




Universiteit
Leiden

Copper8

A photograph of a coastal dune landscape. In the foreground, there is a sandy beach and a shallow, rippling body of water. In the middle ground, a line of white wind turbines stands on a grassy dune. The sky is blue with scattered white clouds. The image is overlaid with a large blue diagonal shape on the left and bottom, and a yellow diagonal shape on the top right.

METAALVRAAG VAN DE NEDERLANDSE ENERGIETRANSITIE

Navigeren in een complexe keten

COLOFON

Auteurs en onderzoek:

Pieter van Exter, MSc (Metabolic)
Sybren Bosch, MSc (Copper8)
Branco Schipper, MSc (Metabolic)
Dr. Benjamin Sprecher (CML)
Dr. René Kleijn (CML)

Design en layout:

Cassie Björck (Metabolic)

Aanleiding:

Dit rapport is opgesteld in het kader van Springtij Forum 2018.
In opdracht van het Ministerie van I&W is dit rapport tevens in het Engels vertaald.



Ministry of Infrastructure
and Water Management



+31 (0) 203690977
info@metabolic.nl
www.metabolic.nl



+31 (0) 202610289
info@copper8.com
www.copper8.com



Universiteit
Leiden

+31 (0) 715277461
secretariaat@cml.leidenuniv.nl
www.universiteitleiden.nl

INHOUDSHOPGAVE

SAMMENVATTING	4
INTRODUCTIE	5
ENERGIETRANSITIE EN CIRCULAIRE ECONOMIE IN NEDERLAND	6
METAALVRAAG VOOR ONZE WINDMOLENS EN ZONNEPANELEN	7
KRITISCHE METALEN: VIJF PERSPECTIEVEN OP RESERVES	12
KRITISCHE METALEN: EEN COMPLEXE KETEN	14
INZICHTEN	15
OPLOSSINGSRICHTINGEN	16
TOT SLOT	19
AANPAK	20
REFERENTIES	22

SAMENVATTING

De huidige globale productie van sommige kritische metalen is onvoldoende voor de transitie naar een duurzaam elektriciteitssysteem. Berekeningen voor Nederland laten zien dat voor de windmolens en zonnepanelen die wij willen gaan installeren al een fors deel van de globale jaarproductie van sommige kritische metalen nodig is.

Kijkend naar het wereldwijde schaalniveau, laten duurzame energiescenario's - die de Parijsdoelstellingen halen - zien dat de productie van sommige kritische metalen met een factor 12 toe moet nemen richting 2050. Dat geldt specifiek voor neodymium, terbium, indium, dysprosium en praseodymium. Deze berekende vraag heeft de behoefte voor andere toepassingen, zoals elektrische auto's en consumentenelektronica, niet meegenomen.

Veiligstellen van toevoer kritische metalen

De wereldwijde energietransitie vraagt een snelle en wereldwijde uitrol van duurzame energietechnologieën, die daarvoor sterk afhankelijk zijn van kritische metalen. Het veiligstellen van de toevoer van deze kritische metalen vraagt meer aandacht, omdat vraag en aanbod niet worden gegarandeerd vanuit een vrije markt. Het winnen van de benodigde mineralen vindt plaats in slechts enkele landen, en de raffinage van deze metalen in een nog kleiner aantal landen. Geopolitieke macht verschuift daarmee vanuit oliestaten naar landen met veel kritische metalen.

Een tweede belangrijk aspect is de langzame opschaling van de productie van kritische metalen: het openen van een nieuwe mijn kost 10 tot 20 jaar, en vraagt grote

investeringen. Een snelle groei in de vraag naar kritische metalen zal daarom moeilijk te beantwoorden zijn met een snelle groei in het aanbod van kritische metalen. Mijnbouwbedrijven hebben wereldwijde, lange-termijn investeringszekerheid nodig om nieuwe mijnbouw- en raffinagecapaciteit te realiseren.

Complexe ketens

De ketens van kritische metalen zijn erg complex. Niet alle theoretische reserves zijn technisch (of economisch) winbaar, en met achteruitgaande zuiverheidsgraden vraagt mijnbouw steeds meer energie en water. Daarnaast hebben mijnbouw-activiteiten vaak hoge maatschappelijke kosten.

Schaarste in aanbod leidt tot toenemende competitie, zowel tussen toepassingen als tussen landen. Door wereldwijd groeiende vraag naar apparatuur met daarin kritische metalen, nemen de afhankelijkheden ieder jaar verder toe. Tekorten of onderbrekingen in de keten van kritische metalen kunnen de energietransitie vertragen: iets dat we niet kunnen gebruiken vanuit een klimaatperspectief.

