen welke keuzes nodig zijn om deze doelstellingen te realiseren, zijn voor permanente magneten en zonnepanelen dezelfde vragen beantwoord: hoe ziet de waardeketen eruit vanuit Nederlands perspectief, waar functioneren delen van de keten goed of juist niet, en waar liggen realistische kansen om (delen van) de keten in Nederland en Europa op te bouwen.

Om tijdig aan deze ambities te voldoen, zal in Nederland en Europa fysieke verwerkings- en productie-capaciteit moeten worden opgebouwd. Hoewel veel financiering/subsidies en beleidsaandacht zich richt op studies, handelsovereenkomsten en strategische partnerships, heeft dit tot op heden niet geleid tot daadwerkelijke uitbreiding van industriële productie en materiaalstromen. Eerdere studies, waaronder het ERECON[1]-rapport, en recente analyses op Europees (Draghi[2]) en Nederlands (Wennink[3]) niveau bevestigen dat analyse en strategie niet automatisch leiden tot gerealiseerde volumes. Deze routekaart richt zich daarom expliciet op het uitwerken van een uitvoerbaar pad richting industriële productie en meetbare resultaten, met als doel de stap van analyse naar uitvoering te maken en fysieke productie- en verwerkingscapaciteit in Nederland op te bouwen.

Het recyclen van kritieke metalen (zeldzame aardmetalen) uit permanente magneten uit windturbines – oplossingsrichting

Voor permanente magneten zijn drie mogelijke ontwikkelpaden beschouwd:

1. voortzetting van de huidige situatie zonder aanvullende interventies,
2. gerichte opschaling bestaande activiteiten, en
3. gerichte opschaling én opbouwen van ontbrekende, kritieke verwerkingsstappen.

1 https://ec.europa.eu/docsroom/documents/10882.
2 https://commission.europa.eu/topics/competitiveness/draghi-report_en.
3 https://www.rapportwennink.nl/.

Gegeven de groeiende Europese vraag naar permanente magneten en de streefwaarden uit de CRMA is alleen het derde ontwikkelpad in lijn met de gestelde doelstellingen. De voorgestelde actielijnen (paragraaf 6.2) in deze routekaart richten zich daarom op dit ontwikkelpad. Nederland kan daarmee, in samenwerking met andere lidstaten en bestaande bedrijven, een strategisch relevante positie opbouwen en bijdragen aan de Europese verwerkingscapaciteit.

De waardeketen voor permanente magneten is mondiaal georganiseerd en sterk geconcentreerd binnen een beperkt aantal landen en bedrijven. In Nederland is deze keten niet gesloten, maar specifieke stappen zijn wel duidelijk aanwezig. Nederland vervult binnen Europa een rol in ontmanteling, demontage en met name het demagnetiseren en voorbewerken van permanente magneten. Deze activiteiten functioneren goed en vormen een waardevolle basis om de positie van Nederland verder uit te bouwen.

Na deze eerste verwerkingsstappen verlaten de magneten echter Nederland en vaak ook Europa, aangezien verdere verwerking en raffinage voornamelijk buiten Europa plaatsvinden. Aan het eind van de keten is Nederland opnieuw actief via toepassingen van magneten en magnetische materialen in eindproducten. Wat ontbreekt, is capaciteit in het middendeel van de keten: de verwerking en opwerking van magneten tot herbruikbare magnetische materialen of halffabricaten. Juist in dit deel van de keten wordt een groot deel van de strategische en economische waarde gecreëerd.

Deze situatie beperkt zich niet tot Nederland. Op Europese schaal is de beschikbare verwerkingscapaciteit voor permanente magneten ontoereikend om de hoeveelheden magneten die de komende decennia vrijkomen te verwerken. In vrijwel alle lidstaten is uitbreiding van capaciteit noodzakelijk. Wanneer landen ervan uitgaan dat verwerking elders wordt gerealiseerd, ontstaat op Europees niveau een structureel tekort aan capaciteit.

De oplossingsrichting ligt daarom niet in het opzetten van volledig nieuwe ketens, maar in het gericht opschalen van bestaande activiteiten en het toevoegen van specifieke kritieke stappen in de recycling van magneten en bijbehorende grondstoffen. Daarbij is het essentieel om expliciet te kijken naar bestaande Nederlandse bedrijven die actief zijn in aanpalende sectoren, zoals metallurgie, smeltprocessen, vacuüm-technologie en verwerking van metaalpoeders. Een aantal van deze bedrijven kan met relatief beperkte aanpassingen en investeringen, en onder de juiste beleidsmatige randvoorwaarden, instappen in deze keten.

Businesscases voor verdere opschaling blijven daarbij complex en ontstaan in de huidige marktsituatie niet vanzelf. De combinatie van technologische risico's, onzekerheid over toekomstige volumes en prijsontwikkeling, en afhankelijkheid van internationale ketens maakt dat bedrijven op dit moment terughoudend zijn met investeringen in nieuwe verwerkingscapaciteit. Tegelijkertijd moet de vraag in hoeverre toekomstige businesscases onder veranderende geopolitieke omstandigheden standhouden worden afgewogen tegen de urgentie om tijdig bewezen industriële oplossingen te ontwikkelen en capaciteit op te bouwen.

Het recyclen van (kritieke) grondstoffen uit PV Panelen – oplossingsrichting

Ook voor zonnepanelen zijn drie ontwikkelpaden beschouwd:

1. voortzetting van de huidige verwerkingspraktijk,
2. beperkte aanpassing binnen bestaande mechanische recycling, en
3. gerichte ontwikkeling van aanvullende verwerkingsroutes.

De Nederlandse zonnepalen-keten staat sinds 2021 onder leiding van Stichting OPEN die de inzameling coördineert en verdere verwerking organiseert. De keten is aan de voorkant goed georganiseerd, met inzameling en mechanische voorbewerking. De huidige verwerking richt zich echter vooral op glas en aluminium, waarbij glas veruit het grootste volume vormt. Dit glas bevat additieven zoals antimoon, wat grootschalige toepassingsmogelijkheden potentieel kan beperken. Zonder een stabiele en duurzame afzetmarkt voor dit glas ontstaat mogelijk een knelpunt dat verdere opschaling van verwerking belemmert.

Voor de vervolgstappen in de recyclingketen bestaat voor een deel van de materialen in Nederland al potentiële verwerkingscapaciteit. Zo zijn er bestaande ketens voor koper, tin en aluminium. Voor silicium ontbreekt op dit moment nog een concrete grootschalige verwerkingsroute. Hoewel er potentiële toepassingen bestaan in andere industrieën, is verdere inzet afhankelijk van regelgeving, kwaliteitsvereisten en toelating.

Binnen de Europese Unie verschilt de interpretatie van regelgeving per lidstaat. Dit leidt tot uiteenlopende technologische keuzes en verwerkingsroutes, ondanks een gedeeld Europees wettelijk kader, en verklaart waarom in verschillende landen andere oplossingen worden ontwikkeld.

De analyse ziet dat voor Nederland de oplossingsrichting voor zonnepanelen in het combineren van twee sporen ligt:

1. het organiseren van een stabiele en schaalbare afzet voor grotere toekomstige glasvolumes, en
2. het gericht ontwikkelen van verdere verwerkingsroutes voor zilver en de kritieke grondstoffen, met name silicium en koper, waarbij voor silicium verdere duidelijkheid nodig is over toegestane toepassingen en kwaliteitscriteria.

Dit vraagt om technologische ontwikkeling én om richtinggevende keuzes vanuit de overheid over wat wenselijk en toelaatbaar is binnen de circulaire en strategische doelen. De voorgestelde actielijnen zijn terug te vinden in paragraaf 7.2.

Acties en randvoorwaarden

Voor zowel permanente magneten als zonnepanelen geldt dat de huidige marktsituatie in de meeste gevallen geen autonome businesscases oplevert voor bedrijven om zelfstandig te investeren in nieuwe verwerkings- en raffinagecapaciteit. Voor zonnepanelen ontstaan in Nederland inmiddels eerste initiatieven die onder specifieke omstandigheden potentieel kosteneffectief kunnen zijn. Voor permanente magneten is de businesscase voor opschaling momenteel in sterkere mate afhankelijk van aanvullende markt- en beleidscondities. Daarnaast ontbreken op dit moment zowel in Nederland als in Europa de passende publieke en of private fondsen om deze projecten te realiseren. Bestaande financierings-instrumenten sluiten onvoldoende aan bij de risico's, schaal en ontwikkelfase van nieuwe recycling- en verwerkingscapaciteit. Hierdoor komen projecten die technisch uitvoerbaar zijn in de praktijk niet tot realisatie.

Daarom ligt de bal in eerste instantie bij de overheid. Acties moeten zich richten op het creëren van randvoorwaarden waaronder bedrijven wél kunnen investeren, waaronder ketenregie, investerings-zekerheid, risicodeling, concurrerende energieprijzen, snellere en voorspelbare vergunningverlening en actieve vraagcreatie.

Voor beide productstromen bevat deze routekaart gedetailleerde actielijsten, die concreet maken welke stappen nodig zijn, waar de verantwoordelijkheid ligt en welke uitgangspunten daarbij worden gehanteerd.

In deze routekaart staat het opbouwen van werkende en schaalbare recyclingcapaciteit centraal. Het verder opwaarderen van materialen of streven naar upcycling is daarbij geen doel op zich. De prioriteit ligt bij het realiseren van verwerkingsroutes die daadwerkelijk kunnen worden gebouwd en die bijdragen aan het beschikbaar maken van secundaire grondstoffen in relevante volumes in Nederland en Europa.

Methodiek en bredere toepasbaarheid

De methodiek die is toegepast bij het opstellen van deze routekaart – het analyseren van waardeketens, volumes, marktstructuur en ontwikkelpaden in relatie tot expliciete doelstellingen – is breder toepasbaar op andere productstromen die kritieke grondstoffen bevatten en in aanmerking komen voor recycling.

De specifieke oplossingsrichtingen en technische keuzes zijn echter niet één op één overdraagbaar. Dit vanwege de specifieke markten, processen en spelers. Mogelijk kunnen verschillende oplossings-richtingen ergens in de keten wel samengebracht worden. Daarmee biedt deze routekaart niet alleen richting voor kritieke grondstoffen uit permanente magneten en zonnepanelen, maar ook een herbruikbaar analytisch kader voor verdere uitwerking van andere materiaal- en productstromen zoals grondstoffen uit grote stromen met lage concentraties (bijvoorbeeld bodemassen, slakken en residuen uit de chemie), materialen uit metallisch afval en schroot en recycling van grondstoffen uit batterijen, kleine elektrische en elektronische apparaten en elektrolysers.

Begrippenkader

De gehanteerde benadering in dit document is sterk gebaseerd op die van het UNEP-rapport uit 2013/2015: Recycling Rates of Metals door het Resource Panel.

Recycling is het proces waarbij grondstoffen in afvalstromen worden teruggewonnen en opnieuw ingezet, zodanig dat ze opnieuw kunnen functioneren als grondstof voor productie. Recycling begint met inzameling van een afvalstroom en eindigt bij inzet als grondstof voor productie: dan is een grondstof pas gerecycled. De gehele keten telt.

In de context van deze routekaart worden onder recycling activiteiten verstaan: inzameling, mechanisch of anders scheiden, raffineren en produceren van (half-) producten. Voor het scheiden en raffineren kunnen installaties gebruikt worden die speciaal hiervoor ontworpen zijn, maar het is gebruikelijk voor de raffinage gebruik te maken van de bestaande installaties voor verwerking van primaire grondstoffen.

Recycling staat in deze context los van begrippen als upcycling en downcycling.[4]

De termen “recycling” en “afval” spelen een belangrijke rol binnen wetgeving en vergunningverlening. In Nederland en de Europese Unie bestaan verschillende definities en interpretaties van deze begrippen, die bovendien kunnen afwijken van industriële praktijkdefinities. Dit verschil in interpretatie heeft directe invloed op de wijze waarop recyclingactiviteiten juridisch en praktisch kunnen worden ingericht en vormen tot op heden een belemmering voor de ontwikkeling van activiteiten.

4 https://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/clem.70013.

Inhoud

Leeswijzer 2

Samenvatting 3

Begrippenkader 7

1. Inleiding 9
- 1.1 Ambitie Routekaart 9
- 1.2 Beleidscontext 9
- 1.3 Totstandkoming 10
- 1.4 Stakeholderbetrokkenheid van de sector 10

2. Scope 11
- 2.1 Het belang: leveringszekerheid 11
- 2.2 De optie voor Nederland: terugwinning uit secundaire stromen 11
- 2.3 Afbakening 12

3. Visie 14

4. Analyses 15
- 4.1 PESTEL-factoren 15
- 4.2 Lopende initiatieven en relevant beleid 18

5. Doelen 20

6. Oplossingsrichtingen permanente magneten 21
- 6.1 Recyclen van kritieke metalen (zeldzame aardmetalen) uit permanente magneten uit windturbines 21
- 6.2 Actielijnen Permanente magneten 30

7. Oplossingsrichtingen zonnepanelen 35
- 7.1 Recyclen van (kritieke) grondstoffen uit PV Panelen. 35
- 7.2 Actielijnen Zonnepanelen 46

Samenstelling van het productteam 50

Bijlage 1 Onderdelen windturbine 51

Bijlage 2 Verschillende toepassingen magneten 52

Bijlage 3 Toekomstige grondstofstromen uit recycling zonnepanelen 55

Bijlage 4 Best practice / voorstel inrichting project 56

1. Inleiding

1.1 Ambitie Routekaart

De Routekaart Kritieke Materialen heeft als doel om te komen tot een door overheid, industrie en kennisinstellingen gedragen actieagenda voor het versterken van de beschikbaarheid, terugwinning en verwerking van kritieke grondstoffen. Omdat Nederland arm is aan primaire grondstofreserves is er gekozen voor het inzetten van secundaire materiaalstromen. De routekaart draagt bij aan het verminderen van grondstofafhankelijkheden, het versterken van strategische relevantie van Nederland in het realiseren van de Nederlandse en Europese circulariteitsdoelstellingen en is ondersteunend aan de andere routekaarten.

Deze routekaart sluit aan bij de ambities uit de Critical Raw Materials Act (CRMA), de Nationale Grondstoffen Strategie (NGS) en het Nationaal Programma Circulaire Economie (NPCE). Waar andere routekaarten binnen het Uitvoerings Programma Circulaire Maakindustrie (UPCM) zich primair richten op productgroepen en circulaire strategieën hoger op de R-ladder,[5] richt deze routekaart zich specifiek op het (terug)winnen en verwerken van kritieke grondstoffen uit secundaire stromen. Binnen deze context ligt de focus op het opschalen van inzameling, scheiding, raffinage en andere verwerkingsstappen die nodig zijn om deze grondstoffen opnieuw inzetbaar te maken in Nederlandse of Europese waardeketens.

De routekaart brengt in kaart welke strategische oplossingen en interventies nodig zijn om deze vormen van hoogwaardige recycling en materiaalterugwinning richting 2030 te realiseren. Daarbij wordt expliciet gekeken naar de mondiale waardeketens van kritieke grondstoffen en naar de rol die Nederland hierin, gelet op onze bestaande kennispositie, industriële basis en logistieke infrastructuur, realistisch en strategisch kan vervullen.

Het ecosysteem van kritieke grondstoffen in residu- en secundaire stromen is erg complex en divers. Hoewel er overlappende (generieke) uitdagingen voor het recyclen van deze grondstoffen zijn uit verschillende productgroepen, zijn er vooral ook veel (vnl. technologisch en economisch) verschillende (materiaal- en productgroep specifieke) uitdagingen. Daarom is ervoor gekozen om in deze routekaart twee specifieke eerste casussen van secundaire stromen met kritieke grondstoffen uit te lichten die representatief zijn voor bredere uitdagingen en kansen in secundaire stromen: het recyclen van kritieke grondstoffen (zoals zeldzame aardmetalen) uit permanente magneten uit windturbines en het recyclen van (kritieke) grondstoffen uit zonnepanelen. Deze casussen:

- dienen om strategische oplossingen en interventies te ontwikkelen die breed toepasbaar zijn.
- geven specifieke oplossingen voor het recyclen van kritieke grondstoffen uit permanente magneten en het verwerken van zonnepanelen.
- dienen als illustratie en inspiratie voor plan(nen) van aanpak voor het recyclen van kritieke grondstoffen uit andere productgroepen, met hun eigen (materiaal- en product) specifieke uitdagingen en oplossingsmogelijkheden.

De routekaart dient als richtinggevend en actiegericht document voor beleidsmakers, bedrijven, investeerders en kennisinstellingen. Het biedt handelingsperspectief voor het versnellen van lopende initiatieven, het agenderen van knelpunten en het gericht inzetten van beleid, investeringen en samenwerking om de beoogde transitie te ondersteunen.

1.2 Beleidscontext

Met de Nationale Grondstoffenstrategie (NGS) richt Nederland zich op het verminderen van grondstofafhankelijkheden, het vergroten van strategische relevantie en het verduurzamen van waardeketens. Het Nederlands Materialen Observatorium (NMO) identificeert daarin grondstoffen die voor Nederland prioritair zijn, mede op basis van economische relevantie, strategisch belang en het potentieel voor recycling. De NGS benadrukt daarnaast het belang van kennisontwikkeling, innovatie en het beter benutten van secundaire stromen.

5 Circulariteit: 4 strategieën & de R-ladder | RVO.nl.

Het Nationaal Programma Circulaire Economie (NPCE) biedt het langetermijnperspectief waarbinnen deze ambities samenkomen. Het programma stelt als doel dat Nederland in 2050 volledig circulair is, met minimaal gebruik van primaire grondstoffen en een significante reductie van CO_2-uitstoot. Hoogwaardige recycling en materiaalterugwinning worden binnen het NPCE gezien als noodzakelijke schakels om grondstoffengebruik structureel te verminderen en de beschikbaarheid van kritieke grondstoffen te borgen.

De Routekaart Kritieke Materialen is gepositioneerd op het snijvlak van deze beleidskaders. Binnen het Uitvoeringsprogramma Circulaire Maakindustrie (UPCM) richt de routekaart zich op de concrete uitwerking van circulaire oplossingen voor kritieke grondstoffen, met specifieke aandacht voor het (terug) winnen en verwerken van deze grondstoffen uit secundaire productstromen. Daarmee levert de routekaart een uitvoerbare en actiegerichte bijdrage aan de doelstellingen van de NGS en het NPCE.

1.3 Totstandkoming

De Routekaart Kritieke Materialen is, in opdracht van het ministerie van Economische Zaken en Klimaat opgesteld door het Productteam Kritieke Materialen. In het productteam zijn kennis en ervaring uit materiaalkunde, investeringen, recycling, metallurgie en industrie gebundeld. Het ministerie van Economische Zaken en Klimaat is verantwoordelijk voor het proces van de routekaart. Ook beleids-directies en het Nederlands Materialen Observatorium (NMO) zijn nauw betrokken geweest bij de ontwikkeling van de routekaart. Verder is deze routekaart aanvullend aan de andere routekaarten uit het Uitvoeringsprogramma Circulaire Maakindustrie (UPCM) door, naast de hogere R strategieën die in de routekaarten van producten worden geadresseerd, concrete en specifieke oplossingen voor recycling en raffinage van grondstoffen uit te werken.

Om de kwaliteit, uitvoerbaarheid en het draagvlak van de routekaart te borgen, zijn de voorgestelde strategische oplossingen en interventies o.a. gebaseerd op de input van geïnterviewde partijen. Dit betreft een brede groep sleutelspelers en stakeholders uit relevante sectoren, waaronder metallurgie, chemie, maakindustrie en logistiek.

Daarnaast is gebruikgemaakt van inzichten en projectvoorstellen uit het Circular Critical Raw Materials Consortium, Actieagenda Procestechnologie van de Nationale technologie strategie, rapport Wennink en van relevante initiatieven binnen de overheid.

1.4 Stakeholderbetrokkenheid van de sector

De inhoud van de Routekaart Kritieke Materialen is mede ontwikkeld op basis van interviews en gesprekken met relevante stakeholders uit de sector. De verzamelde inzichten en oplossingsrichtingen zijn vervolgens getoetst bij verschillende partijen om de analyse en aanbevelingen te valideren. Naast gerichte diepte-interviews is er een marktscan uitgestuurd naar bedrijven, financiers, kennis/onderzoeksinstellingen, overheid en brancheorganisaties actief in de relevante sectoren. Hierop zijn 83 reacties binnengekomen.

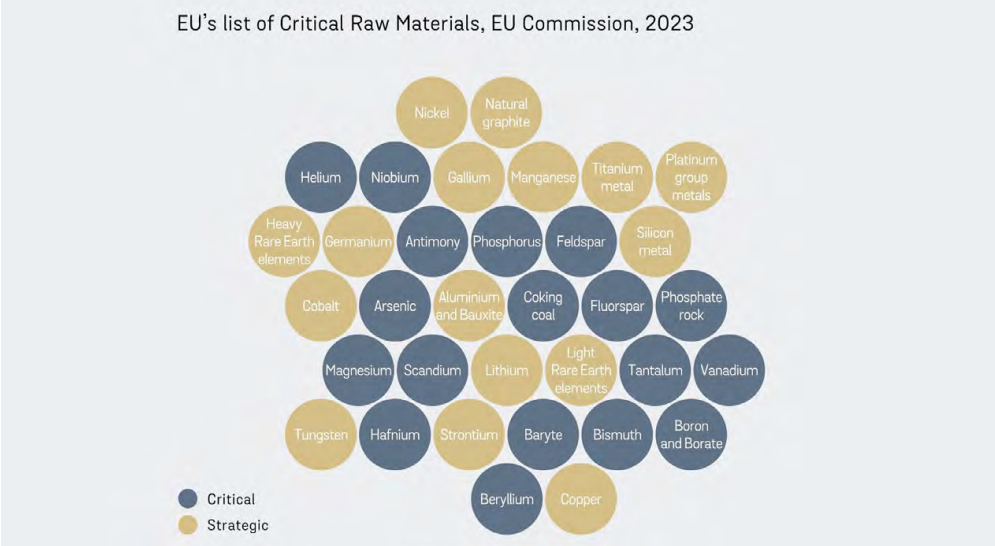
Deze routekaart is een momentopname van begin 2026. Kritieke grondstoffen en circulaire waardeketens zijn een actueel en dynamisch onderwerp, waarbij ontwikkelingen en initiatieven continu plaatsvinden. Het document weerspiegelt daarom de stand van zaken op dit moment en kan doorlopend worden aangevuld of aangepast op basis van nieuwe inzichten, beleid of marktontwikkelingen.

2. Scope

2.1 Het belang: leveringszekerheid

Dit document richt zich op kritieke grondstoffen, met een nadruk op metalen waarover zorgen bestaan wat betreft de leveringszekerheid. De Europese Commissie heeft 34 grondstoffen aangemerkt als kritiek en/of strategisch.[6] Een overzicht is gegeven in Figuur 2.

Op het moment van opstelling van deze routekaart werken het NMO en het ministerie van EZK aan een lijst van kritieke grondstoffen die van cruciaal belang zijn voor de leveringszekerheid in Nederland. Verwacht wordt dat deze nationale lijst in de loop van 2026 wordt gepubliceerd. De lijst is dynamisch en wordt jaarlijks bijgewerkt.



Figuur 2: Lijst Europese kritieke en strategische grondstoffen[7]

2.2 De optie voor Nederland: terugwinning uit secundaire stromen

Nederland beschikt nauwelijks over natuurlijke reserves van de meeste kritieke grondstoffen; magnesium is vrijwel het enige materiaal dat lokaal als primaire grondstof voorkomt[8]. Dit betekent dat een vermindering van afhankelijkheid en een grotere rol in de waardeketen vooral zal moeten worden gerealiseerd via recycling en hergebruik van bestaande grondstoffen en producten.

In die zin zijn onze "mijnen" niet primair de natuurlijke voorraden in de bodem, maar de huidige en toekomstige materiaalstromen die door strategische recycling en circulaire verwerking een substantieel aandeel van de kritieke grondstoffen kunnen vormen (zgn. "urban mines").

Door deze benadering kan Nederland zijn afhankelijkheid van buitenlandse leveringen reduceren, terwijl tegelijkertijd de ontwikkeling van circulaire technologieën en verwerkingscapaciteit wordt gestimuleerd. Circulair gebruik van grondstoffen vormt daarmee zowel een strategische hefboom voor leveringszekerheid en duurzaamheid als een motor voor industriële en technologische ontwikkeling.

6 Critical raw materials - Internal Market, Industry, Entrepreneurship and SMEs.
7 https://www.stenarecycling.com/circular-consulting/success-stories-tools/reports-tools/crms-strategies-for-resilience/.
8 Rond 2000 is er onderzocht of in Nederland magnesium metaal gemaakt kon worden, het zgn. Antheus project. Recentelijk is er in de Verenigde Arabische Emiraten een project van start gegaan om uit een vergelijkbare grondstof ook magnesium metaal te maken. Zie kst-30300-XIII-62-b1.pdf.

2.3 Afbakening

Bij het selecteren van materialen voor deze routekaart is gebruikgemaakt van de grondstofprioriteitenlijst zoals opgenomen in de CRMA en zijn onder meer de volgende vragen gesteld:

- Welke secundaire stromen zijn er aanwezig waar kritieke grondstoffen in zitten?
- Welke hoeveelheden zijn aanwezig?
- Wat is de economische en maatschappelijke waarde?
- Is er aansluiting op bestaande waardeketens en/of Synergieën met bestaande kennis en bedrijvigheid in Nederland waarmee we nieuwe (delen van de) ketens kunnen ontwikkelen?
- Welke recycling vraagstukken komen voort uit de routekaarten van het UPCM?

Uit de eerste verkenning door het productteam kwam een aantal oplossingsrichtingen voort, onder andere het recyclen van:

- Elektronica
- Consumenten stromen
  - Permanente magneten uit bijvoorbeeld stofzuigers
  - Indium, zilver en silicium uit zonnepanelen
  - Grondstoffen uit batterijen
- Industriële stromen
  - Zeldzame aardmetalen uit permanente magneten wind op zee en elektromotoren
  - Grondstoffen uit grote stromen met lage concentraties (zoals bodemas, slakken en residuen uit de chemie)
- Materialen uit metallisch afval/schroot.

De scope is vervolgens verder afgebakend aan de hand van de volgende criteria:

- De grondstof voor terugwinning is voldoende concreet, de terugwin-keten is overzichtelijk en het is daarmee haalbaar om het in Nederland op- of uit te bouwen.
- Er is perspectief op het op- of uitbouwen van (gedeeltelijke) verwerkingscapaciteit in Nederland. Dit betekent niet dat de volledige waardeketen in Nederland georganiseerd hoeft te zijn; een significante en strategisch relevante bijdrage binnen de (Europese) waardeketen is ook van waarde.
- Er is in potentie een groot afvalprobleem als er geen verwerkingsoplossingen voor worden gecreëerd.

Voor batterijen is al een Nationaal Groeifonds initiatief gaande. Daarom is niet verder overwogen om dit onderwerp mee te nemen in deze routekaart.

Dit heeft geleid tot de selectie van twee strategisch gekozen eerste voorbeeld casussen die in detail uitgewerkt zijn.

- Het recyclen van kritieke metalen (zeldzame aardmetalen) uit permanente magneten uit windturbines (en niet andere typen magneten zoals samarium kobalt magneten).
- Recyclen van (kritieke) grondstoffen uit zonnepanelen.

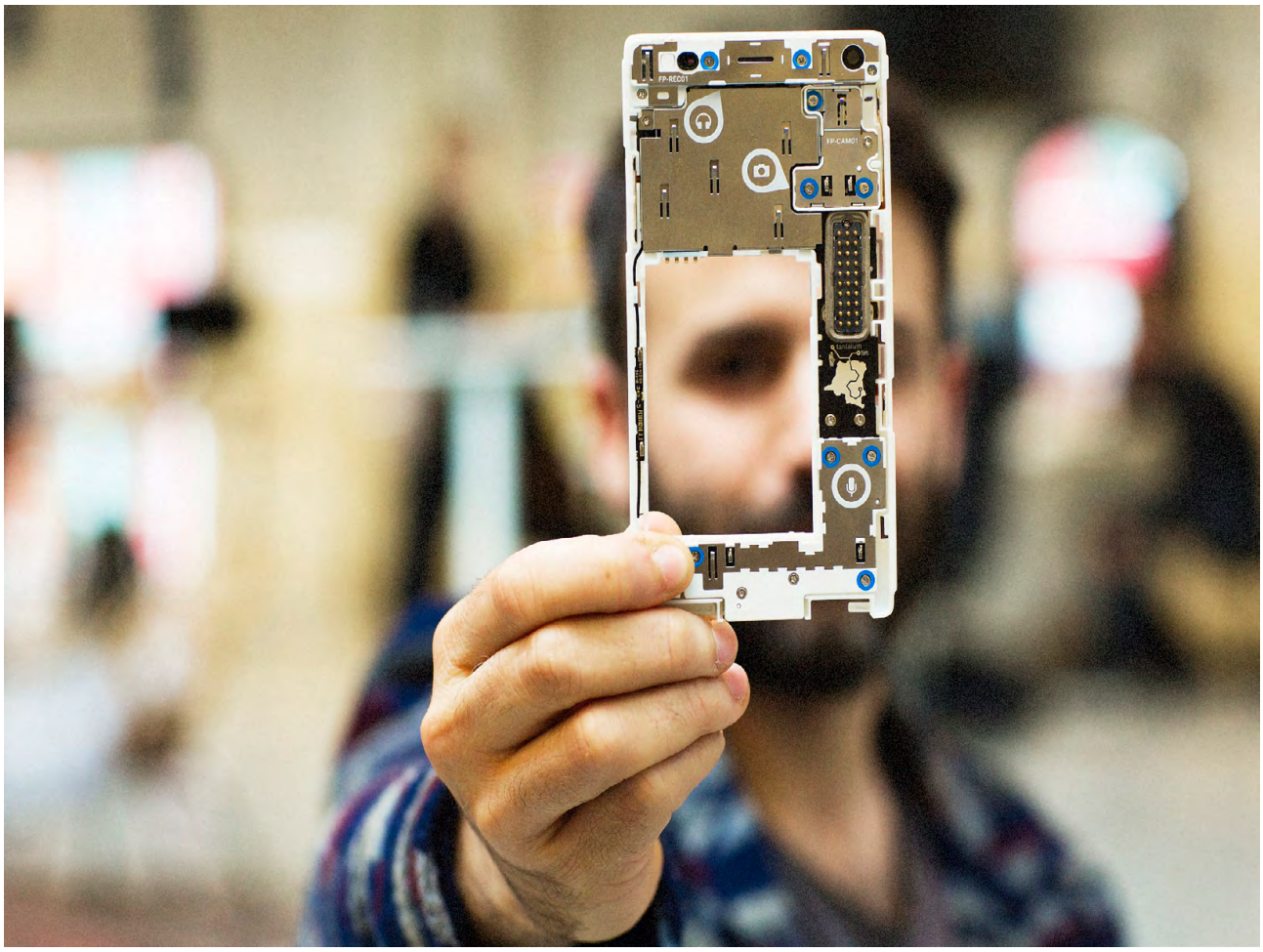
Nota Bene: Reeds in 2014 werd erkend in het ERECON-rapport dat magneten uit windturbines niet de hoogste prioriteit zouden moeten krijgen: zij kregen slechts plaats 9.[9] Ook in een recentere analyse zijn magneten uit windturbines niet de eerste keus.[10] Daarom is in de analyse gekeken naar de link tussen de magneten uit windturbines en overige soorten magneten (overige soorten magneten worden uitgebreider behandeld in de Routekaart Circulaire en Weerbare Machinebouw).

De in deze routekaart gehanteerde aanpak zou in de toekomst als voorbeeld gebruikt kunnen worden voor verdere uitwerking van de Nederlandse recycling capaciteit voor andere productstromen met kritieke grondstoffen.

9 DocsRoom - European Commission.
10 Towards neodymium recycling: Analysis of the availability and recyclability of European waste flows - ScienceDirect.

Buiten scope van dit document vallen onder andere:

- De installatie van PV-panelen of windparken.
- De ontmanteling van PV-panelen of windparken.
- Verwerking (recycling, vergassen, verbranden, stort) van andere onderdelen dan de magneet-drager binnen het kader “permanente magneten windturbines” (beton, pyloon, stenen, bladen) en van andere onderdelen dan het koper, zilver, en silicium-dragers binnen het kader “PV” (antimoon-glas, plastic).
- Het hergebruik of vooral verkoop naar buiten Nederland of de EU van complete units (zonnepaneel of windturbine) dan wel onderdelen hiervan waardoor de grondstoffen niet langer beschikbaar zijn. Hergebruik (re-use) en bijvoorbeeld refurbish maar ook andere stappen van de R-ladder worden uitvoerig besproken in de bestaande routekaarten Circulaire Zonnestroomsystemen & Weerbare Sector en Circulaire Windparken op Zee.
- Een diepgaande analyse van het Europese speelveld op het gebied van stimuleringsprogramma’s, voornamelijk met sponsoring van de EU.



3. Visie

In 2035 heeft Nederland zijn handelsafhankelijkheid van primaire grondstoffen verminderd door een substantiële strategische positie in te nemen in de recycling- en verwerkingsketens van een aantal kritieke grondstoffen. Het gaat hierbij om een positie van betekenis binnen Europese waardeketens. Nederland bouwt voort op aanwezige kennis en kundigheid op het gebied van metallurgie, metaalkunde, materiaalwetenschappen, chemie en procestechnologie, in combinatie met logistieke voordelen zoals havens en industriële clusters.

De inzet is gericht op zo hoogwaardig mogelijk hergebruik; waar dit niet mogelijk is, worden kritieke grondstoffen efficiënt en veilig teruggewonnen. Secundaire materiaalstromen worden ingezameld en geheel of gedeeltelijk in Nederland verwerkt tot nieuwe grondstoffen voor essentiële toepassingen, op basis van robuuste en schaalbare businesscases. Dit vergroot de leveringszekerheid en draagt direct bij aan het verdienvermogen van Nederland. Door kritieke grondstoffen in eigen land te verwerken, blijft de basis voor downstream activiteiten behouden. Zonder toegang tot deze grondstoffen en de daaruit gemaakte materialen en componenten, zoals magneten, is verdere verwerking, assemblage en productie niet mogelijk en komt de Nederlandse maakindustrie onder druk te staan.

Naast het ontwikkelen van nieuwe verwerkings- en recyclingcapaciteit is het van belang dat Nederland de bestaande waardeketens voor kritieke grondstoffen behoudt en versterkt. Nederland beschikt nu al over industriële activiteiten binnen deze ketens. Het toekomstbeeld is daarom gericht op zowel het borgen en veiligstellen van bestaande ketens als het ontwikkelen van nieuwe capaciteiten. Dit voorkomt dat strategische capaciteit verdwijnt en later opnieuw moet worden opgebouwd, en maakt het mogelijk om voort te bouwen op aanwezige kennis, infrastructuur en netwerken.

Een belangrijk onderdeel van dit toekomstbeeld is het tijdig adresseren van grootschalige toekomstige afvalstromen. Met name bij zonnepanelen ontstaat de komende jaren een toenemend volume aan afgedankte materialen. Door nu te investeren in recycling- en verwerkingscapaciteit wordt voorkomen dat grote hoeveelheden afval ontstaan waarvoor geen passende verwerkingsmogelijkheden beschikbaar zijn. Dit draagt niet alleen bij aan grondstoffenzekerheid, maar voorkomt ook milieu- en veiligheidsrisico's die samenhangen met onbeheerde of onveilige afvalstromen.

De strategische oplossingen uit deze routekaart ondersteunen gerichte keuzes in beleid en investeringen en positioneren Nederland als een relevante speler in de verwerking van kritieke grondstoffen. Daarmee levert Nederland een concrete bijdrage aan de versterking van de strategische relevantie van Europa en aan de ambities van onder andere de Critical Raw Materials Act (CRMA), de Nationale Grondstoffenstrategie (NGS) en het Nationaal Programma Circulaire Economie (NPCE).

4. Analyses

4.1 PESTEL-factoren

Politiek

Het politieke landschap rond recycling van kritieke grondstoffen in Nederland wordt sterk bepaald door Europese ambities op het gebied van strategische relevantie, circulariteit en industriële weerbaarheid. Initiatieven zoals de Critical Raw Materials Act, de Net-Zero Industry Act, de verwachte Circular Economy Act, het Resource EU Action Plan en de Clean Industrial Deal benadrukken het streven om de afhankelijkheid van derde landen te verminderen en meer waardevolle grondstoffen binnen Europa te behouden, winnen en te hergebruiken. Geopolitieke spanningen en exportrestricties vergroten de urgentie van deze agenda en kunnen een stimulerende werking hebben op investeringen in recycling- en raffinagecapaciteit binnen de EU.

Tegelijkertijd opereert Europa, en daarmee ook Nederland, in een mondiaal speelveld waarin staten actief industriepolitiek bedrijven. Bij het opzetten van recycling van kritieke grondstoffen in Nederland is er sprake van directe concurrentie met landen waar overheden via subsidies, staatsbedrijven, handelsmaatregelen en strategische voorraden diep ingrijpen in de markt. Met name China heeft een dominante positie in meerdere ketens van kritieke grondstoffen en oefent door schaal, staatssturing en exportbeleid aanzienlijke invloed uit op beschikbaarheid en prijzen. Dit vraagt van Nederland en de EU om in te zetten op consistent, langjarig en concurrerend industriebeleid. De huidige geopolitieke ontwikkelingen onderstrepen dat Nederland en de Europese Unie sterk afhankelijk zijn van andere landen voor kritieke grondstoffen. Het toenemende besef hiervan, in combinatie met een nieuwe kabinetsperiode, biedt een duidelijke kans om gerichter keuzes te maken en meer consistent en langjarig beleid te voeren.

Hierbij is niet alleen publieke stimulering van investeringen in fysieke recyclingcapaciteit, maar ook actief beleid vereist dat is gericht op het versterken van Europese afzetmarkten voor kritieke grondstoffen-houdende producten, zodat aanbod en vraag binnen Europa beter op elkaar aansluiten.

Naast de economische en industriële belangen laten de huidige geopolitieke verhoudingen zien dat het niet vanzelfsprekend is dat kritieke grondstoffen beschikbaar blijven voor maatschappelijk belangrijke toepassingen. Door de dominante rol van China in meerdere kritieke grondstoffenketens kan niet langer worden aangenomen dat internationale markten onbeperkt en betrouwbaar toegang bieden tot deze grondstoffen. Daarnaast heeft de Verenigde Staten[11,12] een toenemende strategische positionering in de grondstofketen. Dit maakt het relevant om te kijken naar de beschikbaarheid van kritieke grondstoffen binnen Europa. Recycling en verwerking van kritieke grondstoffen in Nederland kunnen in dat licht bijdragen aan een robuustere en minder kwetsbare toeleveringsketen.

Economisch

Economisch gezien bevindt recycling van kritieke grondstoffen in Nederland zich in een complex spanningsveld tussen strategische noodzaak, internationale concurrentie, financiële haalbaarheid en een niet meer realistische liberale vrije handels mentaliteit. De ontwikkeling van grondstofprijzen, energieprijzen en importheffingen is volatiel en wordt mede beïnvloed door geopolitieke keuzes van dominante spelers. Door hun sterke positie in winning, verwerking en raffinage oefenen met name Chinese partijen via prijsstrategieën en exportbeleid grote invloed uit op de wereldmarkt. Dit leidt vandaag de dag al tot sterke prijsvolatiliteit, waardoor de businesscase voor recycling in Nederland onzeker is en investeringsrisico's (te) groot worden.

11 https://www.bnr.nl/nieuws/economie/10593577/vs-hamstert-grondstoffen-en-sluit-elf-handelsakkoorden-maar-mist-nog-voldoende-verwerkingscapaciteit.

12 https://www.reuters.com/business/energy/europe-must-guard-against-us-dominance-rare-earths-agency-head-says-2025-12-05/.

Daarnaast verkeert de Nederlandse industrie in een uitdagende positie door o.a. relatief hoge energieprijzen, netcongestie en strengere milieu- en vergunningseisen in vergelijking met andere, omringende landen. Investeringen in recycling van kritieke grondstoffen zijn kapitaalintensief en kennen lange terugverdientijden, terwijl concurrenten in andere landen vaak kunnen rekenen op steun of beschermende maatregelen variërend van staatsteun en subsidies tot investeringen en prijsgaranties. Tegelijkertijd groeit in Nederland en Europa de structurele vraag naar kritieke grondstoffen door de energietransitie, elektrificatie en digitalisering en de verwachte vraaggroei vanuit de defensie-industrie. Een levensvatbare businesscase voor een recycling keten vergt niet alleen een groeiende vraag maar ook een stabiele en in omvang voldoende instroom van te recyclen materialen. Beleidsinstrumenten en marktmechanismen die vraag en aanbod binnen Europa beter op elkaar afstemmen, zijn essentieel om een stabiele en rendabele recyclingketen te realiseren.

Sociaal-maatschappelijk

De belangrijkste sociale dimensie van recycling van kritieke grondstoffen betreft het creëren van maatschappelijk draagvlak voor nieuwe industriële activiteiten. Lokale weerstand tegen recyclinginstallaties, het zogeheten "Not In My Back Yard (NIMBY)" -effect, en de risicobereidheid en benaderbaarheid van provincies en gemeenten vormen belangrijke randvoorwaarden voor de realisatie van projecten. Daarbij speelt ook dat de verwerking van kritieke grondstoffen een technisch complex domein is en voor Nederland relatief onbekend, waardoor bij vergunningverlenende instanties en uitvoeringsdiensten niet altijd direct voldoende specifieke kennis en ervaring aanwezig is. Het versterken van kennis, expertise en samenwerking tussen overheden en industrie kan bijdragen aan een zorgvuldige en efficiënte besluitvorming. Transparantie, participatie en het zorgvuldig afwegen van lokale belangen zijn, ruimer gebruikmakend van de wettelijke mogelijkheden, noodzakelijk om maatschappelijke acceptatie te versterken en de verdere opbouw van strategische relevantie van Nederland in Europa te vergroten. Dit wordt ook in het rapport Wennink dat in opdracht van het kabinet is opgesteld uitvoerig besproken.

Tegelijkertijd is gedragsverandering bij burgers en bedrijven essentieel voor het slagen van recycling van kritieke grondstoffen. Bewustwording over het belang van inzameling, hergebruik en correcte afvalscheiding moet toenemen, zodat producten die kritieke grondstoffen bevatten, zoals magneten in elektronica, en industriële machines en apparaten daadwerkelijk beschikbaar komen voor hoogwaardige recycling. Dit vraagt om effectieve inzamelsystemen, duidelijke communicatie en mogelijk nieuwe prikkels. In bredere zin speelt ook de maatschappelijke discussie over consumptie een rol: minder en bewuster kopen kan de totale vraag naar kritieke grondstoffen beperken en de druk op grondstofketens verminderen. Ngo's en maatschappelijke organisaties moeten een proactieve en positieve rol innemen door het publiek en bedrijven bewust te maken van de voordelen van recycling van kritieke grondstoffen en -verwerking in Nederland. Ze kunnen duidelijk maken dat de verwerking hier veiliger, milieuvriendelijker en beter gereguleerd kan plaatsvinden dan in veel andere landen, en dat het economisch en ecologisch verstandiger is om deze activiteiten juist hier te concentreren.

Technologisch

Technologische ontwikkeling en versnelde implementatie en opschaling is een sleutelvoorwaarde voor succesvolle recycling van kritieke grondstoffen. Nederland beschikt over een sterke kennispositie op het gebied van metallurgie, process engineering, scheidingstechnologieën en automatisering, ondersteund door start-ups en onderzoeksinstellingen, waaronder universiteiten en TNO. In februari 2025 is de Nationale Innovatieagenda Kritieke Grondstoffen[13] gepubliceerd en in januari 2026 een Actieagenda Procestechnologie[14] als 1 van de 10 Actie Agenda's van de Nationale Technologiestrategie.

Daarnaast zijn er natuurlijk ook bedrijven in Nederland die al een rol spelen in de verwerking van kritieke grondstoffen of die een belangrijke rol kunnen gaan vervullen in de verdere ontwikkeling van de keten. Wel staat de kennis pijplijn onder druk, en dan met name in metallurgie en metaalkunde: het stimuleren van marktdenken in het onderwijs heeft ertoe geleid dat in het afgelopen decennium bijvoorbeeld de universitaire opleidingen zijn gemarginaliseerd. Beleid op onderwijs is ook belangrijk om de juiste kennis en vaardigheden in stand te houden.

13 https://chemistrynl.com/wp-content/uploads/2025/02/2024-Innovatieagenda-CCRM-MR.pdf.
14 https://www.kia-st.nl/kia-sleuteltechnologieen/actieagendas-nts/actieagenda-process-technologies.

Tegelijkertijd moeten we ons bewust zijn van de afhankelijkheid van China, dat voor een aantal cruciale stappen in productie van kritieke grondstoffen de export van Chinese technologie beperkt. Dat maakt dat focus op Europese ontwikkeling van technologie niet alleen economisch waarde oplevert maar ook de enige strategische optie is op strategische relevantie op het gebied van kritieke grondstoffen. Ook blijft een belangrijk aandachtspunt het 'design for circularity'. Producten waarin kritieke grondstoffen worden verwerkt, zoals elektrische voertuigen, windturbines en industriële installaties, moeten zodanig worden ontworpen dat magneten en andere componenten eenvoudig kunnen worden gerepareerd of verwijderd en gerecycled. Daarnaast wordt systeemintegratie steeds belangrijker: recycling van kritieke grondstoffen moet worden ingebed in bredere industriële en logistieke systemen, waarbij digitalisering, data-uitwisseling en instrumenten zoals het Digitaal Product Paspoort een faciliterende rol kunnen spelen.

Ecologisch

Ecologisch gezien biedt recycling van kritieke grondstoffen duidelijke voordelen ten opzichte van primaire mijnbouw, die vaak gepaard gaat met hoge CO_2-uitstoot, aanzienlijk watergebruik en grootschalige milieuschade. Door kritieke grondstoffen opnieuw te benutten, kan de ecologische voetafdruk van producten en energiesystemen aanzienlijk worden verkleind. Dit draagt direct bij aan de klimaat- en circulariteitsdoelstellingen van Nederland en de Europese Unie en vermindert tegelijkertijd de druk op kwetsbare ecosystemen die vaak buiten Europa liggen.

Hoewel deze analyse zich specifiek richt op de recycling van kritieke grondstoffen, is het vanuit ecologisch perspectief noodzakelijk om de verwerking van het volledige product in beschouwing te nemen. Dit betekent dat niet alleen wordt gekeken naar de kritieke grondstoffen zelf, maar naar de complete levenscyclus van systemen zoals windturbines (van kabels tot bladen) en zonnepanelen (van kabels tot glasplaat). Alleen door deze integrale benadering kan worden vastgesteld of recyclingprocessen daadwerkelijk leiden tot netto milieuwinst. Deze holistische "productbenadering" wordt voor zonnepanelen meegenomen in de Routekaart Circulaire Zonnestroomsystemen & Weerbare Sector.

Tegelijkertijd kent de Nederlandse context duidelijke ecologische randvoorwaarden. Beperkte fysieke ruimte, stikstofdepositie en de nabijheid van Natura 2000-gebieden kunnen de vestiging en uitbreiding van recyclinginstallaties beperken. Ook de milieu-impact van recyclingprocessen zelf, zoals energiegebruik, watergebruik, emissies en de omgang met reststromen, vraagt om zorgvuldige regulering en monitoring om te waarborgen dat recycling van kritieke grondstoffen niet alleen circulair, maar ook daadwerkelijk milieuvriendelijk is.