Oplossingsrichtingen

Om voldoende aanbod aan kritische metalen te realiseren, moet wereldwijd en robuust klimaatbeleid hand-in-hand gaan met circulaire strategieën om de afhankelijkheid van kritische metalen te verminderen. Er zijn drie oplossingsrichtingen:

- **Verminder kritische metaalvraag door substitutie:** werk aan het vervangen van kritische metalen, om

een duurzame elektriciteitsvoorziening te realiseren met een kleinere metaalbehoefte. Substitutie alleen is echter niet voldoende, en kan leiden tot het verschuiven van schaarste naar een ander metaal.

- **Pas circulair ontwerp toe en verbeter recycling:** neem circulaire ontwerpprincipes mee bij de productie van windmolens en zonnepanelen, om toekomstig hergebruik van componenten en materialen mogelijk te maken. Verbeter daarnaast de recycling, om metalen terug te winnen die fysiek niet meer losmaakbaar zijn aan het einde van hun gebruiksfase.
- **Overweeg een Europese mijnbouwindustrie:** Europa is bijna volledig afhankelijk van buitenlandse toevoer van kritische metalen, alhoewel het enkele reserves heeft. Mijnbouw in Europa gaat echter gepaard met administratieve en sociale lasten, alhoewel high-tech-oplossingen kunnen helpen deze te overkomen.

Naar een echt duurzaam energiesysteem

Om het Parijsakkoord te implementeren wordt er wereldwijd werk gemaakt van een duurzaam energiesysteem. Het duurzaam gebruik van grondstoffen, die nodig zijn voor dit energiesysteem, zou daar onderdeel van moeten zijn. Het realiseren van een duurzame energieproductie en de transitie naar een circulaire economie zijn daarom onderdeel van dezelfde agenda: het werken aan een echt duurzaam energiesysteem, dat de mensheid in staat stelt om ook de komende decennia in voorspoed op onze aarde te leven.

INTRODUCTIE

In 2015 is in Parijs afgesproken om de wereldwijde temperatuurstijging te beperken tot maximaal twee graden. Voor Nederland worden de nationale bijdragen op dit moment vastgelegd in een Nationaal Klimaatakkoord. Onderdeel van dit akkoord is een groei van onze duurzame energieproductie. Een belangrijk deel daarvan zal moeten worden geproduceerd met windmolens en zonnepanelen.

Belangrijke vraagstukken

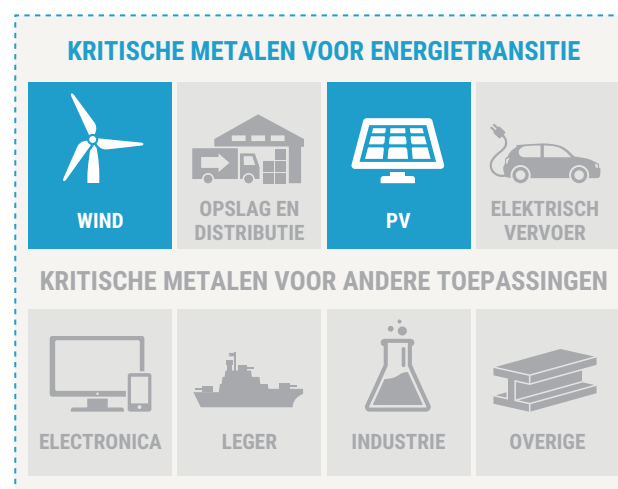
Om de energietransitie te realiseren met de snelheid die noodzakelijk is, zijn er een aantal belangrijke vraagstukken die moeten worden uitgewerkt. Daarbij gaat het onder meer over ruimtelijke uitdagingen (waar moeten we onze windmolens en zonnepanelen plaatsen?), operationele uitdagingen (waar halen we voldoende technici vandaan voor installatie en onderhoud?), en uitdagingen in de financiering (wie gaat deze duurzame energievoorziening betalen?).

Een misschien nog wel groter vraagstuk, dat weinig aandacht krijgt, is het materialenvraagstuk: waar halen we de materialen voor onze productiecapaciteit van duurzame elektriciteit vandaan? Wereldwijd is er een groeiende afhankelijkheid van specifieke en kritische metalen, die nodig zijn voor vrijwel alle duurzame technologieën: van neodymium in windmolens tot tellurium in zonnepanelen en platinum in brandstofcellen.

Afbakening: kritische metalen voor wind & zon

In dit onderzoek willen we de behoefte aan kritische metalen voor de productiecapaciteit van duurzame elektriciteit in Nederland inzichtelijk maken. Daarbij richten we ons alleen op zonnepanelen en windmolens,

die naar verwachting het grootste gedeelte van deze elektriciteit op moeten gaan wekken. Hierbij nemen we de gestelde doelen voor 2030 uit de hoofdlijnen van het Klimaatakkoord als uitgangspunt.¹



Dit onderzoek richt zich op de metaalvraag van duurzame elektriciteitsproductie door windmolens en zonnepanelen.