Juridisch

Het juridische kader rond recycling van kritieke grondstoffen is complex en sterk in ontwikkeling. Europese regelgeving, zoals de Critical Raw Materials Act, de Waste Framework Directive, de WEEE-richtlijn, de Waste Shipment Regulation en de Ecodesign Regulation for Sustainable Products, biedt enerzijds stimulansen voor recycling en circulariteit, maar stelt anderzijds hoge eisen aan naleving en administratieve verantwoording. Nationale knelpunten, zoals stikstofregels, netcongestie, lange vergunningstrajecten en de problematiek rond de einde-afvalstatus, kunnen de realisatie van recyclingprojecten aanzienlijk vertragen.

Daarnaast spelen regels rondom staatssteun en vergunningverlening een rol bij investeringsbeslissingen. Juridische duidelijkheid, harmonisatie tussen lidstaten en versnelling van procedures zijn cruciaal om recycling van kritieke grondstoffen in Nederland daadwerkelijk schaalbaar en investeerbaar te maken.

Samenvattend

Deze PESTEL-analyse laat zien dat recycling van kritieke grondstoffen in Nederland, in Europees verband, strategisch noodzakelijk en ecologisch wenselijk is, maar plaatsvindt in een complex speelveld van geopolitiek, internationale concurrentie en maatschappelijke randvoorwaarden. Succesvolle opschaling vereist een samenhangende aanpak waarin consistent industriebeleid, technologische innovatie en implementatie, sociale gedragsverandering, vraagstimulering en juridische uitvoerbaarheid op elkaar afgestemd zijn. Dit vergt coördinatie en een overheid die zich proactief committeert aan het opbouwen van capaciteit in deze sectoren.

4.2 Lopende initiatieven en relevant beleid

Deze paragraaf biedt een overzicht van het vigerende beleidskader en de lopende initiatieven die Nederland en Europa in 2025 hebben gelanceerd of geactualiseerd. De focus ligt hierbij op drie pijlers:

- **Strategische Relevantie:** Verminderen van importafhankelijkheid via eigen winning en verwerking van kritieke grondstoffen (bijv. via de NGS en CRMA).
- **Circulaire Economie:** Maximaliseren van hergebruik en recycling, ondersteund door innovaties zoals het Digitaal Productpaspoort en nationale onderzoeks- en innovatieprogramma's.
- **Innovatieve Samenwerking:** Samenwerking tussen overheid, kennisinstellingen en industrie om de volledige waardeketen — van ontwerp tot end-of-life — toekomstbestendig te maken.

Onderstaande opsomming geeft de huidige stand van zaken (peildatum januari 2026) weer van de belangrijkste instrumenten en programma's en is niet bedoeld als volledig overzicht.

Europees Beleidskader

- **Critical Raw Materials Act (CRMA):**[15] Verordening voor 2030-streefwaardes op het gebied van winning, verwerking en recycling van kritieke grondstoffen.
  Benchmarks: minimaal 10% EU-extractie, 40% verwerking en 25% recycling; beperking van afhankelijkheid: minder dan 65% van een derde land buiten de EU.
- **EU-Verordening Circulariteit Voertuigen (ELV, december 2025):**[16] Nieuw politiek akkoord over de gehele levenscyclus van voertuigen met nadruk op design-for-recycling en terugwinning van kritieke grondstoffen.
- **RESourceEU**[17] **(december 2025):** een Europees samenwerkingsplatform dat ecologische circulariteits-doelen bevordert en zich in toenemende mate richt op strategische autonomie in grondstofketens, in aansluiting op beleidsprioriteiten van de Europese Commissie.
- **European Critical Raw Materials Centre:**[18] een EU-institutioneel initiatief onderdeel van het RESourceEU-pakket, dat de strategische autonomie en leveringszekerheid van kritieke grondstoffen versterkt, met aandacht voor duurzaamheid en circulariteit, en in lijn met de beleidsprioriteiten van de Europese Commissie. Moet in 2026 operationeel zijn.
- **EU Energy and Raw Materials Platform**[19] **(juli 2025):** een Europees instrument van de Europese Commissie om de gezamenlijke inkoop, vraagaggregatie en matchmaking van energieproducten en strategische grondstoffen te faciliteren, met het oog op versterking van de industriële concurrentiekracht, decarbonisatie, leveringszekerheid en diversificatie van toeleveringsketens.
- **Net Zero Industry Act (NZIA):**[20] EU-regelgeving ter bevordering van schone technologieproductie binnen de EU, inclusief waardeketen-ondersteuning voor batterijen en componenten.
- **Ecodesign (ESPR) & Digitaal Productpaspoort**[21] **(DPP):** Start van sectorgerichte pilots in 2025, vooral voor batterijpaspoorten en verbeterde productinformatie t.b.v. recycling.
- **Clean Industrial Deal:**[22] kondigt maatregelen aan die bijdragen aan, duurzame industrie waaronder betaalbare energie, en een 50 miljard fonds van InvestEU.[23,24]

15 https://single-market-economy.ec.europa.eu/sectors/raw-materials/areas-specific-interest/critical-raw-materials/critical-raw-materials-act_en.
16 https://environment.ec.europa.eu/topics/waste-and-recycling/end-life-vehicles_en.
17 https://single-market-economy.ec.europa.eu/document/download/01c448d6-dc93-40d7-9afe-4c2af448d00c_en.
18 https://transition-pathways.europa.eu/retail/policy/resourceeu-action-plan-accelerating-our-critical-raw-materials-strategy-adapt-new.
19 https://energy.ec.europa.eu/topics/energy-security/eu-energy-and-raw-materials-platform_en.
20 https://commission.europa.eu/topics/competitiveness/green-deal-industrial-plan/net-zero-industry-act_en.
21 https://eur-lex.europa.eu/legal-content/NL/TXT/HTML/?uri=OJ:L_202401781.
22 https://commission.europa.eu/topics/competitiveness/clean-industrial-deal_en.
23 Clean Industrial Deal - European Commission.
24 https://ecer.minbuza.nl/-/europese-commissie-presenteert-nieuw-staatssteunraamwerk-voor-het-bereiken-van-een-schone-industrie.

Nationaal Beleid & Strategie (Nederland)

- **Nationale Grondstoffenstrategie[25] (NGS):** Nederlandse routekaart voor bijdrage aan CRMA-streefwaardes en nationale circulariteitsinspanningen.
- **Material Independence & Circular Batteries[26] (Nationaal Groeifonds):** Programma ter ondersteuning van innovatie in de batterijketen en vermindering van afhankelijkheid van batterijgrondstoffen (exacte omvang loopt via Groeifondsbesluiten).
- **Nationaal Programma Circulaire Economie[27] (NPCE 2025):** Circulariteitsdoelen richting 2035, waaronder hogere recycling (55% grondstoffen uit secundair of bio-based in 2035) en het primaire grondstoffen verbruik met 15% verminderen in 2035.
- **Nederlands Materialen Observatorium[28] (NMO):** Operationele monitoring van leveringsrisico's en waardeketens van kritieke grondstoffen (sinds februari 2025).
- **Nationale technologie strategie[29] (jan 2026):** inclusief actie agenda procestechnologie.
- **Innovatie Agenda CCRM:[30]** deze innovatie agenda bevat ook de actielijnen en ambities uit het Groeifonds voorstel voor "Circulaire Kritieke grondstoffen" dat in 2024 is stopgezet vanwege het beëindigen van het Nationaal groeifonds programma.
- **Versterkte aanpak nieuwe industrie:[31]** (2025) Rijksaanpak gericht op het versnellen van de ontwikkeling en vestiging van nieuwe duurzame en strategische industrieën door het wegnemen van knelpunten in vergunningverlening, infrastructuur en financiering.
- **Versnellingsgebieden:[32,33]** in de energie-intensieve industrieclusters. Hierbij wordt gekeken naar geschikte locaties in Nederland en de kwaliteitseisen die aan benodigde ruimte worden gesteld.
- **Actieagenda Elektrificatie Industrie:[34]** Rapport over de belangrijkste knelpunten, waaronder netcongestie en hoge elektriciteitskosten, en concrete acties, gericht op het creëren van de juiste randvoorwaarden voor opschaling van industriële elektrificatie.

Product specifieke Routekaarten Uitvoeringsprogramma Circulaire Maakindustrie

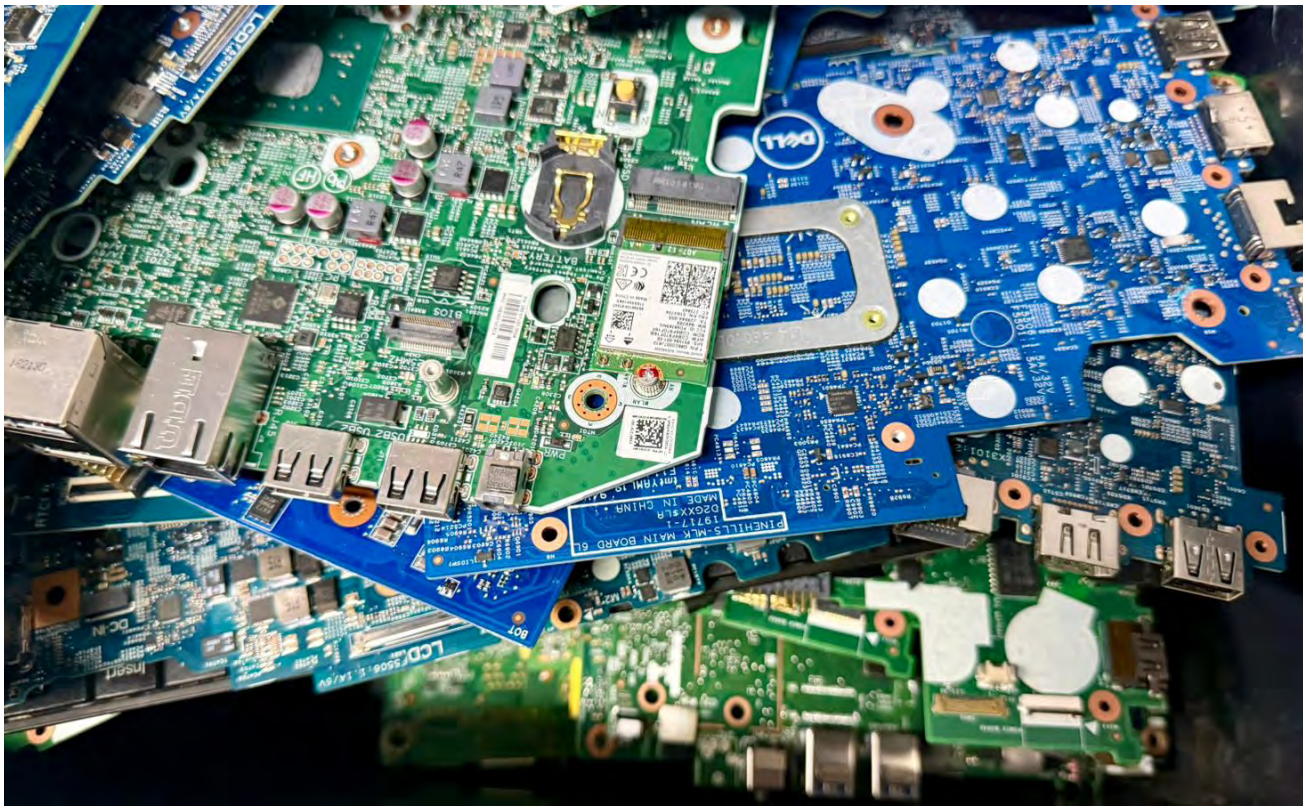
Routekaarten - Circulaire Maakindustrie:[35] Circulaire Windparken op Zee, Circulaire Zonnestroomsystemen & Weerbare Sector, Circulaire Elektrolysers, Circulaire Klimaatinstallaties, Circulaire en Weerbare Machinebouw (in ontwikkeling), Circulaire en Weerbare Batterijen en deze Routekaart Kritieke Materialen.

25 https://open.overheid.nl/documenten/ronl-c97cca89a0c360bc012f5d6da3d54dd1844a6d33/pdf.
26 https://batterycompetencecluster.nl/.
27 https://www.nederlandcirculairin2050.nl/nationaal-programma-circulaire-economie/ncpe-2025.
28 https://nederlandsmaterialenobservatorium.nl/.
29 https://www.kia-st.nl/kia-sleuteltechnologieen/actieagendas-nts/actieagenda-process-technologies.
30 https://materialennl-platform.nl/nationale-innovatieagenda-kritieke-grondstoffen/.
31 https://open.overheid.nl/documenten/66811e40-1bdc-4244-a5cd-9282923dd06e/file.
32 https://www.ruimtelijkeordening.nl/onderwerpen/nota-ruimte/nota-ruimte-in-het-kort.
33 https://www.rijksoverheid.nl/documenten/kamerstukken/2025/09/26/aanbieding-onderzoek-ruimte-voor-circulaire-economie-op-bedrijventerreinen.
34 https://www.rijksoverheid.nl/documenten/rapporten/2025/09/05/actieagenda-elektrificatie-industrie.
35 https://circulairemaakindustrie.nl/routekaarten/.

5. Doelen

Het productteam heeft voor deze routekaart onderstaande doelen geformuleerd die bijdragen aan het belang van strategische relevantie, leveringszekerheid en circulaire economie van kritieke grondstoffen en draagvlak genieten in de sector.

1. **Strategische relevantie van Nederland in internationale waardeketens Kritieke Grondstoffen**
   Nederland streeft naar een substantiële en structurele rol in de Europese waardeketens van kritieke grondstoffen, dit impliceert een aandeel van circa 5–10 % in de Europese recycling (inclusief verwerking en raffinage) van geselecteerde kritieke grondstoffen. Hiermee draagt Nederland bij aan leveringszekerheid, strategische relevantie en het behoud van industriële capaciteit.
2. **Bijdragen aan de streefwaarden van de EU Critical Raw Materials Act (CRMA)[36]**
   Nederland ondersteunt de CRMA-streefwaardes voor 2030, waaronder:
   - Minimaal 10 % van de jaarlijkse behoefte aan strategische grondstoffen binnen de EU winnen;
   - Minimaal 40 % binnen de EU verwerken;
   - Minimaal 25 % via recycling benutten;
   - Diversificatie van toeleveringsbronnen, zodat niet meer dan 65 % afhankelijk is van één land buiten de Europese Unie
3. **Bijdragen aan nationale circulaire doelen (NPCE 2035)[37]**
   Nederland streeft naar circulaire prestaties in lijn met het NPCE:
   - 82 % recycling van afval, met minimaal 15 % hoogwaardige recycling;
   - Minimaal 55 % van grondstoffen uit duurzame of secundaire bronnen;
   - 15 % reductie in grondstoffengebruik ten opzichte van 2016.



36 Gemiddelde EU productie data voor de periode 2016-2020 zijn: 8% voor winning, 24% voor verwerking en 12% voor recycling volgens de EUROPEAN COURT OF AUDITORS (https://media.licdn.com/dms/document/media/v2/D4E1FAQG4emEmhC9qtw/feedshare-document-pdf-analyzed/B4EZwgcOqmJgAY-/0/1770070802546?e=1771459200&v=beta&t=j-XQ-DJ2Bd6JBNysWGDwmvs8nPNMqZU_jpJhSVPSDGk).

37 Op dit moment vindt er nauwelijks recycling van kritieke grondstoffen plaats in NL: PBL - https://www.pbl.nl/system/files/document/2025-02/pbl-2025-integrale-circulaire-economie-rapportage-2025-5365.pdf.

6. Oplossingsrichtingen permanente magneten

In hoofdstuk 2 is toegelicht hoe de afbakening van deze routekaart tot stand is gekomen en waarom is gekozen voor een focus op permanente magneten uit offshore windturbines en zonnepanelen als strategisch gekozen eerste casussen. Dit hoofdstuk bouwt daarop voort en beschrijft de geïnventariseerde oplossingsrichtingen en de bijbehorende interventies die nodig zijn om deze oplossingen te realiseren en te versnellen.

6.1 Recyclen van kritieke metalen (zeldzame aardmetalen) uit permanente magneten uit windturbines

Samenvatting

De samenvatting van dit hoofdstuk is onder de algemene samenvatting terug te vinden op pagina 3.

1. Hoe ziet de waardeketen eruit, hoe vervaardigt de industrie kritieke grondstoffen voor permanente magneten uit secundaire grondstofbronnen en wat zijn deze bronnen?

Voor deze routekaart ligt de focus op het recyclen van permanente magneten uit windturbines op zee, waarbij geldt dat veel van de inzichten ook van toepassing zijn op windturbines op land. Deze magneten zijn relatief groot, hebben een hoge materiaalwaarde en zijn bij einde levensduur vaak goed toegankelijk voor demontage.

De terugwinning van deze magneten moet worden gezien als een onderdeel van een bredere, mondiale keten, waarin keuzes in technologie en ketenpositie bepalend zijn voor de uiteindelijke circulaire impact en het terugwinningspotentieel en daarmee het verbeteren van de leveringszekerheid.

Dominantie in de waardeketen

De waardeketen van permanente magneten is een al bestaande, mondiale en sterk verweven keten. Hierin zijn de primaire en de secundaire productie (recycling) sterk met elkaar verbonden. Wereldwijd worden op verschillende locaties de benodigde primaire grondstoffen gewonnen, verwerkt en toegepast in eindproducten. In deze keten speelt China een dominante rol, zowel in de winning en raffinage van zeldzame aardmetalen als in de productie van halffabricaten en permanente magneten, maar ook in de recycling van de magneten is China een belangrijke speler. Daarnaast beheerst China ook al een groot deel van de productie van eindproducten waarin magneten verwerkt zijn, van huishoudelijke artikelen tot auto's. China heeft op dit gebied dus een grote technologische en industriële voorsprong, wat leidt tot een sterke afhankelijkheid voor overige landen in deze mondiale keten.

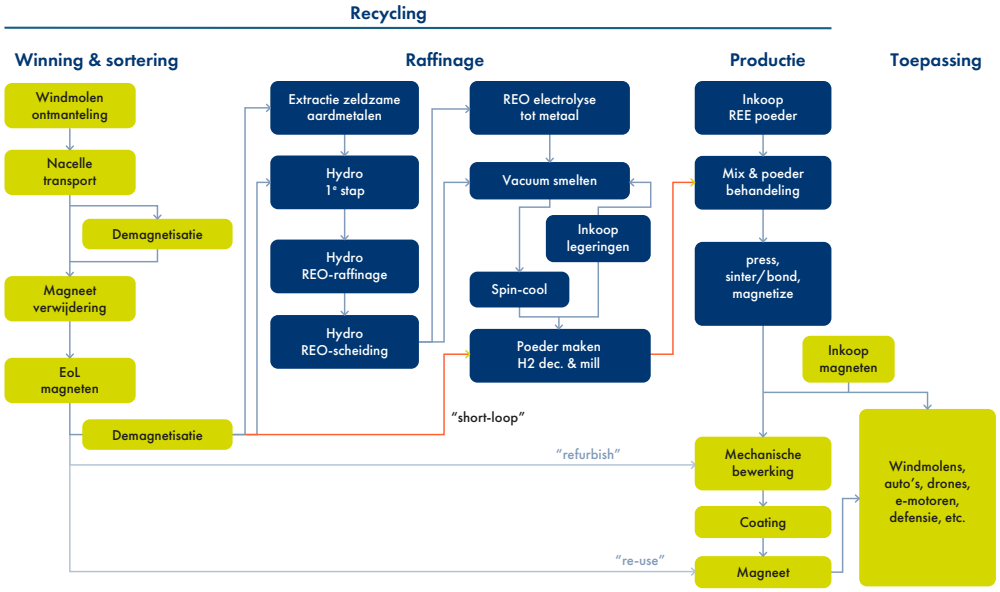
Terugwin potentie permanente magneten uit windturbine

Afhankelijk van technologische mogelijkheden en economische randvoorwaardes kunnen teruggewonnen magneten op verschillende niveaus in de keten worden teruggevoerd. Onderstaande zijn drie hoofdroutes, waarbij deze ook onderling verbonden zijn en materialen en/of halfproducten van de ene route in een andere verwerkt kunnen worden:

- Direct hergebruik of re-manufacturing, waarbij de magneet na bewerking opnieuw wordt ingezet in een windturbine met behoud van materiaalkwaliteit. Deze deels in Nederland reeds toegepaste re-use of refurbish route is geen onderdeel van deze routekaart, maar draagt ook bij aan de doelstellingen. Re-use of refurbish route is geen onderdeel van deze routekaart omdat deze uitvoerig worden besproken in de Circulaire Windparken op Zee.
- Magneten worden verwerkt tot nieuwe magneten van lagere of eventueel vergelijkbare kwaliteit, analoog aan recycling van staalschroot.
- Volledige recycling, waarbij de zeldzame aardmetalen metallurgisch uit de magneten worden teruggewonnen, gescheiden en opnieuw ingezet als grondstof voor de productie van nieuwe magneten of andere toepassingen met zeldzame aardmetalen.

Deze verschillende recycling mogelijkheden in combinatie met de variëteit aan productgroepen en schaalniveaus, maakt dat de waardeketen van permanente magneten complex is. Inzicht hoe de waardeketen er in grote lijnen uitziet is belangrijk om te begrijpen welke voorwaarden, gevolgen, plussen en minnen aan welke keuzes hangen. Een schematisch voorbeeld is gegeven in Figuur 3.

De groene processtappen zijn stappen die momenteel in Nederland worden uitgevoerd, de blauwe processtappen zijn proces onderdelen die momenteel buiten Nederland plaatsvinden. Het geeft aan dat we actief zijn in het begin en het einde van de keten maar (nog) niet in het midden, het raffinage deel van de keten waar een groot deel van de waardecreatie plaatsvindt. Uit de gesprekken met de bedrijven in deze sectoren blijkt dat we in Nederland wel de potentie hebben om een positie op te bouwen in een deel van de raffinage activiteiten.



Figuur 3: Overzicht processtappen en -routes recycling magneten uit offshore windturbines. Groen zijn stappen in NL, Blauw zijn stappen buiten NL.

Routekaart voor windturbine-magneten: van bron tot eindgebruik

Grondstoffenbron – operationele windturbines

De primaire bron van kritieke grondstoffen zijn de magneten in bestaande, operationele windturbines. Deze zijn nog niet beschikbaar voor verwerking, wat een uitdaging vormt voor het opzetten van een rendabele recyclingketen.[38] TNO heeft een inschatting gemaakt van de hoeveelheid windturbines die vanaf 2030 per jaar aan land zullen komen door het einde van de levensduur. Constatering is ook dat veel opererende turbines al verkocht zijn voor hergebruik of magneetrecycling buiten Europa. Het is dus van belang dat voor de resterende windturbines er een strategische keuze wordt gemaakt of en hoe we deze voor de Nederlandse recyclingmarkt willen behouden.

Ontmanteling

Aan het einde van de levensduur worden turbines ontmanteld door de eigenaar of gespecialiseerde partijen. Routes zijn onder andere verkoop voor hergebruik, demontage voor onderdelenwinning, of volledige sloop voor materiaalterugwinning. De nacelle, met daarin generator en magneten, is het belangrijkste focuspunt voor deze routekaart. Andere componenten zoals rotorbladen en masten vallen buiten de scope, hoewel ze relevant zijn voor kosten en logistiek. Zie Bijlage 1 voor een schematische weergave van de (onderdelen in) de Nacelle.

38 SmPo_TNO-Offshore-windpark-decommissioningeng_final.pdf.

Verwerking
In deze fase worden magneten gescheiden van de nacelle en voorbereid voor hergebruik. Nederland heeft enkele gespecialiseerde partijen en verwerkt daarnaast geïmporteerde magneten, wat wijst op een relevante Europese positie. Magneten worden handmatig gedemonteerd, gedemagnetiseerd en gesorteerd op type en kwaliteit, klaar voor doorverkoop of verdere raffinage. Op dit moment is de aanvoer van meer magneten de beperkende factor om de bestaande capaciteit van deze verwerkingsstap volop te benutten.

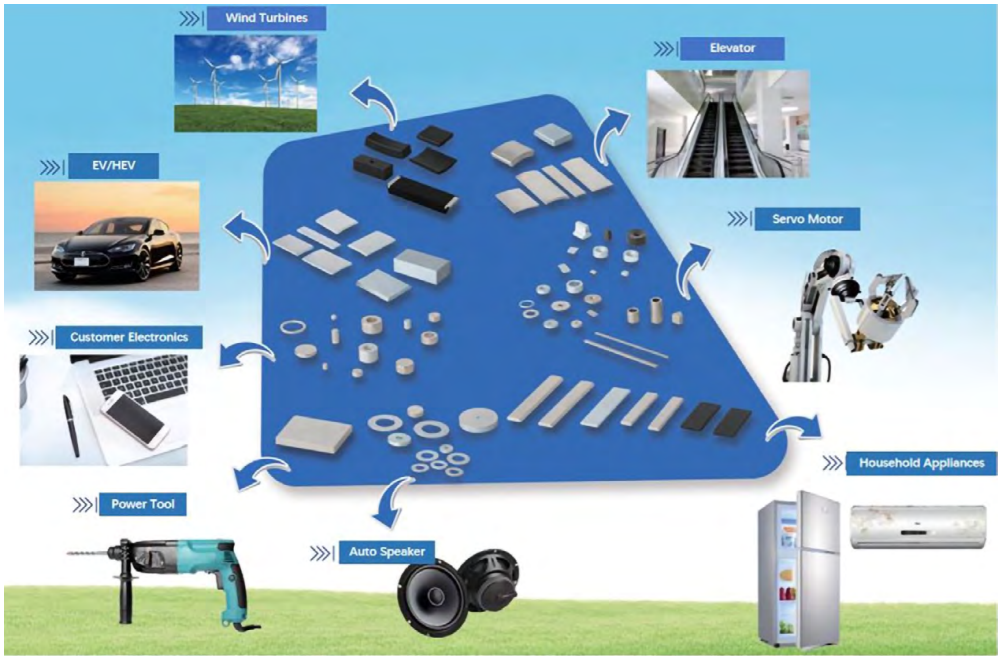
Handel
Na de verwerking komen de magneten bij handelaren terecht, die verschillende routes volgen voor verdere verwerking of hergebruik. Omdat Nederland geen eigen raffinagecapaciteit heeft, worden de magneten doorgaans geëxporteerd, zowel buiten Nederland als vaak buiten Europa. Deze fase vormt de cruciale schakel tussen fysieke verwerking en de metallurgische raffinage in andere landen. Omdat er nu onvoldoende inzicht is in de grootte van deze export stromen zou het aan te bevelen zijn om dit op EU-niveau verder te onderzoeken.

Raffinage
Permanente magneten bestaan uit ijzer en zeldzame aardmetalen zoals neodymium, praseodymium en dysprosium (Nd, Pr en Dy). Permanente magneten hebben een breed scala aan specifieke fysische eigenschappen en daarmee ook aan verschillende hoeveelheden van de specifieke ingrediënten.

Gerecyclede magneten worden buiten Nederland vaak weer verder verwerkt tot zeldzame aardmetalen-poeder of gescheiden zeldzame-aardmetalen. Nederland heeft momenteel geen eigen raffinagecapaciteit om dit te doen, maar wel kennis en bedrijven waarmee deze capaciteit zou kunnen worden opgebouwd. Dit vergt nauwe samenwerking met de Nederlandse overheid om in de benodigde randvoorwaarden voor deze activiteiten te faciliteren en ondernemerschap te initiëren en activeren. Deze worden beschreven in de actielijnen.

Toepassingen
De gerecyclede magneten of poeders van zeldzame aardmetalen worden door eindgebruikers ingezet in nieuwe producten, waaronder windturbines. De zuiverheid van de materiaalstromen bepaalt de technische inzetbaarheid van de stromen in de specifieke eindproducten. Voor leveringszekerheid van kritieke grondstoffen in Europa is het essentieel deze secundaire keten regionaal te sluiten.

De secundaire grondstofstromen van permanente magneten
In eerste instantie is deze routekaart gericht op de verwerking van de magneten die terugkomen vanuit de windturbines. Zoals is te zien in Figuur 4 zijn er echter veel meer toepassingen voor NdFeB magneten en daarmee grondstofbronnen voor permanente magneten.



Figuur 4: Overzicht van inzet permanente magneten. Een uitgebreidere lijst is te vinden in Bijlage 2.

Of het economisch rendabel is om een magneet terug te winnen uit apparaten hangt o.a. af van het formaat van het apparaat of object waaruit de magneet vrijkomt, de hoeveelheid en formaat van de magneten in het object en hoe moeilijk het is om die eruit te krijgen (samengevat: de "mijnbaarheid"). In algemene zin geldt dat een magneet een minimale grootte moet hebben om standalone terugwinning economisch rendabel te maken. In de praktijk vindt magneten-terugwinning echter vaak plaats via co-mining. Producten worden dan primair gedemonteerd om een ander, waardevoller onderdeel terug te winnen. De magneet komt daarbij als bijvangst vrij. Doordat de demontagekosten al zijn gemaakt, wordt het economisch haalbaar om ook kleinere magneten terug te winnen. Dit mechanisme is essentieel voor het opschalen van magnetenterugwinning over meerdere productgroepen zoals elektronica en elektromotoren:
Voor geïntegreerde producten moet de doelstelling nooit zijn om slechts 1 component of grondstof terug te winnen, maar altijd in overweging genomen worden welke grondstoffen nog meer waarde hebben opdat de te maken kosten gedekt kunnen worden door meerdere waardestromen.

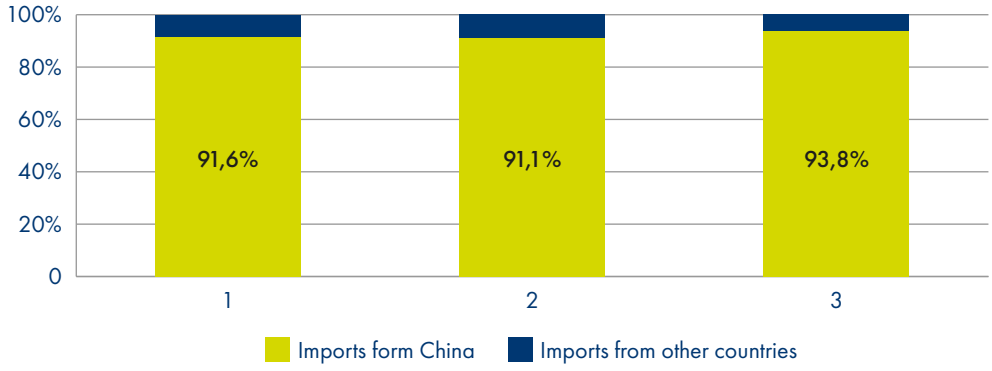
Naast de hoeveelheid magneet in de secundaire grondstofstromen, hebben permanente magneten ook zeer uiteenlopende samenstellingen; o.a. in de hoeveelheid Nd, Pr, Dy. Dat geldt ook voor de permanente magneten die in verschillende types en generaties windturbines verwerkt zijn.

Om diezelfde reden is er ook grote variatie in de vereisten voor de magneten die geproduceerd worden in de recycling processen. De combinatie van input en output samenstelling spelen een grote rol bij de selectie van het recyclingconcept en het ontwikkelen van de proces flowsheet voor de magneetproductie.

2. Wat is de marktomvang voor permanente magneten?

Groeiende import uit China

Figuur 5 toont de groeide importafhankelijkheid van Europa en Nederland van China op de permanente magnetenmarkt. Om deze afhankelijkheid tegen te gaan en leveringszekerheid te borgen en de Europese productieketens toekomstbestendig te maken zullen zo snel mogelijk alternatieve, strategische en veelal circulaire toestromen van materiaal en componenten en bijbehorende verwerkingscapaciteit moeten worden ontwikkeld.



Figuur 5: Import van permanente magneten met zeldzame aardmetalen in de EU, data Eurostat.

Europese en Nederlandse vraag naar (kritieke grondstoffen voor) permanente magneten

De wereldwijde vraag naar permanente magneten met zeldzame aardmetalen wordt verwacht van 250 kton/jaar in 2025 tot 300 kton[39] in 2030 te groeien. Het EU-aandeel[40] daarvan is ca. 10% en het Nederlandse aandeel ca. 1%. Dit is gebaseerd op het Nederlandse aandeel in algemene consumptie van Europa van 10%. Dit komt voor Nederland neer op ongeveer 3000 ton permanente magneten materiaal met zeldzame aardmetalen per jaar.

39 Arafura Rare Earths Annual Report 2023: Supply and Demand - Arafura.
40 EU vraag naar zeldzame aarden als % van Chinese Export; China Tax Report 2025.

Vraag ('000 ton/jaar - magneet equivalent)	**2025**	**2030**	**2035**	**Aandeel van wereldmarkt**
Wereldwijd	250	300	500	100%
EU	25	30	50	10%
Nederland	2,5	3	5	1%

Tabel 1: Huidige en toekomstig verwachte consumptie van NdFeB magneten in kiloton per jaar. Belangrijk is de verwachte verdubbeling in consumptie tussen nu en 2035, wat ook een verdubbeling aan winning, verwerking en recyclingcapaciteit vergt in lijn met streefwaardes CRMA.

Europese doelstellingen raffinagecapaciteit vs. geïnstalleerde capaciteit

Het Europese CRMA streven om 25% van de totale vraag (30 kton/jaar) af te dekken uit eigen recycling komt overeen met 7,5 kton/jaar aan recycling en productie van permanente magneten binnen Europa. De bestaande capaciteit en de capaciteit in aanbouw inclusief raffinage ligt momenteel op 4,7 kton/jaar en dekt daarmee minder dan 15% t.o.v. de beoogde 25%. Dit biedt ook in Nederland uitbreidingspotentie van de recyclingindustrie voor kritieke grondstoffen. Om een kwantitatieve indicatie te krijgen van de marktomvang van de benodigde recycling capaciteit om aan de 25% Europese streefwaarde te voldoen, wordt hieronder gerekend met de geschatte vraag naar permanente magneten in Nederland in 2030 en 2035. Uiteraard is het niet wenselijk dat elk land in Europa zijn eigen volledige productie keten zou gaan opzetten; de getallen zijn bedoeld om een ordegrootte weer te geven van de mogelijke markt omvang.

De geschatte vraag in Nederland naar permante magneten in 2030 is 3 kton/jaar, waarvan volgens de 25% doelstelling **750 ton per jaar** uit recycling moet komen. Er zal naar verwachting dus voldoende marktvraag naar gerecyclede magneten zijn. Momenteel is echter de prijs van gerecyclede magneten vele malen hoger dan magneten geïmporteerd vanuit landen buiten de EU. Dit is een van de oorzaken dat er geen aantrekkelijke business case is voor bedrijven in Nederland om in deze markt te stappen. De Nederlandse overheid zal de benodigde randvoorwaarden moeten creëren om bestaande bedrijven te activeren om deze capaciteit op te bouwen. De acties voor de overheid worden beschreven in de actielijnen.

Potentieel aanbod magneten in Nederland voor recycling

Als aangegeven in bijlage 2 bestaan er meerdere grondstoffenbronnen voor de recycling van permanente magneten in Nederland; windturbines, auto's, elektrische apparaten en elektronica. Allemaal met een verschillende hoeveelheid en samenstelling van magneten.
Het is complex om van al deze stromen, een betrouwbaar getal van de omvang te geven. Wel heeft TNO (2025, "Offshore windpark decommissioning" berekend hoeveel permanente magneten er vanaf 2030 per jaar beschikbaar zouden komen voor recycling vanuit de windparken op de Zuidelijke Noordzee. Dit komt neer op: 200 ton per jaar in 2030 en 600 ton per jaar in 2035.

Voor het halen van de 25% doelstelling (750 ton) zal dus ook materiaal uit andere stromen moeten komen. Een ruwe schatting van het productteam voor de volumes van de overige mogelijke stromen is hieronder in de tabel samengevat. Dit laat zien dat inclusief de 200 ton uit windturbines, het totale aanbod van te recyclen magneten in 2030 slechts 600 ton zou bedragen en in 2035 1700 ton.

Deze ruwe berekening:

- Neemt aan dat 100% van de in NL aanwezige grondstoffenbronnen ook daadwerkelijk beschikbaar komt voor verwerking.
- Laat buiten beschouwing het feit dat een deel van de windturbines en daarmee de turbines reeds verkocht zijn t.b.v. verwerking. Hoeveel van deze verkopen aan partijen buiten Nederland of Europa is gedaan is onbekend, maar heeft ook mogelijk negatieve impact op beschikbare volumes t.b.v. de 750 ton doelstelling voor NL.

Recyclingcapaciteit NL (ton/jaar REE- magneet equivalent)	2025	2030	2035	*Opmerking*
Recycing van turbines wind op zee	0	200	600	Aanname: 5% jaarlijkse capaciteit gerecycled
Recycling vanuit transport industrie	0	200	600	Aanname: 100.000 EV's gerecycled in 2030 (2 kg / auto)
Recycling vanuit electronics industrie	0	100	250	Aanname: ca. 2 miljoen HDD units / jaar gerecycled in 2030
Recycling vanuit overige industrie	0	100	250	Aanname: 100 ton restmateriaal gerecycled in 2030
Totaal ton per jaar	0	600	1700	

Tabel 2: Data aangaande mogelijke beschikbaarheid End-of-life magneten in Nederland (Berekening TNO wind power report, CEPS).[41]

Marktwaarde

De belangrijkste kritieke grondstoffen in permanente magneten zijn neodymium, praseodymium en dysprosium, waarbij neodymium en praseodymium doorgaans als NdPr-legering worden geproduceerd. De mondiale marktwaarde van permanente magneten wordt sterk bepaald door de volatiliteit van de NdPr-prijs op de door China gedomineerde markt. Dit leidt niet alleen tot prijsstijgingen bij schaarste, maar ook tot het risico dat China bij opbouw van recyclingcapaciteit buiten China langdurige prijsdruk kan uitoefenen, waardoor businesscases onder druk komen te staan. Europese en Nederlandse inzet vereist daarom naast capaciteitsopbouw ook bescherming tegen ongunstige marktomstandigheden.

Door geopolitieke spanningen wordt richting 2030 een stijgende prijsontwikkeling verwacht. Bij een geschatte mondiale consumptie van circa 300 kton per jaar komt dit neer op een gemiddelde prijs van ongeveer 165 US$/kg voor permanente magneten. Voor Europa, met circa 10% van de wereldvraag, betekent dit een marktwaarde van ongeveer € 5 miljard in 2030 en circa € 500 miljoen voor Nederland. Uitgaande van het CRMA-streven van 25% recycling komt dit neer op circa € 1,25 miljard per jaar in Europa en € 125 miljoen per jaar voor Nederland.

Europese magneten zijn volgens meerdere bronnen twee tot vijf keer duurder dan niet-Europese alternatieven, een verschil dat naar verwachting blijft bestaan. Ondanks dit prijsverschil bestaat door geopolitieke spanningen momenteel vraag naar in Europa geproduceerde magneten. Deze vraag blijft echter kwetsbaar en kan snel afnemen bij afnemende spanningen, sterke prijsdalingen van niet-Europese magneten of technologische doorbraken, zoals de ontwikkeling van REE-vrije magneten.

Conclusie

In totaal zou in Nederland vanaf 2030 ca. 600 ton per jaar aan magneten voor recycling ter beschikking kunnen komen in Nederland vanuit verschillende stromen. Een fabriek van deze orde grootte zou een geschatte omzet van € ~100 mln per jaar opleveren op basis van bovenstaande prijs inschattingen. Het feit dat er in Nederland nauwelijks tot geen ondernemingen actief zijn om in deze markt te stappen wordt veroorzaakt doordat er geen makkelijke rendabele business case is en de randvoorwaarden in Nederland ontoereikend zijn. De Nederlandse overheid heeft hier een activerende en initiërende rol in te spelen, die samen zal moeten gaan met financiële commitments, zoals dit ook in andere Europese landen gebeurt.
In de actielijnen staat een plan opgenomen voor het opzetten van een dergelijke fabriek in Nederland.

41 https://cdn.ceps.eu/wp-content/uploads/2023/07/CEPS-In-depth-analysis-2022-07_Supply-chain-for-recycled-rare-earth-permanent-magnets-1.pdf.

3. Welke verwerkingscapaciteit stellen we voor (functie en plek in waardeketen) & in hoeverre behalen we daarmee de gestelde doelstellingen?

Het schema hieronder: toont drie mogelijke strategieën voor de Nederlandse magnetenrecycling- en raffinagesector en hun verwachte impact op nationale en Europese doelstellingen:

- **Optie 1: Behouden van de status quo –** geen uitbreiding of investeringen; bestaande capaciteit en processen blijven zoals ze zijn.
- **Optie 2: Opschalen van output van de verwerkingsketen door bestaande ketenpartners met grotendeels bestaande verwerkingscapaciteit** door meer steady input van te recyclen magneten te orkestreren door op langere termijn magneten uit bestaande windturbines nu zeker te stellen en op korte termijn magneten inzameling en demontage uit overige stromen (o.a. auto's, elektronica en elektrische apparaten) mogelijk te maken.
- **Optie 3: Opschalen van output van de verwerkingsketen én opbouwen van raffinagecapaciteit op selectieve plaatsen in de keten –** naast opschaling van bestaande verwerkingscapaciteit wordt bij deze optie nieuwe raffinagecapaciteit ontwikkeld op die stappen in de keten waar we in Nederland reeds partijen hebben die hier kennis op hebben en waar synergieën met bestaande bedrijfsprocessen en technologieën zijn, te weten: extractie zeldzame aardmetalen, vacuüm smelten en spin-cool & press (zie rode kaders in de flowchart Figuur 6).

We stellen bewust niet voor om capaciteit op te bouwen in de zeer kennis- en R&D intensieve stappen waar we in Nederland binnen afzienbare tijd geen rol kunnen spelen omdat we er geen relevante partijen actief in hebben, te weten: hydrometallurgie en elektrolyse van zeldzame aardmetalen-oxides tot metaal. We zoeken hier in internationale samenwerking wel de aansluiting bij Europese partijen die hier wel capaciteit en kennis voor hebben.

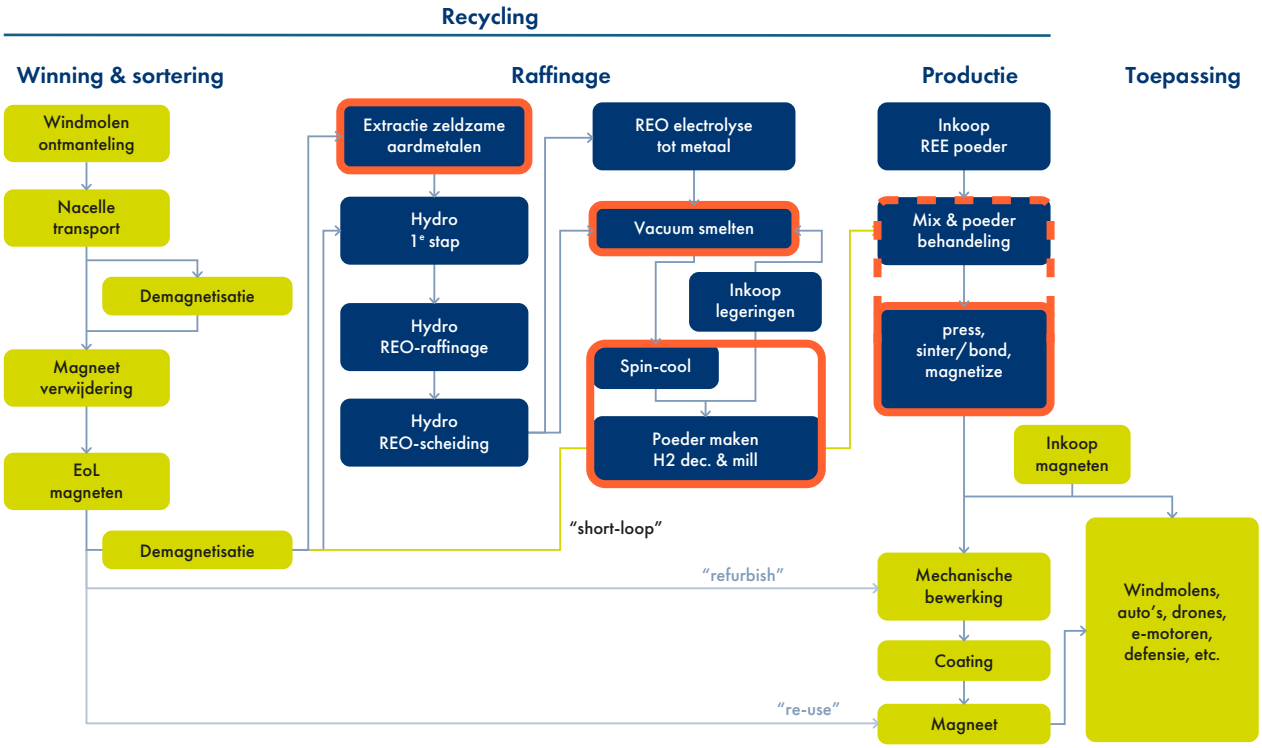
Optie	Doelstellingen behaald?
Optie 1: Behouden status quo	❌ Europese doelstellingen ❌ Nederlandse doelstellingen ❌ Seat at the table
Optie 2: Versterken/opschalen bestaande capaciteit	⚠️ Beperkte bijdrage aan doelstellingen
Optie 3: Versterken + opbouwen refining capaciteit	✅ Seat at the table ✅ Europese doelstellingen (voorzichtig) ⚠️

Tabel 3: Doelstelling - optie - resultaat tabel voor magneten uit offshore windturbines.

Wanneer, met wie en hoe gaan we dit doen

Op schaal - ambitieus maar realistisch

Het voorstel is om te streven naar een extra verwerkings- en raffinagecapaciteit in Nederland van 0.6 kton/jaar in 2030 (20% van de geschatte Nederlandse vraag naar Rare Earth materiaal voor magneten en 1.2 kton/jaar in 2032), specifiek in de reeds bestaande verwerkingsketen in Nederland en op een of meer van de volgende raffinage stappen: extractie van zeldzame aardmetalen, vacuüm smelting en spin-cool & press, omcirkeld in rood in onderstaande flowchart.



Figuur 6: Overzicht eerste mogelijkheden magneet-industrie in Nederland. Groen zijn stappen in NL, blauw zijn stappen buiten NL, rood omlijnd zijn potentiële stappen in NL. "H2 dec." staat voor waterstof decrepitatie, "mill" voor malen bv door jet milling.

Er zijn in Europa reeds diverse bedrijven actief in de verschillende hierboven genoemde ketenstappen van de magneetproductie.

Het ruimtebeslag van bedrijven die zich richten op de verwerking van kritieke grondstoffen is sterk afhankelijk van de gekozen productiestappen en de beoogde verwerkingscapaciteit. Hoewel vaak wordt gesproken over "fabrieken", gaat het in de praktijk meestal om industriële hallen zonder zware industriële uitstraling of grootschalige emissiebronnen. De verwerking van zeldzame aardmaterialen en end-of-life (EoL) magneten vindt doorgaans plaats in relatief compacte installaties, omdat de volumes aan materiaal beperkt zijn in vergelijking met traditionele bulkindustrie.

Moderne installaties waarin stappen plaatsvinden om geconcentreerde zeldzame-aarde-oxides of gerecyclede magneten te verwerken tot nieuwe magneten hebben over het algemeen een relatief klein ruimtebeslag. Bedrijven die in Europa reeds een bestaande locatie en proces hebben, hebben over het algemeen een ruimtebeslag van minder dan 5 hectare.

Deze voorbeelden laten zien dat de ruimtelijke impact van dergelijke activiteiten in verhouding beperkt is, wat relevant is in de Nederlandse context waar beschikbare industriële ruimte schaars is en ruimtelijke inpassing een belangrijke factor vormt in besluitvorming en maatschappelijke acceptatie.

Tijdig én gefaseerd

Gegeven de urgentie van het zekerstellen van de leveringszekerheid voor permanente magneten in Nederland en Europa is het van belang zo snel mogelijk te starten met het uitbouwen van huidige capaciteit en opbouwen van nieuwe delen van de keten. Helemaal gegeven het feit dat het opbouwen van dergelijke ketens en raffinagecapaciteit complex is, economisch risicovolle (zij het geopolitiek volstrekt logische) investeringen vergt, en vooralsnog langdurige vergunningstrajecten vergt. Deze routekaart voorziet dan ook in het zo snel mogelijk opstellen van een eerste demo plant van 100 ton per jaar (TRL 9), omdat hiermee snel tractie wordt verkregen, de eerste ingezamelde magneten verwerkt kunnen worden en training van personeel en opbouw van het ecosysteem echt kan beginnen voor de 600 ton/jaar fabriek.

Met wie

Overheid:

Het feit dat er in Nederland nauwelijks tot geen ondernemingen actief zijn om in deze markt te stappen wordt veroorzaakt doordat er geen rendabele business case is en de randvoorwaarden in Nederland ontoereikend zijn. De Nederlandse overheid heeft hier een activerende en initiërende rol in te spelen, die samen zal moeten gaan met financiële commitment, zoals dit ook in andere Europese landen en in onder andere de VS gebeurt. In de actielijnen is opgenomen wat nodig is voor het opzetten van een dergelijke fabriek in Nederland.

Bestaande Bedrijven:

Nederland beschikt over een breed scala aan bedrijven die weliswaar momenteel nog niet actief zijn in de keten van zeldzame aardmetalen en magneten, maar die potentieel wel een rol kunnen vervullen gegeven hun specifieke kennis en synergiën met bestaande processen en activiteiten. Het vroegtijdig betrekken van deze partijen is cruciaal: gezamenlijk kan o.a. worden vastgesteld wat hun positie is in de keten, welke samenwerkingsovereenkomsten nodig zijn en hoe hun bestaande middelen en expertise optimaal kunnen worden ingezet in de keten en wat er nodig is voor deze partijen om een rendabele, financierbare en uitvoerbare business case te creëren. Voor sommige proces stappen of capaciteitsuitbreidingen zijn er al bedrijven in Europa actief die mogelijk interesse hebben om zich ook in Nederland te vestigen.

Financiers:

Gegeven de complexiteit van de magneten keten, zowel door het brede scala aan technologische processen als de exposure aan een veelvoud van zeer specifieke en volatiele grondstoffenmarkten is het van belang dat ook mogelijke publieke en private financiers voor de op te bouwen raffinagecapaciteit vroegtijdig aan tafel zitten. Zo ontstaat er vroegtijdig een juist beeld van de risico's en welke partijen hier het beste voor opgesteld staan. Ook is het van belang om de Nederlandse ambities vanuit deze routekaart vroegtijdig "in Europa" toe te lichten en te agenderen, opdat het mandaat voor het door de Europese Commissie aangekondigde bedrag van 3 miljard Euro zodanig wordt geformuleerd dat Nederland hier aanspraak op kan maken voor een deel van de financiering van de investeringen beschreven in deze routekaart. Invest-NL kan een goede rol spelen in het in eerste instantie bijeenbrengen van deze publieke en private partijen, het mobiliseren van Europese gelden en is wellicht ook zelf een van de aangewezen partijen in de financieringen.

Europa:

Afstemming en samenwerking op Europees niveau over wie doet wat is cruciaal maar uitdagend.
Een manier om hier strategische sturing op te krijgen, is het opstellen van een zogeheten 'kritieke grondstoffen zuiverheid cascaderingsladder'. Hierin worden voor de verschillende industrieën de gemiddelde gevraagde zuiverheid van een kritiek materiaal benoemd. De meest strategisch belangrijke sectoren zoals semicon en defensie vragen om het hoogste niveau van zuiverheid. Vanwege de hoge strategische prioriteit en de gealloceerde middelen voor deze sectoren, zijn zij bereid om te betalen voor deze zuiverheid. Vervolgens kunnen secundaire stromen worden gedirigeerd naar de sectoren die minder hoge niveaus van zuiverheid nodig hebben. Zo ontstaat er een cascade van markten waarin de benodigde zuiverheid van secundaire stromen daalt. Het gaat niet om een glijdende schaal van zuiverheid, maar meer stapsgewijze daling van gewenste zuiverheden. Deze zuiverheidsladder biedt ook gelijk een benchmark voor het kwaliteitsniveau waarop secundaire stromen moeten worden opgewaardeerd willen ze een bepaalde markt kunnen bedienen.

6.2 Actielijnen Permanente magneten

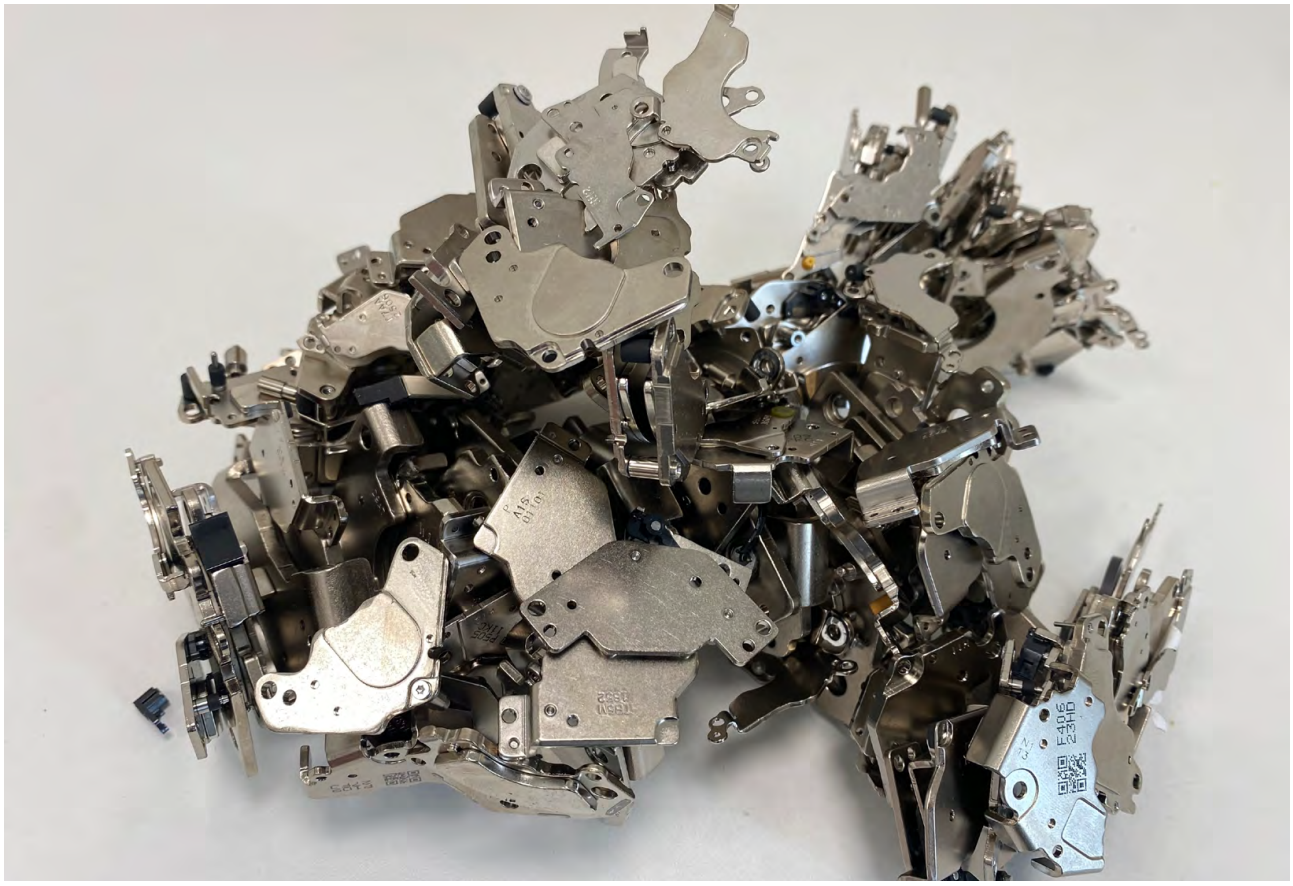
De huidige marktsituatie levert voor het recyclen van permanente magneten in de meeste gevallen geen autonome businesscases op voor bedrijven om zelfstandig te investeren in nieuwe verwerkings- en raffinagecapaciteit. Deze businesscase is voor opschaling momenteel in sterkere mate afhankelijk van aanvullende markt- en beleidscondities. Daarom ligt de bal in eerste instantie bij de overheid. Acties moeten zich richten op het creëren van randvoorwaarden waaronder bedrijven wél kunnen investeren, waaronder ketenregie, investeringszekerheid, risicodeling, concurrerende energieprijzen, snellere en voorspelbare vergunningverlening en actieve vraagcreatie.

Hieronder zijn concrete actielijnen opgenomen voor het creëren van de juiste randvoorwaarden met als doel dat investeringen mogelijk gemaakt worden en er daadwerkelijk uitbreiding komt van de fysieke productiefaciliteiten voor het recyclen en opwerken van deze materiaalstromen.

Hoe zijn de acties opgebouwd?

- Actie 1 gaat over het aanwijzen en nemen van verantwoordelijkheden.
- Actie 2 is de daadwerkelijke uitbreiding van capaciteit.
- Acties 3 - 7 gaan over de randvoorwaarden die nodig zijn voor deze realisatie:
  - Inzameling, logistiek en voorraadbeheer
  - Marktontwikkeling & vraagcreatie Europese magneten
  - Financiering & investeringsinstrumenten
  - Beleidskaders & normering
  - Opbouw & ontsluiten kennis, innovatie & vaardigheden – voor een toekomstbestendige sector

Binnen het bredere systeem voor circulaire materialen zijn reeds diverse interventies en ontwikkellijnen in gang gezet, onder andere via de Kennis- en Innovatieagenda Circulaire Economie (KIA CE). De in dit document voorgestelde actielijnen dienen hiermee in samenhang te worden beschouwd, waarbij overlap met bestaande initiatieven mogelijk is en benut moet worden voor versnelling en schaalvoordelen.



1. Governance: Ketenregie & strategische industriepolitiek – beleids- en actieverantwoordelijken

2026

Regie:

- Aanstellen Orchestrator (voor verdere uitleg zie bijlage 4).

Eigenaarschap:

- Besluit over ministerieel eigenaarschap: welk Ministerie is eindverantwoordelijk voor het succesvol implementeren van de overeengekomen actielijnen uit de Routekaart: (EZK/ I&W).
- Commitment vanuit de overige ministeries (EZK/I&W/Defensie/BuZa/en anderen) om gericht bij te dragen aan overeengekomen actielijnen.

Strategische Prioriteit:

- Aanwijzen magneten als prioritaire keten binnen CRMA/NPCE/UPCM en hier de benodigde middelen en beleidswijzigingen aan koppelen.
- Strategische projecten Europese Commissie – Europese en Nationale Investerings Banken.

Actie

- Plan van aanpak ketenregie opstellen, vaststellen en betrekken van voornaamste actoren (bedrijven, publieke partijen en financiers, in Nederland en Europa).

2027-2030

- Vastleggen en beschermen strategisch relevante bedrijven, in samenspraak met Europa (voorbeelden; Beschermingsvoorziening Economische Veiligheid, prijs/ afname garanties in geval van neerwaartse prijsdruk derde landen).
- Selectief en gefaseerd opschalen keten regie naar EU-niveau.

Na 2030

- Bestendigen ketenregiemodel voor meerdere kritieke grondstoffen.

2. Uitbreiding en opschaling van verwerkings- en raffinagecapaciteit in Nederland

2026-2027

- Final Investment Decision (FID) genomen op beoogde uitbreidingscapaciteit verwerkingsstappen (demontage en demagnetisatie).
- FID genomen op demo-installaties raffinagecapaciteit (±100 ton/jaar) voor extractie zeldzame aardmetalen, vacuümsmelten en/of Spin-cool & Press, om processen te valideren op verschillende reststromen (input) en de waardeketen in Nederland op gang te brengen.
- Uitvoeren internationale markt of opportunity scan om Europese bedrijven aan te trekken voor vestiging in Nederland.

2027-2030

- Opschaling installaties naar commerciële raffinagecapaciteit (±600 ton/jaar).

Na 2030

- Verdere opschaling raffinagecapaciteit (±1200 ton/jaar) in lijn met marktontwikkeling.

3. Inzameling, logistiek en voorraadbeheer - randvoorwaarden

2026-2027

Organiseren logistieke keten

- Maken plan van aanpak t.b.v. centrale inzameling, transport en opslag van feedstock (verschillende magneten uit verschillende ketens) in nauw overleg met bestaande partijen om bestaande business-modellen niet te verstoren en samen te werken met bestaande partijen naar een toekomstigbestendig businessmodel.
- Aanwijzen ketenverantwoordelijke partij inzameling

- Specifiek plan van aanpak op magneten uit windturbines, inclusief benodigde financiering van opkoop voorraad en voorraadbeheer/ commitment met als doel de magneten uit bestaande windparken zo ver mogelijk zekerstellen voor verwerking in Europa/NL en export voorkomen.
- Aanvang daadwerkelijke centrale inzameling en overheidscoordinatie.

2027-2030

- Opschaling inzameling van permanente magneten.
- Inrichten tijdelijke stockpiling (fysiek en financiering) van secundaire grondstof stromen t.b.v. feedstock verwerkings- en raffinagecapaciteit.

Na 2030:

- Volledig gesloten Europees voorraad- en inzamelingsysteem voor (kritieke grondstoffen uit) permanente magneten.

4. Marktontwikkeling & vraagcreatie Europese magneten - randvoorwaarden

2026-2027

Organiseren marktvraag

- Analyse van het Europees speelveld en inzicht in de barrieres van Europese projecten incl. rol van Nederland hierin.
- Analyse kostprijs in Europa geproduceerde magneten vs geïmporteerde magneten en inventariseren mogelijke vraagcreatie instrumenten om dit gat te dichten, op Nederlands en Europees niveau, incl. strategische inzet inkoopbeleid van de overheid (Governmental Purchasing Power).
- Betrekken Europese strategic offtakers (energie, automotive, hightech, defense).
- Actie beleidskalender: opstellen zuiverheid cascaderingsladder samen met Europese kennisinstituten, NMO en JRC.

2027-2030

- Overheid: Ontwikkeling en inzet vraagcreatie-instrumenten op EU-niveau en waar mogelijk nationaal.
- Business development: activeren en faciliteren individuele Business-to-Business introducties en connecties in de sector op nationaal en Europees niveau.

Na 2030

- Volwassen markt met stabiele prijsmechanismen voor Europese magneten.

5. Financiering & investeringsinstrumenten- randvoorwaarden

2026-2027

Organiseren financiering

- Publieke fondsen vrijmaken t.b.v. co-financiering eerste demo-installaties raffinagecapaciteit (±100 ton/ jaar) en/of specifiek fonds kritieke grondstoffen optuigen in Nederland, naar voorbeeld van bestaande initiatieven in Duitsland, Italië en Frankrijk.[42]
- Kwantificeren benodigde financiering uitbreidings- en nieuwe (raffinage) capaciteit.
- In kaart brengen beschikbare EU- en NL- publieke en private fondsen voor deze specifieke (~TRL 9) capaciteit en doeleinden.
- Financieringsgat vaststellen (omvang en specificaties).
- Nieuwe instrumenten ontwikkelen, i.s.m. publieke en private financiers in EU en NL.
- Specifieke sector casuïstiek aanhangig maken in Europa, en bij scoping mandaat Nationale Investeringsbank (Rapport Wennink): o.a. de financiering van fabriekscapaciteit met hoge TRL-levels met publiek kapitaal (~TRL 9).

42 Frankrijk, Duitsland en Italië hebben nationale investeringsplannen kritieke grondstoffen aangekondigd in 2024, om essentiële grondstoffen veilig te stellen voor de energietransitie. Frankrijk, BPI france, investeert € 500 miljoen in samenwerking met Infravia Capital Partners, met als doel € 2 miljard op te halen. In april 2025 Bpifrance hosts the French-Norwegian Forum for the green industry - Bpifrance.com. Italië heeft een "Made in Italy" fonds opgericht met een initiële investering van € 1 miljard, gericht op de strategische toeleveringsketen. Ecological and digital transition: focus on critical raw materials | CDP en InvestEU: agreement between CDP and MIMIT to facilitate the energy transition. Duitsland, KFW heeft € 1 miljard toegewezen, beheerd door de Development Bank, met Details van de KfW. Projecten in de mijnbouw, verdere verwerking en/of recyclingsectoren komen in aanmerking

2027-2030

- Financiering voor opschaling installaties naar commerciële capaciteit (±600 ton/jaar).

Na 2030

- Structurele financieringsarrangementen voor waardeketens rondom kritieke grondstoffen.

6. Beleidskaders & normering - randvoorwaarden

2026-2027

Organiseren vergunningsverlening:

- Inventarisatie concrete knelpunten vergunningverlening & regelgeving:
  - Het borgen van sectorspecifieke kennis bij de Omgevingsdiensten of OD-NL. Geadviseerd wordt om een pool met ervaren vergunningverleners van de verschillende OD's op te zetten die geraadpleegd kunnen worden bij lastige casussen, ondersteund door een pool van industrie-experts die kunnen adviseren.
  - Regulatory sandboxes creëren[43] voor de eerste demo-installaties raffinagecapaciteit (±100 ton/jaar), i.s.m. bevoegd gezag en mogelijk defensie.
  - Vrijstellen van ontwikkelingen en testen met afval van vergunningsverplichtingen.
  - Agenderen van en pleiten voor aanpassing van REACH voorwaarden voor kritieke grondstoffen in Europa.
  - Benutten mogelijkheden voor projecten met kritieke grondstoffen om in aanmerking te komen voor (regionale) versnellingstrajecten onder de NZIA.

Energievoorziening & netaansluiting:

- In kaart brengen energiebehoefte demo-installaties, flexibiliteit t.b.v. netcongestie en identificeren geschikte locaties.
- Borgen van internationaal concurrerende energie- en nettarieven voor energie-intensieve strategische industrieën, in vergelijking met landen waar momenteel kritieke grondstoffen worden verwerkt, als randvoorwaarde voor investeringsbeslissingen in raffinage- en verwerkingscapaciteit (voortbouwend op de aanbevelingen uit het rapport Wennink).

Ruimtevraag

- In kaart brengen benodigde ruimte en kwaliteitseisen/randvoorwaarden waaraan deze moet voldoen (bv beschikbare logistiek, utilities en milieu categorie). Koppelen aan ruimtelijk economisch profiel van de industriele clusters.

Handelsvoorwaarden:

- Verkenning van aanvullende Europese handelsinstrumenten ter regulering van strategische en kritieke grondstoffen/ goederen, zoals de CRMA en het Wassenaar Arrangement.[44]
- T.b.v. feedstock: Europese exportbeperking secundaire grondstoffen voor kritische grondstoffen zoals verkend wordt n.a.v. Resource EU.
- T.b.v. offtake in Europa geproduceerde magneten: bijv. European content verplichting zoals mogelijk wordt opgenomen in de CRMA.

2027-2030

- Borging vergunningen, fysieke ruimte, netaansluiting en energievoorziening t.b.v. bouw van commerciële raffinagecapaciteit (±600 ton/jaar).

Na 2030

- Optimale mobilisatie van privaat kapitaal voor de circulaire kritieke grondstoffen sector, door lange termijn investeringszekerheid dankzij stabiel, integraal, en sectorspecifiek beleidskader.

43 Gestructureerde omgevingen waarbinnen innovatieve technologieën getest kunnen worden in nauwe samenwerking met toezichthouders (Wennink rapport).

44 Home - The Wassenaar Arrangement.

7. Opbouw & ontsluiten kennis, innovatie & vaardigheden - randvoorwaarden

2026-2027

Organiseren innovatie ecosystemen

- Inventariseren bestaande kennis en know-how bij onderwijs- en kennisinstellingen in relatie tot behoefte van de industrie praktijk en opstellen beleidsplan.
- Uitschrijving "Toekomstbestendig grondstoffenonderwijs in Nederland" waarbij instellingen kunnen deelnemen aan en kans maken op een sterk gesubsidieerd actieplan door hun visie op grondstoffen-onderwijs op gebied van metallurgie, metaal- en materiaalkunde neer te leggen, waarbij een nadruk ligt op praktische en industriële relevantie naast innovatie.
- Opstellen lijst van innovatie behoeftes uit de verschillende actieagenda's van de procestechnologie.

2027-2030

- Om deze specialistische sector nieuw leven in te blazen, zetten we bestaande kennis en expertise bij Nederlandse kennisinstellingen gericht in. Opleidingen en onderzoek worden herontwikkeld op MBO-, HBO- en universitair niveau, met een geconcentreerde aanpak bij een beperkt aantal instituten om diepgaande expertise duurzaam te waarborgen.
- Opzetten cluster "Kritieke Grondstoffen" gelijk aan het Battery Competence Center met als doel dat bedrijven, start-ups, kennisinstellingen en overheid kunnen samenwerken op het gebied van kritieke grondstoffen.
- Toekennen van de subsidie voor geselecteerde uitgewerkte toekomstbestendige onderwijsprogramma's om kennis te borgen vergelijkbaar met de benadering voor MMIP Kernenergie.[45]
- Doorontwikkeling proces- en keteninnovatie.

Na 2030

- Structureel kennis- en innovatie-ecosysteem voor kritieke grondstoffen in NL/EU.

45 https://www.rijksfinancien.nl/memorie-van-toelichting/2025/OWB/XXIII/onderdeel/3149907. Dit is een mooi voorbeeld hoe kennis gestimuleerd kan worden, zeker waar deze kennis als strategisch erkend wordt.

7. Oplossingsrichtingen zonnepanelen

7.1 Recyclen van (kritieke) grondstoffen uit PV Panelen.

Samenvatting

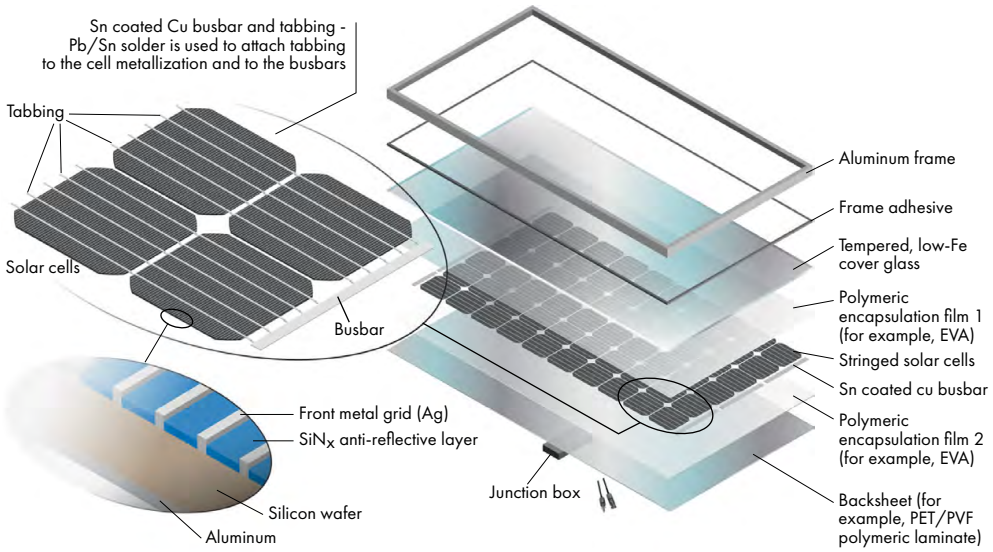
De samenvatting van dit hoofdstuk is onder de algemene samenvatting terug te vinden op pagina 3.

1. Hoe ziet de waardeketen eruit voor het verwerken van End of Life Zonnepanelen?

De waardeketen voor het recyclen van kritieke grondstoffen uit zonnepanelen ofwel PV-panelen verschilt wezenlijk van die van permanente magneten. Waar bij magneten het sluiten van bestaande materiaalstromen met hoge concentraties kritieke metalen centraal staat, ligt bij zonnepanelen de nadruk op het beheersen van een toekomstig grootschalig afvalvraagstuk, met daarnaast de ambitie om grondstoffen zoals silicium, aluminium, zilver, tin en koper terug te winnen. Net als bij magneten moet deze keten worden benaderd als een Europese waardeketen, waarin inzameling, voorbewerking en materiaalterugwinning over meerdere lidstaten zijn verdeeld.

Zonnepaneelrecycling is technologisch complex door het gelaagde en sterk geïntegreerde materiaal-gebruik, zie Figuur 7. Tegelijkertijd is het Europese speelveld van paneelrecycling nog sterk in ontwikkeling, met uiteenlopende initiatieven en regelgeving die ruimte laat voor interpretatie. Dit leidt tot verschillen in uitvoering tussen lidstaten en tot onzekerheid bij marktpartijen over investeringszekerheid en technologische richting.

De huidige regelgeving is primair gericht op kwantitatieve terugwinningsdoelstellingen (% van totaal-gewicht) en biedt weinig tot geen incentives om technologie te ontwikkelen voor terugwinning van kritieke grondstoffen uit PV-panelen. Tegen deze achtergrond biedt deze routekaart handvatten voor beleidskeuzes en marktpotentieel rond zonnepanelenrecycling in Europees verband, met aandacht voor EU-ontwikkelingen, technologische opties en de implicaties voor benodigde capaciteitsopbouw.



Figuur 7: Gelaagde opbouw van een PV-zonnepaneel Heath et al[46] in Handbook of Recycling[47], 2nd edition.

46 Research and development priorities for silicon photovoltaic module recycling to support a circular economy | Nature Energy.
47 Handbook of Recycling | ScienceDirect

Dominantie in de waardeketen

De mondiale waardeketen van zonnepanelen kent een sterke geografische concentratie. China speelt sinds enkele jaren een dominante rol in vrijwel alle schakels van de keten, van de productie van polysilicium en zonnecellen tot module-assemblage en in toenemende mate ook recyclingtechnologieën. Ontwerpkeuzes en materiaalgebruik in China, zoals het gebruik van antimoon in PV-glas, hebben directe invloed op de samenstelling van end-of-life panelen en bepalen daarmee welke recyclingtechnieken in Europa nodig zijn. Deze dominantie vertaalt zich in strategische afhankelijkheden, zowel in primaire productie van PV-panelen als in de ontwikkeling van verwerkingscapaciteit voor secundaire grondstoffenstromen.

Keten voor Zon PV panelen: van bron tot eindgebruik

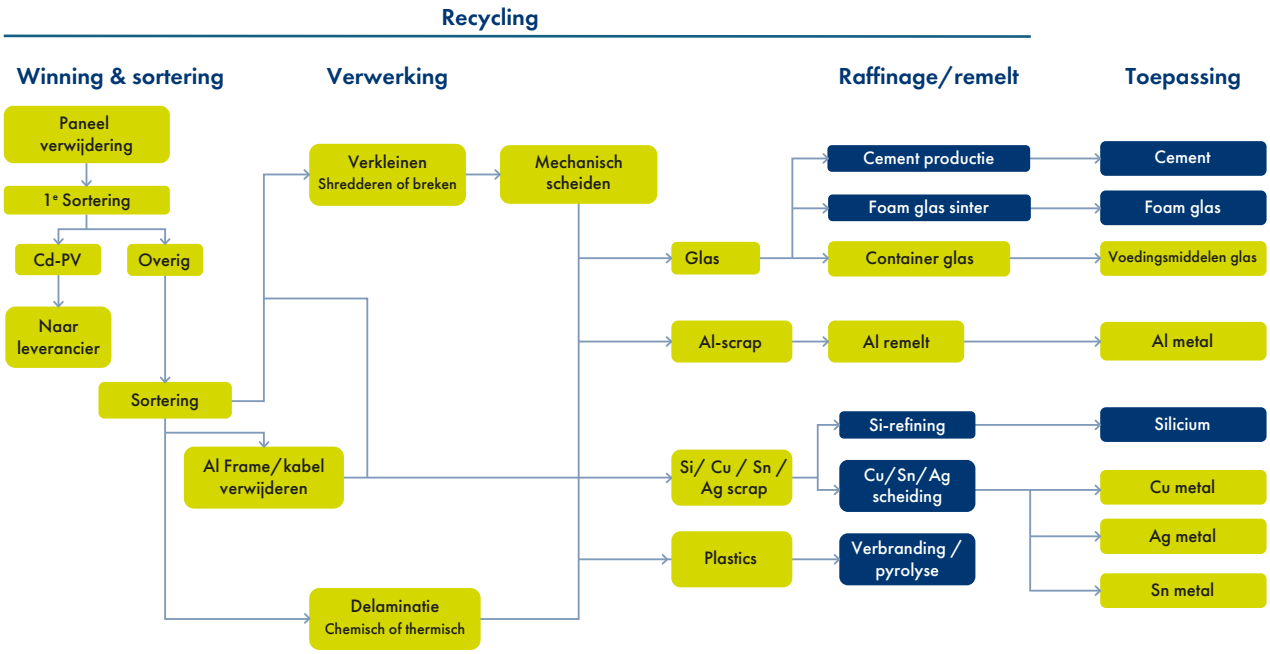
De recyclingmogelijkheden van zonnepanelen zijn sterk afhankelijk van het paneeltype; grofweg worden vier hoofdtypen onderscheiden, elk met een eigen materiaalopbouw en grondstofsamenstelling. Wanneer deze typen niet gescheiden worden ingezameld, is gerichte terugwinning van specifieke grondstoffen nauwelijks mogelijk. In de volgende paragrafen worden de ketenstappen besproken, aan de hand van onderstaand processchema. Deze routekaart richt zich voornamelijk op de metalen in de panelen en niet op de plastics.

Afhankelijk van de technische en economische voorwaarden kunnen verschillende grondstoffen uit de PV-panelen teruggewonnen worden. Het startpunt van verwerking is dat de verschillende type panelen vanaf het eerste moment in de verwerking gescheiden dienen te worden. Op dit moment zijn er grofweg vier verschillende types panelen op de markt:

- Kristallijn silicium (95%),
- CdTe-panelen (3%)
- CIGS (met indium & gallium) (1,5%)
- Amorf-silicium panelen (0,5%)

Deze verschillende type panelen bevatten verschillende (hoeveelheden) kritieke grondstoffen als silicium, aluminium, gallium en koper. Verder zitten er ook nog niet-kritieke, maar wel interessante, metalen in zoals zilver, indium, cadmium, telluur en tin. Het is niet onaannemelijk dat een aantal hiervan op enig moment ook als kritisch zullen worden aangemerkt; zo heeft de VS sinds 2025 zilver op de lijst van kritische metalen staan.

Figuur 8 geeft een versimpelde flowsheet voor de recycling van zonnepanelen. De groene proces stappen zijn stappen die momenteel in Nederland worden uitgevoerd. Stichting OPEN is sinds 2021 de regie-organisator voor het inzamelen en het coördineren van de verwerking. De blauwe gearceerde proces stappen, zijn proces onderdelen die momenteel buiten Nederland plaatsvinden. Het geeft aan dat we actief zijn in het begin en het einde van de keten maar (nog) niet in het midden, het raffinage deel van de keten waar een groot deel van de waarde creatie plaatsvindt. Uit de gesprekken met de bedrijven in deze sectoren blijkt dat we in Nederland wel de potentie hebben om een positie op te bouwen in een deel van de raffinage activiteiten.



Figuur 8: Overzicht van ketenstappen recycling End-of-Life PV zonnepanelen. Al is aluminium, Si is silicium, Cu is koper, Sn is tin, Ag is zilver.

Deze flowsheet komt op verschillende manieren voor in diverse publicaties, afhankelijk van de laatste stand van zaken, het doel van de flowsheet en het land. TNO heeft in 2022 ook een rapport[48] gepubliceerd van de verschillende ontwikkelingen.

Grondstoffenbron – operationele zonnepanelen

De hoofdbron van afgedankte zonnepanelen bevindt zich in bestaande, operationele PV-installaties. De materiaalopbouw van zonnepanelen verschilt per paneeltype en dit heeft directe consequenties voor de toegepaste recyclingroutes en voor de aard en hoeveelheid grondstoffen die technisch en economisch kunnen worden teruggewonnen.

Ontmanteling

Na einde levensduur worden zonnepanelen ontmanteld en ingezameld binnen het kader van de uitgebreide producentenverantwoordelijkheid (UPV). In Nederland speelt Stichting OPEN[49] een centrale rol in de organisatie en coördinatie van de inzameling en de verwerking van de panelen bij erkende verwerkers.

Verwerking

De eerste cruciale stap in deze fase is het scheiden van de verschillende typen zonnepanelen. Daarbij vormen cadmium-telluride (CdTe)-panelen een aparte stroom, die aan de voorkant van de keten wordt uitgesorteerd en afgevoerd naar gespecialiseerde verwerking bij de oorspronkelijke producenten van deze panelen.

Vervolgens zijn er voor de overige types panelen grofweg twee hoofdverwerkingsroutes. In de ene route wordt het volledige paneel (al dan niet na verwijdering van frame en kabel) mechanisch verkleind door middel van shredding of een andere vorm waarin het glas eraf gebroken wordt en waarna via mechanische scheiding glas, metalen en restfracties worden gescheiden. In de andere route wordt het paneel onderworpen aan thermische of chemische delaminatie, met als doel de glasplaat zo intact mogelijk te verwijderen en de onderliggende cellen vrij te maken voor verdere verwerking.

Welke route er genomen wordt heeft grote invloed op de kwaliteit en verdere inzetbaarheid van de vrijkomende materiaalstromen.

48 Balancing costs and revenues for recycling end-of-life PV panels in the Netherlands, TNO 2022.
49 https://www.stichting-open.org/2024/06/14/recyclen-van-end-of-live-zonnepanelen/.

De shredderroutes zijn eenvoudig, robuust en schaalbaar en vormen in de praktijk de meest technologisch ontwikkelde routes om te voldoen aan de Europese eis voor Waste Electrical and Electronic Equipment (WEEE) dat 85% van het paneelgewicht wordt teruggewonnen. In Duitsland en Nederland worden PV-panelen voornamelijk geshreddered. In beide landen worden echter verschillende technologieën toegepast, wat in Duitsland en Nederland verschillende reststromen oplevert met o.a. verschillende samenstellingen van het recycled PV glas en de overige reststromen wat weer resulteert in verschillende mogelijkheden voor vervolgtoepassingen. Ook in Frankrijk werden de afgelopen jaren de meeste panelen mechanisch gerecycled na inzameling door SOREN.[50]

Na verwijdering van het frame (voornamelijk aluminium schroot), kabel (voornamelijk koper) en glas blijft een heterogene restfractie over die bestaant uit onder meer siliciumcellen, metalen contacten en diverse kunststof- en bindlagen (zoals folies en lijmlagen). Voor deze fractie bestaan momenteel verschillende, maar nog grotendeels experimentele verwerkingsbenaderingen. In Nederland zijn op dit moment slechts enkele partijen actief in deze verwerkingsstappen. In Nederland wordt een deel van de gemengde fractie van silicium, metalen en plastics opgeslagen totdat er een verwerkingsmethode gevonden is.

De delaminatie-route, zoals in Frankrijk toegepast,[51] maar sinds kort ook steeds meer in Nederland, biedt potentieel betere mogelijkheden voor hoogwaardige terugwinning van glas en celmaterialen, maar is technologisch complexer en minder ver opgeschaald dan bijvoorbeeld Duitse mechanische recyclers.

Raffinage en toepassing

Raffinage en toepassing van grondstoffen uit end-of-life zonnepanelen zijn nauw met elkaar verweven. De benodigde raffinagestappen worden in belangrijke mate bepaald door de beoogde toepassing van het materiaal. Het doel van raffinage is het zo efficiënt en verantwoord mogelijk terugbrengen van grondstoffen naar een staat waarin ze weer toepasbaar zijn in hun respectieve waardeketens.

Glas

Glas vormt de grootste materiaalstroom uit zonnepanelen, zowel qua massa (74%) als volume. Hierdoor is het vinden van een goede oplossing voor het glas van groot belang in het recyclen van de PV-panelen. Een aanzienlijk deel van het in Europa aanwezige PV-glas, met name afkomstig uit Chinese panelen, bevat antimoon (Sb). Zoals hierboven genoemd is naast de materiaalsamenstelling van het oorspronkelijke PV-paneel ook de gekozen recyclingmethode bepalend voor de kwaliteit van de resulterende glasstroom. Mechanische verwerkingsroutes (shredding) vergroten de kans op verontreiniging van het glas met metalen, polymeren en coatings, wat de toepassingsmogelijkheden beperkt.

De huidige manier van verwerken van recycled PV-glas is op lange termijn en grote schaal mogelijk niet houdbaar door (beleidsonzekerheid rondom) antimoon. In Nederland wordt PV-glas momenteel bij wijze van test toegepast via bijmenging in verpakkingsglas. De opnamecapaciteit van deze routes lijkt echter beperkt door onzekerheid over de toekomstige toelaatbaarheid van antimoon en het ontbreken van duidelijke wettelijke kaders hieromtrent. Hierdoor vormt het glas in de PV-panelen een belangrijk knelpunt voor verdere opschaling van de recyclingketen.

In Duitsland en België wordt PV-glas binnen een bredere en explicieter gereguleerde set toepassingen ingezet. Naast de toepassing in verpakkingsglas, lijkt het erop dat het glas ook wordt toegepast in bouwmaterialen, cement en wegenbouw.[52,53] De beperkingen rond PV-glas zijn daarmee niet primair technologisch, maar worden in belangrijke mate bepaald door nationale regelgeving en marktacceptatie.

Alternatieven zoals het opwerken van antimoon houdend PV-glas tot vlakglas bevindt zich technologisch nog in de onderzoeksfase. De uitdaging lijkt hierin onder andere dat het antimoon de chemische processen van de vlakglasproductie (tinbad proces) kan verstoren. Er is gepubliceerd over kleinschalige testen waarbij PV-glas is ingezet in vlakglas, maar ook hier geldt dat er nog geen opschaling van hoeveelheden bijgemengd glas heeft plaatsgevonden.

50 https://www.engie.com/en/activities/renewable-energies/solar-energy/recycling-solar-panels.
51 ROSI | Circular Economy for the PV Industry.
52 https://pvcycle.be/nl/recyclage-panneaux-photovoltaiques.
53 Double breakthrough in PV recycling.

Vanuit de glasindustrie zelf is er nog geen drijfveer of businesscase om het verwerken van PV-glas tot vlakglas of verpakkingsglas grootschalig toe te passen of te onderzoeken. Dit heeft voornamelijk te maken met de geringe hoeveelheden materiaal en daardoor relatief hoge kosten, onzekerheid over het antimoon voor productkwaliteit en-veiligheid en mogelijke interactie met het tinbad (in geval vlakglas).

Een drijfveer kan gezocht worden in de mogelijkheid om door inzet van PV-glas kosten voor zowel grondstoffen alsook energie te besparen. Het bewijs van inzetbaarheid van PV glas lijkt eerder bij de eigenaar van het probleem (PV-recycler/ overheid/ Stichting OPEN) en regelgever te liggen dan bij de glasindustrie.

Het recyclen van antimoon wordt op dit moment nog niet onderzocht. De concentratie is erg laag in het glas, er is geen bekend proces hiervoor en ook hier ontbreekt elke vorm van business case.

Silicium

Hoewel het silicium dat gebruikt wordt bij de productie van het PV-paneel een zeer hoge zuiverheidsgraad heeft, is de siliciumstroom die bij recycling vrijkomt geen zuiver silicium stroom. Bij de delaminatie routes kunnen koper, zilver en tin in een vroeg stadium al grotendeels van het silicium zijn gescheiden, waardoor siliciumstroom een relatief hogere zuiverheidsgraad heeft. Maar bij de shredder routes zitten er o.a. nog zilver, tin, koper (beperkt), en plastic (EVA, PET, PVDF) in wat er moeilijk uit te krijgen is. In Duitsland worden bij mechanische verwerkingsroutes (shredderen) deze metalen grotendeels als afzonderlijke metaalstromen afgescheiden, maar in Nederland is deze scheiding momenteel minder vergaand, waardoor verdere raffinage en toepassing complexer wordt. Tot er in Nederland een goede oplossing gevonden voor deze stroom is wordt deze stroom opgeslagen.

Het terugbrengen van het silicium naar zonnecelkwaliteit zou zeer intensieve en complexe raffinage stappen vereisen en is op dit moment economisch, energetisch en ecologisch onaantrekkelijk. In de praktijk wordt gerecycled PV-silicium daarom bijvoorbeeld ingezet als metallurgical-grade silicium voor gebruik als legeringselement in de aluminiumindustrie of in andere metallurgische processen. Deze toepassingen vragen een lagere zuiverheid en bieden een realistische en schaalbare afzetroute maar zijn wel afhankelijk van de nationale wet- en regelgeving.

Aluminium en koper

Aluminium frames en het koper uit de bekabeling vormen relatief zuivere materiaalstromen. Na beperkte voorbewerking en raffinage kunnen aluminium en koper direct worden ingezet als secundaire grondstof binnen Nederlandse en Europese metallurgische ketens. Deze stromen kennen een gunstig recyclingperspectief en vormen geen beperkende factor voor opschaling.

Zilver en tin

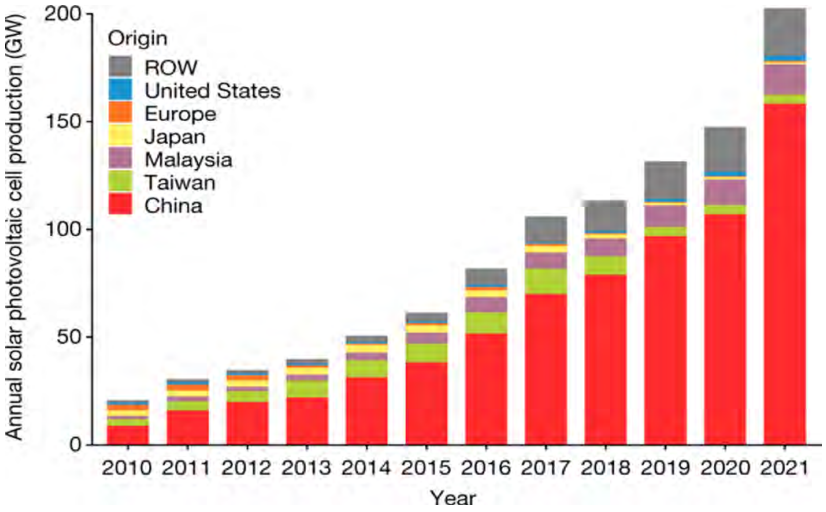
Het zilver en tin dat bij de verwerking van PV-cellen vrij kan komen, vormen afzonderlijke metaalstromen met duidelijke economische waarde. Voor deze metalen geldt dat verwerking in principe in Nederland nu al mogelijk is, gezien de aanwezigheid van relevante non-ferro- en edelmetaalverwerkingsactiviteiten in Nederland. Aansluiting bij bestaande Nederlandse infrastructuur biedt kansen voor het opbouwen van binnenlandse verwerkingscapaciteit, in combinatie met verdere Europese opschaling. Een alternatief is om buitenlandse bedrijven aan te trekken om het Nederlandse ecosysteem te vergroten.

2. Wat is de marktomvang voor PV-panelen?

Dit hoofdstuk analyseert de marktomvang van zonnepanelen vanuit het perspectief van end-of-life verwerking en materiaalterugwinning. Op basis van herkomstgegevens en levensduur-scenario's wordt het toekomstige aanbod van afgedankte panelen en bijbehorende materiaalstromen richting 2030, 2040 en 2050 gekwantificeerd.

Import uit China

Figuur 9 illustreert dat de grootste hoeveelheid van de huidige panelen uit China en of Azië komen.



Figuur 9: Groei panelen vanuit China en Azië[54].

Potentieel aanbod zonnepanelen in Nederland voor recycling

In deze analyse is een materiaalbalans opgesteld voor afgedankte zonnepanelen in Nederland voor de jaren 2030, 2040 en 2050. Het doel is inzicht te geven in de omvang en groei van de materiaalstromen die in deze jaren vrijkomen, ter ondersteuning van beleidskeuzes binnen de routekaart.

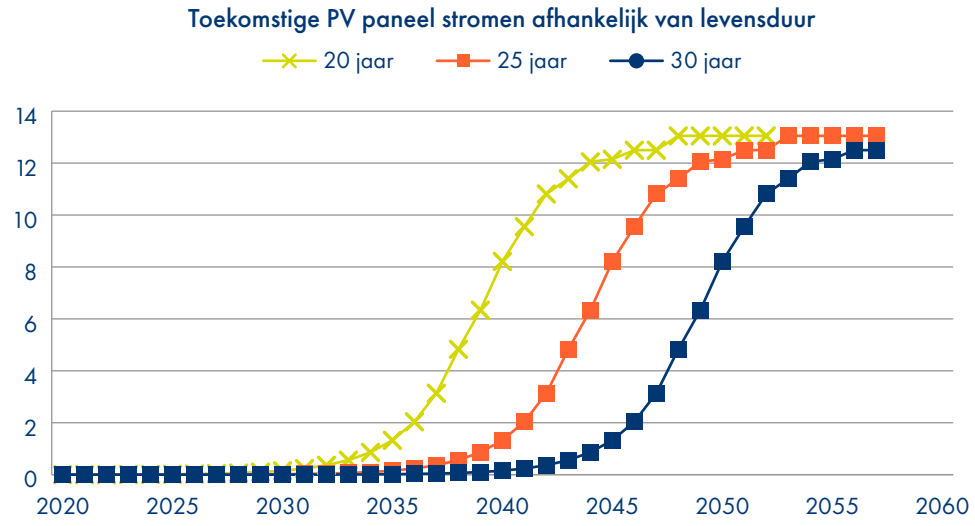
De materiaalbalans en daarmee ook Figuur 10 zijn gebaseerd op historische gegevens[55] in combinatie met een aangenomen technische levensduur van circa 25 tot 30 jaar. Op basis hiervan zijn scenario's opgesteld voor het aantal end of life zonnepanelen per jaar. De verwachtte volumes (het aantal EoL panelen die vrijkomen per jaar) nemen sterk toe richting 2040 en 2050, als gevolg van de grootschalige uitrol van zonnepanelen in de afgelopen tien tot vijftien jaar.

De gepresenteerde cijfers zijn indicatief en bedoeld om trends en orde-groottes te tonen. Door verschillen in aannames en databronnen kunnen de uitkomsten aanzienlijk (±50%) variëren. Desondanks is de onderliggende trend eenduidig: in alle scenario's is sprake van een zeer sterke groei van de verwerkingsopgave, met een benodigde opschaling van de verwerkingscapaciteit in de orde van een factor vijf per decennium.

54 https://www.nature.com/articles/s41586-022-05316-6.

55 CBS data: StatLine - Zonnestroomsystemen; handel in panelen, werkgelegenheid en omzet, 1991-2012, Nationaal Solar Trendrapport | Dutch New Energy, Solar power in the Netherlands - Wikipedia, Dutch PV additions hit 4.82 GW in 2023 – pv magazine International, netherlands-updated-final-national-energy-and-climate-plan-necp-2021-2030_3144ee52a800cc44e50ce8923afb1da4.pdf.

Onderstaande figuur toont aan dat de hoeveelheid end of life panelen sterk afhankelijk is van de verwachtte levensduur.



Figuur 10: Hoeveelheid EoL PV-panelen per jaar in Nederland tot 2060 afhankelijk van levensduur. Voor referenties zie voetnoot 49

Aantal EoL panelen per jaar

Paneeltype	2030	2040	2050
Crystalline silicon	285.000	1.425.000	11.400.000
CdTe	9.000	45.000	360.000
CIGS	4.500	22.500	180.000
Amorf silicium	1.500	7.500	60.000
Totaal EoL panelen	**300.000**	**1.500.000**	**12.000.000**

Tabel 4: Inschatting van toekomstige hoeveelheden EoL PV panelen, gebaseerd op een levensduur van 25 jaar.

In 2050 wordt verwacht dat er in de EU 125 miljoen EoL panelen vrijkomen voor verwerking. Dit is van belang om de Europese samenwerking te benadrukken.

Op basis van de aantallen per paneeltype en de gemiddelde materiaalsamenstelling per paneel is een globale inschatting gemaakt hoeveel van de verschillende materialen er vrijkomen bij de verwerking van de panelen. Deze tabel is te vinden in bijlage 3. Ter vergelijking, de hoeveelheid glas die vrijkomt in 2050 is gelijk aan ongeveer 1/3 van de totale hoeveelheid regulier verpakkingsglas dat nu in Nederland gerecycled wordt.

Een van de grotere zonnenpaneel recyclers in Europa heeft een oppervlakte van ongeveer 2 hectare (3 voetbalvelden). Als we dit ruimtebeslag zouden toepassen op de volumes in tabel 4 hierboven betekent dat in 2050 de totale verwerkingscapaciteit een ruimtebeslag heeft van ~12 voetbalvelden verspreid over Nederland.

Samengevat laat de materiaalbalans zien dat:

- De totale materiaalstromen uit afgedankte zonnepanelen na 2030 sterk toenemen.
- Tijdige voorbereiding van inzamel- en verwerkingscapaciteit essentieel is richting 2050 (12M EoL PV-panelen per jaar voor Nederland) en daarna.
- Glas het grootste aandeel vormt in de totale massa (755); met een groot gat ertussen gevolgd door aluminium (10%).
- De volumes aan silicium (3%) en koper (0,5%) beperkt zijn, maar mogelijk nog wel economisch interessant.
- Materialen zoals zilver (0,1%), tin (0,05%), indium (0,0001%) en lood (0,03%) slechts een zeer klein deel van het totale gewicht vertegenwoordigen; wat impliceert dat commerciële verwerking/ raffinage alleen op Europese schaal economische potentie heeft (door bijvoorbeeld het inzamelen van deze reststroom per grensoverschrijdende regio of inzet in al bestaande Europese raffinagecapaciteit).

Europese doelstellingen verwerking of recycling

Binnen de Europese Unie vallen zonnepanelen onder de EU WEEE-richtlijn (2012/19/EU), die bindende eisen stelt aan inzameling en verwerking van o.a. afgedankte panelen. Voor zonnepanelen geldt een minimale terugwinning van 85% van het totale PV-paneel gewicht. In Nederland zijn deze verplichtingen geïmplementeerd via de uitgebreide producentenverantwoordelijkheid (UPV).

In de praktijk kan aan deze doelstellingen reeds worden voldaan door terugwinning van de dominante massafracties, met name glas en aluminium. Omdat deze materialen reeds het grootste deel van het paneelgewicht vertegenwoordigen, is het mogelijk om formeel aan de WEEE-eisen te voldoen zonder hoogwaardige verwerking of afzonderlijke terugwinning van overige materiaalstromen. De WEEE-eisen geven daarmee geen stimulans voor verdere hoogwaardige verwerking en raffinage.

Tegelijkertijd sluit de WEEE-systematiek beperkt aan bij de specifieke materiaalopbouw en recycling-uitdagingen van zonnepanelen. Zonnepanelen vragen om gespecialiseerde verwerkingsroutes, gezien de dominante aanwezigheid van glas en silicium. Sectorpartijen en kennisinstellingen signaleren dat de richtlijn geen onderscheid maakt tussen zonnepanelen en andere categorieën van Elektronica en elektrische apparaten (EEA) en geen aanvullende eisen stelt aan het recyclen van PV-panelen, zoals onder meer benadrukt in analyses van PV CYCLE.[56] In Nederland worden er door Stichting OPEN wel additionele eisen gesteld boven de WEEE-eisen om meer hoogwaardig hergebruik te realiseren.

In tegenstelling tot de WEEE-richtlijn, beziet de Critical Raw Materials Act de secundaire grondstof stromen door de lens van de waarde van de individuele kritieke grondstoffen die in de producten verwerkt zitten. De streefwaardes van de CRMA zien daarmee ook op het optimaal recyclen van de kritieke grondstoffen uit de product stromen en niet zo zeer op de massa van de producten waarin deze verwerkt zitten.

Om te sturen op het recyclen van de kritieke grondstoffen uit PV-panelen zal de UPV-systematiek mogelijk moeten worden aangepast waarbij niet alleen de WEEE-richtlijnen maar ook de CRMA-streefwaardes worden bevorderd vanuit beleid. Dit zal mogelijk leiden tot een hoger percentage recycling dan de huidige 85% eis.

Marktwaarde

De economische waarde van grondstoffen uit afgedankte zonnepanelen wordt in hoofdzaak bepaald door een beperkt aantal bulkmetalen, met name aluminium en koper. Deze grondstoffen zijn technisch relatief goed terug te winnen en worden verhandeld op volwassen internationale markten.

Op basis van de huidige prijzen op de London Metal Exchange[57] (LME) ligt de waarde van aluminium rond € 2.500–3.000 per ton en die van koper rond € 10.000–14.000 per ton. Dit zijn de prijzen voor 100% zuiver metaal en vormen daarmee een bovengrens voor de potentiële materiaalwaarde.

In de praktijk liggen de opbrengsten van deze metalen uit zonnepanelenafval echter substantieel lager, omdat het gaat om schrootfracties met verontreinigingen, mengstromen en benodigde aanvullende verwerkingsstappen.

Wanneer wordt gerekend met deze werkelijke schrootwaarden blijven aluminium en koper desondanks de belangrijkste bron van economische waarde. Toegepast op de verwachte materiaalstromen resulteert dit in een potentiële bruto marktwaarde van enkele tientallen miljoenen euro's per jaar rond 2040, verder oplopend richting 2050. Deze inschattingen zijn sterk afhankelijk van marktcondities, schaal en technische verwerkingsrendementen en kennen daarmee aanzienlijke onzekerheden.

Andere grondstoffen, zoals zilver en kritieke grondstoffen, zijn vanuit strategisch en grondstoffenpolitiek perspectief relevant, maar dragen door hun geringe massa slechts beperkt bij aan de totale marktwaarde. Hun terugwinning is daarmee primair beleidsmatig gemotiveerd vanuit het Europese streven naar meer strategische autonomie en leveringszekerheid en vinden daarom bedrijfsmatig nog weinig plaats.

56 https://pvcycle.org/.
57 https://www.lme.com/.

Samenvattend wordt de economische betekenis van zonnepanelenrecycling vooral gedragen door bulkmetalen, met name aluminium en koper. Onderzoek van TNO[58] naar end-of-life zonnepanelen liet al zien dat momenteel de opbrengsten uit teruggewonnen grondstoffen doorgaans onvoldoende zijn om de kosten van inzameling en verwerking te dekken, wat wijst op een structureel negatieve businesscase.

Verdere kostendaling, schaalvergroting en technologische ontwikkeling en mogelijk hogere inkomsten uit verkopen van andere metalen zijn dus bepalend voor de toekomstige economische haalbaarheid, waarbij beleidsmatige sturing een cruciale rol speelt.

Nederlandse en Europese verwerkingscapaciteit

In Nederland is tot 2030 voldoende recyclingcapaciteit aanwezig voor het aantal end of life zonnepanelen dat jaarlijks vrijkomt. De bestaande installaties van zowel mechanisch verkleinen als delaminatie opereren op industriële schaal en tonen aan dat de eerste verwerkingsstappen technisch en praktisch uitvoerbaar zijn, zij het dat er nog geen rendabele business case is zonder de verwijderingsbijdrage vanuit Stichting OPEN.

Er is daarmee echter nog geen structurele oplossing voor het verdere verwerken/ gebruiken van het gerecyclede glas omdat dit antimoon bevat en uit de overige reststromen worden momenteel nog nauwelijks de kritieke grondstoffen teruggewonnen (“de grondstoffen opportunity”).

De belangrijkste onzekerheden in de keten worden veroorzaakt door een aantal (volgordelijke) afhankelijkheden, namelijk onvoldoende duidelijkheid over:

1. Wat de mogelijkheden zullen zijn voor toekomstige grootschalige inzet van antimoon houdend glas in de samenleving (wetgeving).
2. Wat de verwerkingsroutes zijn die uiteindelijk in Europa opgeschaald zullen worden.
3. Wat de samenstellingen zullen zijn van gerecyclede stromen.
4. Welke raffinage technologieën verder te ontwikkelen om optimale extractie van silicium, zilver en tin te bewerkstelligen uit de input stromen.

Ondanks deze onzekerheden en afhankelijkheden wordt binnen Europa al ambitieus ingezet op opschaling van zonnepaneelrecycling. Duitsland loopt voorop met grootschalige, verwerkingsinstallaties gericht op grote volumes (m.n. shredding), terwijl Frankrijk zich sneller ontwikkelt richting hoogwaardige materiaal-terugwinning, onder meer via delaminatie technologieën. In Nederland wordt zowel geshredderd als gedelamineerd. In alle landen geldt dat verdere opschaling nodig is om toekomstige volumes te verwerken en dat raffinage van kritieke grondstoffen nog beperkt is.

Op Europees niveau is de totale recyclingcapaciteit ontoereikend om de verwachte groei van afgedankte zonnepanelen op te vangen. Opschaling is daarom noodzakelijk. In deze fase is het inefficiënt wanneer landen uitsluitend capaciteit ontwikkelen voor hun eigen afvalstroom. Europese afstemming en kennisuitwisseling zijn nodig om technologiekeuzes te vergelijken op processflowsheet-gebaseerde life cycle assessments (LCA),[59] capaciteit optimaal te benutten en toe te werken naar gezamenlijk gedragen Best Beschikbare Technieken (BBT) voor zonnepaneelverwerking.

Conclusie

De sterke groei van zonnepanelen leidt in de komende jaren tot een snelle toename van afgedankte panelen, terwijl de huidige verwerkingscapaciteit hier nog onvoldoende op is ingericht. Dit geldt zowel voor Nederland als Europa in het geheel. In 2050 worden in de hele EU per jaar 125 miljoen panelen per jaar verwacht, terwijl er momenteel maar verwerkingscapaciteit is voor ongeveer 6 miljoen panelen. Om deze opgave beheersbaar te houden is er op verschillende fronten Europese samenwerking nodig om zonnepanelen ook bij sterk toenemende volumes optimaal en verantwoord te verwerken:

1. Helder beleid en regelgeving te ontwikkelen rondom de inzetbaarheid van gerecycled PV glas
2. Bestaande verwerkingscapaciteit tijdig op te schalen om tijdig een oplossing te hebben voor het aanstaande afvalprobleem

58 TNO-2022-R10860.pdf.

59 Een goed voorbeeld voor PV waarbij gekeken wordt naar werkelijk milieu-kosten is gegeven in: Cost versus environment? Combined life cycle, techno-economic, and circularity assessment of silicon- and perovskite-based photovoltaic systems - Bartie - 2023 - Journal of Industrial Ecology - Wiley Online Library.

3. Gezamenlijk Europese Best Beschikbare Technieken (BBT) vast te stellen voor zowel verwerking als raffinage van de kritieke grondstoffen
4. Gezamenlijk ontwikkelen van technologie en kennis
5. Raffinagecapaciteit opbouwen om kritieke grondstoffen uit de zonnepanelen terug te winnen.

3. Welke verwerkingscapaciteit stellen we voor (functie en plek in waardeketen) & in hoeverre behaalt Nederland daarmee de gestelde doelstellingen?

Het schema hieronder toont drie mogelijke strategieën voor de Nederlandse PV-panelen verwerkings- en raffinagesector en de verwachte impact op nationale en Europese doelstellingen van elk:

- **Optie 1:** Behouden van de status quo
  De huidige verwerkingscapaciteit in Nederland voor zonnepanelen is voldoende voor de komende jaren en wordt voortgezet zonder verdere uitbreiding. De focus ligt op bestaande verwerking en scheiding, maar er wordt in Nederland geen structurele oplossing ontwikkeld voor het antimoon houdend glas vraagstuk en (kritieke) grondstoffen worden niet of nauwelijks teruggewonnen uit zonnepanelen.
- **Optie 2:** Ontwikkelen van een structurele oplossing voor het glasprobleem
  Naast voortzetting van de huidige verwerkingscapaciteit wordt ingezet op een structurele en schaalbare oplossing voor de toepassing van het vrijkomend PV-glas, inclusief antimoon houdend glas.
  De aandacht ligt primair op het beheersen van de grootste afval- en volumestroom, zonder ontwikkeling van aanvullende raffinage/ terugwin capaciteit voor kritieke grondstoffen.
- **Optie 3:** Integrale optimalisatie van de keten (verwerking glas + terugwinning kritieke grondstoffen)
  Deze optie bouwt voort op optie 2 en richt zich op het toewerken naar Best Beschikbare Technieken (BBT) voor zonnepaneelverwerking, gecombineerd met de ontwikkeling van optimale verwerkings- en raffinageroutes voor kritieke grondstoffen. Het doel is zowel effectieve afvalbeheersing als maximale circulaire en strategische waarde creatie.

Doelstelling	Optie 1 - Status quo	Optie 2 - Opschaling + glas	Optie 3 - Opschaling + glas + raffinage
Seat at the Table in Europese waardeketens	❌ Niet in lijn	❌ Niet in lijn	✅ In lijn
EU-doelstelllingen (CRMA)	❌ Niet in lijn	⚠️ Beperkt in lijn	✅ In lijn (onder randvoorwaarden)
Nationale circulaire doelstelllingen (NPCE)	❌ Niet in lijn	⚠️ Beperkt in lijn	✅ In lijn

Tabel 5: Doelstelling - optie - resultaat tabel voor PV-panelen.

Wanneer, met wie en hoe gaan we dit doen

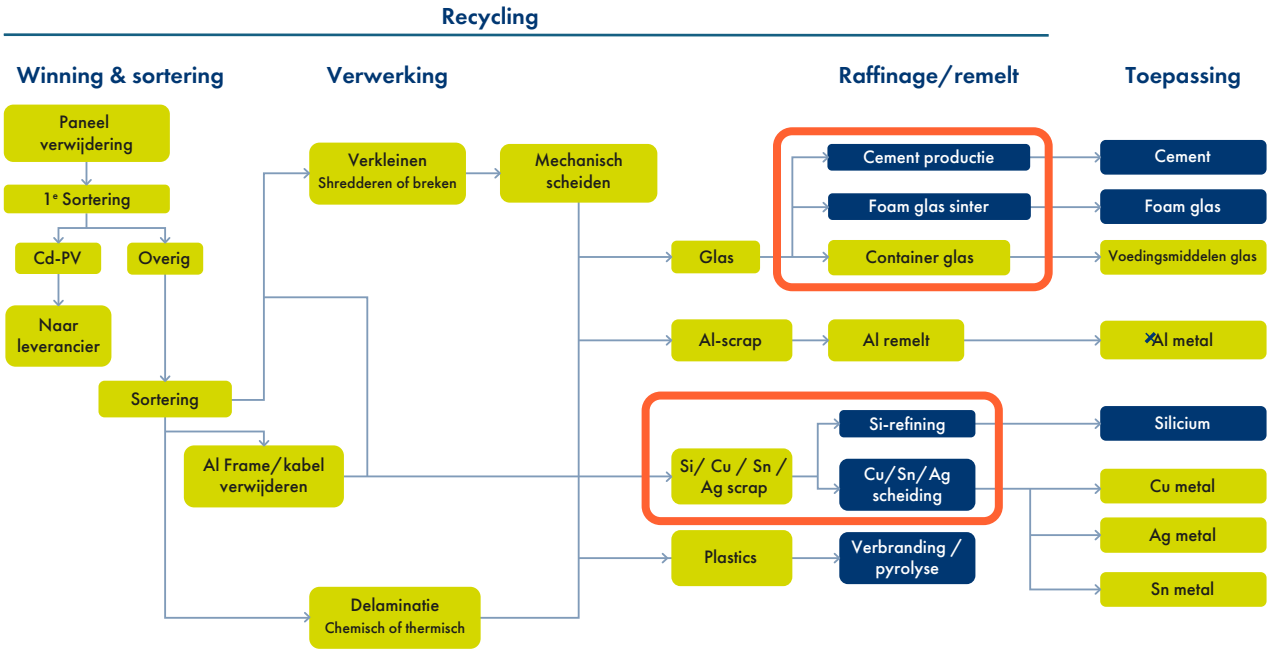
Op schaal - ambitieus maar realistisch

De kern van deze routekaart is het tijdig voorkomen van een gegarandeerd en omvangrijk toekomstig afvalprobleem door de sterke groei van afgedankte zonnepanelen. Het zekerstellen van voldoende verwerkingscapaciteit is daarbij leidend; de terugwinning van kritieke grondstoffen is belangrijk, maar secundair. Daarmee vervalt optie 1. Binnen optie 2 moet tijdig een robuuste, opschaalbare basisroute beschikbaar zijn voor de verwerking van zonnepanelen en het daarbij vrijkomende glas. Hierbij ligt de nadruk op het beheersen en borgen van de kwaliteit van gerecycled PV-glas en op het verkrijgen van duidelijkheid over de toegestane toepassingen van deze glasstromen. Om deze basisroute tijdig te kunnen opschalen, is het daarom noodzakelijk dat duidelijke en voorspelbare kaders worden vastgesteld voor de acceptatie en inzet van teruggewonnen PV-glas in bestaande toepassingen.

In aanvulling op optie 2, wordt binnen optie 3 ingezet op de verdere optimalisatie van de keten, waaronder de terugwinning van kritieke grondstoffen en de kwaliteit en terugwinning van silicium, inclusief bijbehorende koper-, zilver- en tin-fracties. Opschaling van deze raffinageroutes is alleen economisch interessant bij voldoende schaal omvang. Dit bij voldoende schaal binnen Nederlands, maar anders ook op Europese schaal.

Vanaf circa 2040 neemt de hoeveelheid afgedankte zonnepanelen sterk toe en zijn grootschalige installaties nodig die de miljoenen panelen per jaar kunnen verwerken. Dit vraagt dat uiterlijk rond 2035 besluitvorming plaatsvindt over deze capaciteit. Voor die tijd moeten er Europees brede heldere afspraken zijn over de toegestane toepassingen van (antimoon houdend) recycled PV glas en technologische oplossingen voor het optimaal recyclen van de kritieke grondstoffen uit de overige reststromen.

In Figuur 11 staat in de rode kaders aangegeven waar Nederlandse bedrijven zich de komende jaren verder in moeten ontwikkelen. Deze stappen bieden oplossingen voor de bovengenoemde kritieke knelpunten die zowel meehelpen de glas uitdaging op te lossen als ook de terugwinning van de kritieke grondstoffen mogelijk te maken. Bestaande bedrijven kunnen een actieve rol spelen in de verwerking van alle grondstoffen om de ketens hier te optimaliseren en te verbeteren.



Figuur 11: Overzicht focuspunten PV-recycling industrie in Nederland

Met wie

Bestaande Bedrijven en overheid:

Nederland beschikt over een aantal bedrijven dat actief is in de verwerking van de pv-panelen. Daarnaast heeft Nederland een sterke industrie op het gebied van sorteer- en scheidingstechnieken, die een belangrijke basis vormt voor het efficiënt scheiden van materiaalstromen uit zonnepanelen. Verder zijn er aanknopingspunten in aanverwante sectoren, zoals de raffinage en productie van koper, tin en zilver. Ook in de productie en verwerking van silicium zijn er bestaande bedrijven en ook start-ups die een rol in deze ketens kunnen spelen. In Nederland is op deze gebieden wel relevante industriële kennis en ervaring aanwezig, maar de bestaande infrastructuur en schaal zijn beperkt en vragen potentieel verdere ontwikkeling.

Samenwerking is nodig tussen bestaande partijen, start-ups en technologieontwikkelaars om efficiënte scheidings- en verwerkingsmethoden te ontwikkelen en nieuwe processen te verkennen voor de verwerking van silicium en het omgaan met antimoon in glas. Omdat geschikte procesroutes nog niet zijn uitgekristalliseerd en verschillende technologieën parallel worden ontwikkeld en getest, is nauwe betrokkenheid van de Rijksoverheid en internationale, Europese samenwerking essentieel om passend beleid te ontwikkelen, kennis uit te wisselen en gezamenlijk toe te werken naar robuuste en schaalbare oplossingen.

7.2 Actielijnen Zonnepanelen

De huidige marktsituatie levert voor het recyclen van zonnepanelen in de meeste gevallen geen autonome businesscases op voor bedrijven om zelfstandig te investeren in nieuwe verwerkings- en raffinagecapaciteit.

Voor zonnepanelen ontstaan in Nederland inmiddels eerste initiatieven die onder specifieke omstandigheden potentieel kosteneffectief kunnen zijn. Om de randvoorwaarden te verbeteren en dit verder aan te jagen ligt de bal in eerste instantie bij de overheid. Acties moeten zich richten op het creëren van randvoorwaarden waaronder bedrijven wél kunnen investeren, waaronder ketenregie, investeringszekerheid, risicodeling, concurrerende energieprijzen, snellere en voorspelbare vergunningverlening en actieve vraagcreatie.

Hieronder zijn concrete actielijnen opgenomen voor het creëren van de juiste randvoorwaardes met als doel dat investeringen mogelijk gemaakt worden en er daadwerkelijk uitbreiding komt van de fysieke productiefaciliteiten voor het recyclen en opwerken van deze materiaalstromen.

Hoe zijn de acties opgebouwd?
- Actie 1 gaat over het aanwijzen en nemen van verantwoordelijkheden.
- Actie 2 is de daadwerkelijke uitbreiding van capaciteit.
- Acties 3 - 7 gaan over de randvoorwaarden die nodig zijn voor deze realisatie:
  - Inzameling, logistiek en voorraadbeheer
  - Marktontwikkeling & vraagcreatie Europese magneten
  - Financiering & investeringsinstrumenten
  - Beleidskaders & normering
  - Opbouw & ontsluiten kennis, innovatie & vaardigheden – voor een toekomstbestendige sector

Binnen het bredere systeem voor circulaire materialen zijn reeds diverse interventies en ontwikkellijnen in gang gezet, onder andere via de Kennis- en Innovatieagenda Circulaire Economie (KIA CE). De in dit document voorgestelde actielijnen dienen hiermee in samenhang te worden beschouwd, waarbij overlap met bestaande initiatieven mogelijk is en benut moet worden voor versnelling en schaalvoordelen.

1. Governance: ketenregie & strategische industriepolitiek

Bij de uitvoering van deze actielijnen kan nadrukkelijk worden voortgebouwd op de bestaande kennis, ervaring en structuur binnen de huidige inzamel- en recyclingketen. Stichting OPEN speelt hierin reeds een belangrijke rol bij de organisatie van inzameling, logistiek en verwerking van afgedankte zonnepanelen en vormt daarmee een essentieel onderdeel van de verdere ontwikkeling van de recyclingketen.
De routekaart omvat echter een bredere opgave, waaronder randvoorwaarden voor opschaling van verwerkings- en raffinagecapaciteit, investeringszekerheid, beleidsontwikkeling en internationale afstemming. Voor de samenhang en aansturing van deze bredere opgave is overkoepelende ketenregie noodzakelijk. Binnen deze governance blijft Stichting OPEN een belangrijke partner vanuit haar bestaande rol in de operationele keten en levert zij vanuit deze positie inhoudelijke input en uitvoeringskennis aan de verdere uitwerking van de actielijnen.

2026–2027

Regie:
- Aanstellen van een onafhankelijke ketenorchestrator voor recycling van zonnepanelen (inclusief de verdere raffinage van secundaire grondstoffen), met mandaat om uitvoering te coördineren tussen Stichting OPEN, de overheid en ondernemingen (start-ups, MKB en groter), kennisinstellingen en financiers. Voor verdere uitleg zie bijlage 4.

Eigenaarschap:
- Besluit over ministerieel eigenaarschap: vaststellen welk ministerie eindverantwoordelijk is voor implementatie van de Routekaart (bijv. EZK of I&W).
- Formeel commitment van overige betrokken ministeries (EZK/ I&W/ BuZa) om gericht bij te dragen aan overeengekomen actielijnen.

Strategische prioriteit

- Aanwijzen van zonnepaneelrecycling en de raffinage van de kritieke grondstoffen als prioritaire keten binnen CRMA, NPCE en aanpalende nationale strategieën.

Actie

- Opstellen en vaststellen van een plan van aanpak ketenregie, inclusief identificatie en betrokkenheid van sleutelactoren (Stichting OPEN, bedrijven, publieke partijen, financiers) in Nederland en Europa.

2027–2030

- Formele publieke sector afstemming met buurlanden (Duitsland, België) over capaciteitsopbouw, piekbelasting en wederzijdse benutting van verwerkingscapaciteit.
- Europese coördinatie over planning van grootschalige installaties (wie bouwt wat, waar en wanneer).

Na 2030

- PV-Panelen-recycling structureel verankerd als afvalverwerkingsketen binnen Europees grondstoffenbeleid.
- Nederland gepositioneerd als regie- en kennisland (op gebied van logistiek en de recycling) in de Europese Panelen-waardeketen.

2. Uitbreiding en opschaling van verwerkings- en raffinagecapaciteit in Nederland

2026–2027

- Vaststellen van de routekaart voor optie 2 voor opschaling verwerking van zonnepanelen en toepassingsmogelijkheden en duidelijk Europees beleid op toegestane toepassingen recycled PV glas.
- Inventarisatie: vaststellen benodigde verwerkings- en raffinagecapaciteit: schaal, type technologie, locatie en timing.

2027–2030

- Tijdig voorbereiden van vergunningverlening voor de voorgenomen grootschalige verwerkings-installaties (> miljoen panelen/jaar).
- Selectieve ontwikkeling en opschaling van raffinagecapaciteit voor kritieke grondstoffen (optie 3).

Na 2030

- Realisatie van grootschalige bulkverwerkingscapaciteit voor de verwachte volumes na 2040.
- Tijdig voorbereiden van vergunningverlening voor beoogde raffinagecapaciteit.

3. Inzameling en logistiek - randvoorwaarden

2026–2027

- Impact analyse PV-levensduur op inzameling-, opslag- en verwerkingscapaciteit alsook invloed van (illegale) export
- Intensiveren en centraliseren van kennisuitwisseling met Duitsland, België en andere EU-landen (o.a. EVERPV).

2027–2030

- In kaart brengen wat nodig is qua ruimte, energie en vergunningen voor de inzameling en logistiek.

Na 2030

- Europees robuust systeem voor buffering en spreiding van secundaire grondstoffenstromen en opbouw recycling capaciteit PV-panelen bijvoorbeeld door het CRM-center bij de EU.

4. Marktontwikkeling & vraagcreatie Europese PV-materiaalstromen - randvoorwaarden

2026–2027

- Onderzoek naar toepassingen en alternatieve afzetmogelijkheden PV-glas, inclusief antimoon houdend glas, i.s.m. de glas producerende industrie.
- Onderzoek naar kosten, kwaliteit en toepassingsmogelijkheden van gerecycled PV-silicium.
- Versterken relatie verwerkingsindustrie met productie-industrie in kader van “Design voor Recycling” voor PV-panelen.

2027–2030
- Verankering van toegestane toepassingen antimoon houdend PV glas in Europees beleid.
- Actieve stimulering van marktvraag naar secundaire grondstoffen die uit de PV-recycling komen binnen Nederland en Europa.

Na 2030
- Volwassen Europese markten voor secundair PV-glas en overige kritieke grondstoffen uit zonnepanelen.

5. Financiering & investeringsinstrumenten - randvoorwaarden

2026–2027
- Vroegtijdige betrokkenheid van publieke financiers (Invest-NL, RVO, EU-fondsen) bij basisroute en pilots.

2027–2030
- Structurering van publiek-private investeringsinstrumenten voor opschaling.

Na 2030
- Overgang naar grotendeels marktgedreven financiering.

6. Beleidskaders & normering - randvoorwaarden

2026–2027
Vergunningverlening & ontwikkelruimte
- Inventarisatie concrete knelpunten vergunningsverlening & regelgeving.
- Herijking van definities van recycling en afval op EU en Nederlands vlak om terugwinning van kritieke grondstoffen beter werkbaar te maken. Vergunnings- en beoordelingskaders expliciet geschikt maken voor de ontwikkelfase van zonnepaneelrecycling, door ruimte te bieden aan pilots, demonstratie-installaties en gefaseerde opschaling, waarbij kwaliteit en verwerkingstoepassingen van teruggewonnen materialen stapsgewijs kunnen doorgroeien richting hogere circulariteitsdoelen. Daarbij wordt voorkomen dat recyclingprocessen vooraf worden vastgelegd op specifieke eindtoepassingen of gesloten kringlopen (zoals directe toepassing in nieuwe zonnepanelen), zodat technologische ontwikkeling en opschaling niet worden beperkt door voortijdig vastgelegde kwaliteits- of toepassingsvereisten.
- Het borgen van sectorspecifieke kennis bij de Omgevingsdienst en OD-NL.

Energievoorziening & netaansluiting
- Borging van tijdige netaansluiting en energievoorziening voor nieuwe installaties.
- Borgen van internationaal concurrerende energie- en nettarieven voor energie-intensieve strategische industrieën, in vergelijking met landen waar momenteel kritieke grondstoffen worden verwerkt, als randvoorwaarde voor investeringsbeslissingen in raffinage- en verwerkingscapaciteit (voortbouwend op de aanbevelingen uit het rapport Wennink).

Handelsvoorwaarden
- Onderzoeken mogelijk importverbod PV-panelen met antimoon houdend glas.

Regelgeving
- Europees onderzoek naar wenselijkheid en toelaatbaarheid van antimoon in vlakglas, verpakkingsglas, cement, isolatiewol en wegenbouw.
- Heldere Europese regelgeving in lijn met uitkomsten onderzoek.
- Europese regels op terugwinningspercentages van afzonderlijke kritieke grondstoffen uit zonnepanelen bovenop WEEE-regelgeving.

2027–2030
- Aanpassing van regelgeving op basis van onderzoeksresultaten en praktijkervaring.
- Ontwikkeling van EU-uniforme definities voor recycling.
- Start en uitwerking van BBT/BREF-trajecten voor zonnepanelen.

Na 2030
- Volledig geharmoniseerde Europese beleids- en normeringskaders.

7. Opbouw & ontsluiten kennis, innovatie & vaardigheden - randvoorwaarden

2026–2027

- Uitvoeren LCA's voor PV-verwerkings- en raffinageroutes met als doel een optimale recyclingsroute te definiëren.

2027–2030

- Doorontwikkeling technologieën en bedrijfsprocessen met als doel rendabeler business cases en daarmee reductie benodigde verwijderingsbijdrages.
- Doorontwikkeling en praktijktoetsing van BBT/BREF voor PV-recycling.

Na 2030

- Structureel kennis- en innovatie-ecosysteem voor kritieke grondstoffen en glas in NL/EU.

Samenstelling van het productteam

Het productteam bestaat uit:
Hans van der Weijde, Tata Steel Nederland | Holland High Tech (voorzitter)
Judith Eijs en Steven Remiëns, RVO (secretaris)
Xandra Weinbeck, InvestNL
Lennert Vermaat, Metaal Recycling Federatie
Janneke Pors, Port of Rotterdam

In nauwe samenwerking met:
Ton Bastein, TNO Nationaal Materialen Observatorium
Ilona van Zandvoort, Ministerie van Economische Zaken en Klimaat
Theresa Wallner, Ministerie van Infrastructuur en Waterstaat

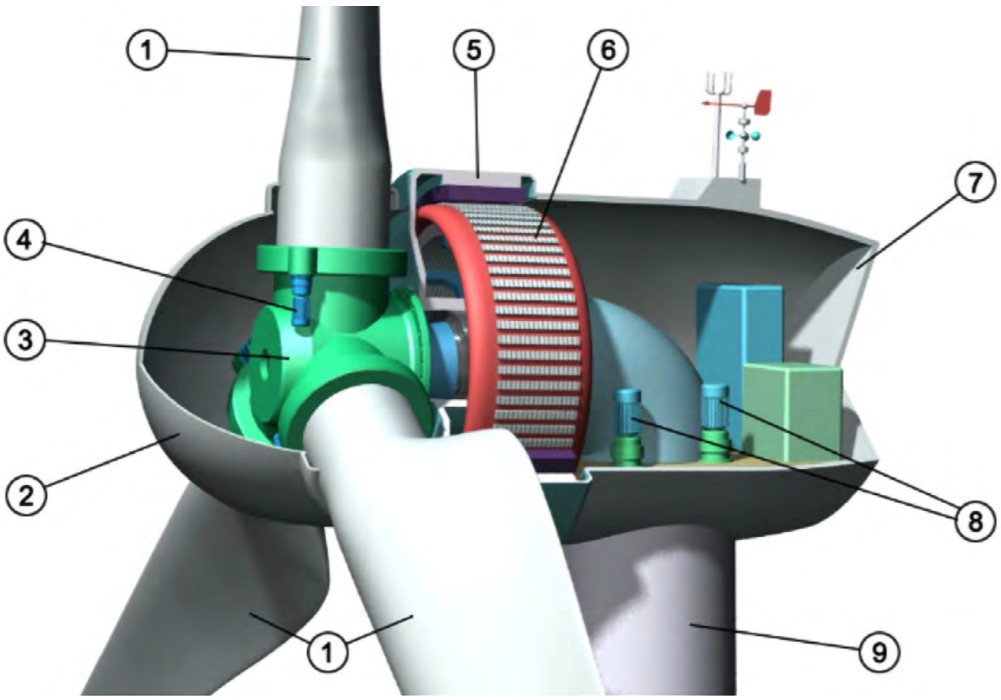
Het proces werd begeleid door:
Rien van Leeuwen, Circonnect

Geschreven door:

Butter Bridge
Harmen Oterdoom
Steef Steeneken

In samenwerking met:
Joanne de Jonge (Future Possibles Advisory)
Elbert Loois (HTM Advisory)

Bijlage 1 Onderdelen windturbine



Figuur 12: Schematische opbouw van een nacelle uit een windturbine. (1) Blad, (2) conus, (3) Hub, (4) Pitch motor, (5) outer rotor, (6) inner stator, (7) nacelle, (8) motor, (9) Mast

Bijlage 2 Verschillende toepassingen magneten

Quantities of REE Magnets by Application

Category	Product / Application	Magnet Mass per Unit (approx.)		Details / Source	Ref
Large Scale	Offshore Wind Turbine (11 MW)	~7,788 kg		Total magnet mass calculated from Fe, Nd, Pr, Dy, and Tb components.	4
	Onshore/Offshore Wind	80 – 650 kg/MW		Varies by generator type (Direct Drive is highest),.	5,6,7
	generator EESG	30 kg/MW			22
	generator PMSG-GB	51 kg/MW			22
	generator PMSG-DD	225 kg/MW			22
	generator PDD	567,3 kg/MW			22
	generator SDD	29,3 kg/MW			22
	wind turbine	80 - 650 kg/MW			21
	Wind Turbines	< 3 t	Frequent	Magnets are installed in the nacelle bearings	20
	Medical Technology	< 1 t	Rare	MRI machines contain strong neodymium magnets	20
	MRI Scanner	1,000 – 2,000 kg		High-performance medical imaging,.	6,8
	F-35 Strike Fighter	420 kg		Reported for a single aircraft,.	8,9
	M1-A2 Abrams Tank	~75 – 300 kg		Estimated as 30 times the mass of a regular EV.	10
	Virginia class subamrine	4200 kg / submarine			26
	Arleigh burke destroyer	2400 kg /ship			26
	F-35 Lightning II aircraft	410 kg / vliegtuig			26
Automotive	Battery Electric Vehicle (BEV)	2,000g (2 kg)		Typical traction motor requirement.	11
	Hybrid Electric Vehicle (HEV)	1,316g		Smaller motor compared to full BEVs.	11
	electric vehicle	1500-2500			21
	Electric Cars	< 3 kg	Frequent	Neodymium magnets are primarily used in electric motors	20
	E-Scooter (Rotor)	280g – 384g		Uses 40–60 magnets (approx. 6.4g–7g each),.	12,2
	Electric Bike	266g – 350g		High-density hub or mid-drive motors,.	11,6
	Escooter	280			21
	Car Power Steering	50g – 110g		Ancillary motors within conventional vehicles.	6
	airco, waterpump, servos, electronics	10s - 100s g			25

Category	Product / Application	Magnet Mass per Unit (approx.)		Details / Source	Ref
IT & Electronics	3.5" Desktop HDD	14g – 48.6g		Mass has fluctuated over time; includes actuator assembly,.	13,14
	2.5" Laptop HDD	2.5g – 12.6g		Smaller form factor for mobile devices,.	14,15
	HDD	2 - 23			21
	Hard Disks	< 10 g	Frequent	Small magnets can be installed in hard disks	20
	Laptop (Total)	11.4g		Weighted average across internal components.	11
	Desktop PC (Total)	18.86g		Excludes monitors and external peripherals.	11
	Flat Screen TV	11.48g		Primarily found in speakers and internal mechanisms.	11
	Smartphone	0.2g – 1.3g		Found in speakers, receivers, and cameras,,.	2,11,16
	Wireless Earbuds	0.05g – 0.5g		Minute magnets used in ultra-compact drivers,.	17,2
	Earbuds	0,7			21
Household	Air Conditioner	16g – 152g		Varies significantly by model and compressor size,.	2,11
	Washing Machine	130g		Weighted average for household units.	3
	Dishwasher	35g		Used in pump and control systems.	3
	Fridge / Freezer	112.5g		Primarily in compressor motors.	11
	Microwave	110g		Magnetron and turntable motors.	11
	Air conditioner	16 g			21
	Electric toothbrush	8			21
	Elektronics	A few grams	Very frequent	Electronic devices such as mobile phones or tablets	20
	speakers	146			21
	speakers	24 gram in 5,6 ton		Stcichting open: niet rendabel	24
	Speakers	< 1 kg	Frequent	Large speakers often contain permanent magnets	20
	Satisfier et al.	<1 gr / unit			23

Category	Product / Application	Magnet Mass per Unit (approx.)		Details / Source	Ref
Industrial	Industrial Robots	1,990g		High-precision servo motors.	18
	Industrial Pumps	350g		High-efficiency motor designs.	11
	Grote industriële motoren			Fabrieken	19
	Elektrische motoren			Energiecentrales, boorplatforms, scheepvaart	19
	Industriële elektromotoren				19
	Locomotiefmotoren				19
	Generatoren				19
	Hydroelectric Power Stations	< 500 kg	Rare	Generators contain permanent magnets	20
	Magnet Rails	< 0.5 kg per meter	Frequent	Permanent magnets are used in transport systems	20
	Magnetic Bearings	A few grams	Rare	Magnets are used in optical systems	20
	Industrial Robots	A few grams	Frequent	Actuators contain neodymium magnets for precise movements	20

Tabel 6: Overview of use of magnets.

1 On the pre-treatment for recycling spent NdFeB permanent magnets: from disassembling, characterisation to de-coating - ScienceDirect
2 On the pre-treatment for recycling spent NdFeB permanent magnets: from disassembling, characterisation to de-coating - ScienceDirect
3 Exploring circular economy strategies to reduce dependency on Critical Raw Materials in the defence sector | TU Delft Repository
4 Recycling permanent magnets from offshore wind turbines | TU Delft Repository
5 On the pre-treatment for recycling spent NdFeB permanent magnets: from disassembling, characterisation to de-coating - ScienceDirect
6 Recycling permanent magnets from offshore wind turbines | TU Delft Repository
7 EU Critical Raw Materials Act: too ambitious or not ambitious enough? | TU Delft Repository
8 Exploring circular economy strategies to reduce dependency on Critical Raw Materials in the defence sector | TU Delft Repository
9 Exploring circular economy strategies to reduce dependency on Critical Raw Materials in the defence sector | TU Delft Repository
10 Exploring circular economy strategies to reduce dependency on Critical Raw Materials in the defence sector | TU Delft Repository
11 https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0959652623004109
12 On the pre-treatment for recycling spent NdFeB permanent magnets: from disassembling, characterisation to de-coating - ScienceDirect
13 Recycling permanent magnets from offshore wind turbines | TU Delft Repository
14 Potential of permanent magnet recovery from Dutch waste: the case of Hard Disk Drives - Nederlands Materialen Observatorium
15 Recycling potential of neodymium: the case of computer hard disk drives - PubMed
16 Exploring circular economy strategies to reduce dependency on Critical Raw Materials in the defence sector | TU Delft Repository
17 On the pre-treatment for recycling spent NdFeB permanent magnets: from disassembling, characterisation to de-coating - ScienceDirect
18 On the pre-treatment for recycling spent NdFeB permanent magnets: from disassembling, characterisation to de-coating - ScienceDirect
19 1450-53392400001F.pdf
20 Where to find magnets
21 On the pre-treatment for recycling spent NdFeB permanent magnets: from disassembling, characterisation to de-coating - ScienceDirect
22 Future material requirements for global sustainable offshore wind energy development - ScienceDirect
23 Mini Vibratie Motor | Elektronica voor jou
24 PP021-neodymium-uit-speakers.pdf
25 https://www.energy.gov/sites/default/files/2023-07/doe-critical-material-assessment_07312023.pdf
26 6 Military Uses of Rare Earth Elements in Defense Technology

Vele lijsten en analyses zijn te vinden in literatuur, zoals bijvoorbeeld Van Nielen 2023[60].

60 Towards neodymium recycling: Analysis of the availability and recyclability of European waste flows - ScienceDirect

Bijlage 3 Toekomstige grondstofstromen uit recycling zonnepanelen

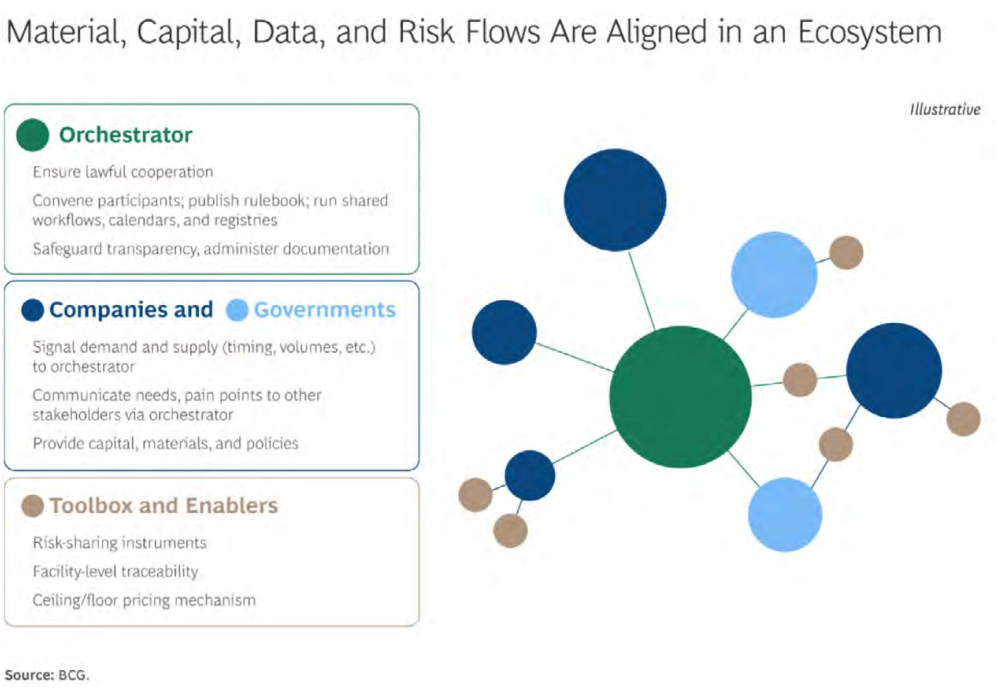
Een grove inschatting van de hoeveelheid grondstoffen die in het genoemde jaar vrijkomen op basis van gemiddelde samenstelling pv-panelen en hoeveelheden vernoemd in tabel 4.

Paneeltype	Materiaal	2030 ton per jaar	2040 ton per jaar	2050 ton per jaar
Crystalline silicon	Glas	4275	21375	171000
	Aluminium	570	2850	22800
	Koper	28,5	142,5	1140
	Silicium	171	855	6840
	Zilver	5,7	28,5	228
	Tin	2,85	14,25	114
	Indium	0,0057	0,0285	0,228
	Lood (Pb)	1,43	7,1	57
CdTe	Glas	139,5	697,5	5580
	Aluminium	18	90	720
	Koper	0,45	2,25	18
	Cadmium	0,072	0,36	2,88
	Telluur	0,054	0,27	2,16
	Tin (Sn)	0,027	0,135	1,08
CIGS	Glas	65,25	326,25	2610
	Aluminium	8,1	40,5	324
	Koper	0,54	2,7	21,6
	Indium	0,018	0,09	0,72
	Gallium	0,009	0,045	0,36
	Tin (Sn)	0,0225	0,1125	0,9
Amorf silicium	Glas	21	105	840
	Aluminium	2,7	13,5	108
	Silicium	0,3	1,5	12
	Koper	0,075	0,375	3
	Tin (Sn)	0,0045	0,0225	0,18

Tabel 7: Indicatie toekomstige grondstofstromen uit end-of-life PV-panelen, gebaseerd op Tabel 4.

Bijlage 4 Best practice / voorstel inrichting project

Vraag	Antwoord
Waarom:	Om de doelstellingen in deze routekaart te bereiken zullen alle actielijnen gelijktijdig moeten worden uitgevoerd. Bij elke actielijn zijn de actoren en stakeholders verschillend en zijn het veelal partijen die elkaar nu nog niet weten te vinden. Naast de benodigde verbinding is er ook een aanjaag rol te vervullen; zonder initiator zal er niks gebeuren; alle betrokken partijenzullen moeten worden geactiveerd en gemotiveerd om hun rol te spelen in het bereiken van de doelstellingen.
Wat:	Publiek gefinancierde orchestrator rol (bijv. Battery Competence Center, Directeuren Groeifonds projecten, BCG-model hieronder).
Wanneer:	Om zo snel mogelijk met de gedefinieerde acties aan de slag te gaan is het aan te raden ook hier gefaseerd te starten en niet te wachten tot alle publieke financiering voor de hele routekaart gecommitteerd is.
Wie/Profiel:	Start fase: persoon met ervaring in private en (semi)publieke sector, B2B business development, sectorspecifieke expertise en netwerk, goed in staat om op snijvlak publiek privaat, technisch financieel & juridisch te opereren. Verbinder op de inhoud en de persoon. In staat om snel vertrouwen te winnen van alle stakeholders.
Invulling:	Dit moet omgeschreven worden naar een voor Nederland werkend model maar met inachtneming van de door BCG aangegeven specificaties aangaande complexiteiten bij het opzetten van ketens in de grondstoffenindustrie.



Figuur 13: De rol van een orchestrator om ecosystemen voor grondstoffen op te bouwen zoals geïdentificeerd speciaal voor grondstoffen door BCG[61].

61 Why Ecosystems Matter in Critical Mineral Supply Chains | BCG

Dit is een publicatie van
Productteam Kritieke Materialen

Deze publicatie is tot stand gekomen in opdracht van
het Ministerie van Economische Zaken en Klimaat,
in samenwerking met NMO, onder begeleiding
van Circonnect.

Voorzitter
Tata Steel Nederland | Holland High Tech

Secretaris
Rijksdienst voor Ondernemend Nederland (RVO)

Auteur
Butter Bridge

Publicatiedatum:
Juni 2026