Buiten scope: opslag, transport en infrastructuur

De transitie naar een duurzaam energiesysteem heeft meer nodig dan alleen duurzame elektriciteitsproductie. Een energiesysteem dat is gebouwd op fluctuerende productie, zoals zon en wind, vraagt ook een flinke opslagcapaciteit. De materiaalvraag van deze opslagcapaciteit is significant². Aanvullend groeit de vraag naar emissieloos transport, waar ook kritische

metalen voor nodig zijn. Tot slot is een sterker en veerkrachtiger elektriciteitsnet nodig om een stabiele energievoorziening te borgen: ook daarvoor zijn kritische metalen (voornamelijk koper) nodig.

Al deze aspecten (opslag, mobiliteit, infrastructuur) liggen buiten de scope van deze studie. Niet omdat deze aspecten niet belangrijk zijn voor de toekomst van ons energiesysteem, maar omdat harde doelen ontbreken en er flinke onzekerheden zijn in technologische ontwikkelingen. Dit maakt het lastiger om hier accurate schattingen voor te maken. Ook de toepassing van veelgebruikte metalen (zoals ijzer) ligt buiten de scope van deze studie. In algemene zin is de verwachting dat de metaalschaarste verder toeneemt wanneer deze toepassingen ook worden meegenomen.

Een nieuw tijdperk

De weg naar een duurzame energievoorziening trekt ons weg uit het olietijdperk. Goed nieuws voor iedereen die vindt dat wij minder afhankelijk moeten worden van landen die fossiele brandstoffen produceren. Wat velen niet beseffen, is dat we met de overstap naar duurzame energie een nieuw tijdperk betreden, waarbij geopolitieke verhoudingen minstens net zo belangrijk is: het tijdperk van de kritische metalen.

Het onderkennen hoe weinig we weten van de nieuwe afhankelijkheden die op ons afkomen, is een belangrijke eerste stap. Aan dat bewustzijn willen we met deze publicatie bijdragen. Ook benoemen we enkele mogelijke oplossingsrichtingen.

ENERGIETRANSITIE EN CIRCULAIRE ECONOMIE IN NEDERLAND

Nederland heeft als doel om klimaatneutraal te worden in 2050: de CO₂-uitstoot moet dan met 95% zijn verminderd ten opzichte van 1990. In 2030 moet er een reductie van 49-55% zijn gerealiseerd, mede afhankelijk van het ambitieniveau van de rest van de Europese Unie. Dit vraagt een enorme inspanning op veel verschillende gebieden: industrie, gebouwde omgeving, landbouw, mobiliteit en de elektriciteitsvoorziening. Aan vijf tafels wordt onderhandeld tussen overheid, bedrijven en maatschappelijke partijen om te komen tot afspraken voor vergaande CO₂-reductie.

Daarnaast heeft Nederland de ambitie om circulair te worden. Ook hiervoor zijn doelstellingen geformuleerd: we willen 100% circulair zijn in 2050, en ons primair grondstofverbruik in 2030 met 50% hebben teruggebracht. De groeiende afhankelijkheid van schaarse grondstoffen was daar een van de redenen voor, naast de explosieve groei in grondstofverbruik in meer algemene zin. "Van de 54 kritieke materialen voor Europa, moet 90 procent worden geïmporteerd, vooral uit China. Nederland haalt 68 procent van zijn grondstoffen uit het buitenland," zo stelt het Rijksbrede Programma Circulaire Economie.³

Deze twee transities, energie en circulaire economie, zijn nauw met elkaar verbonden: beiden zijn nodig voor een duurzame en welvarende wereld op de lange termijn. Daarbij zijn ze ook randvoorwaardelijk voor elkaars succes: duurzaam materiaalgebruik is nodig om te kunnen voorzien in de materiaalvraag van de energietransitie, en duurzame energie is nodig om producten en materialen echt duurzaam te kunnen hergebruiken. Circulaire economie kan een bijdrage leveren aan de klimaatopgave, onder meer vanuit het

verminderen van materiaalgebruik en bijbehorende productieprocessen.

Elektriciteitsproductie in het Klimaatakkoord

In de Hoofdpijnen van het Klimaatakkoord is vastgelegd dat er in 2030 minimaal 49 TWh elektriciteit uit wind op zee moet worden geproduceerd. Dat betekent dat in er 2030 circa 1950 turbines op zee moeten staan, uitgaande van turbines van 6 MW. Daarnaast is er een doel van 35 TWh hernieuwbare energie op land, wat door een combinatie van zon en wind zal moeten worden geproduceerd. En dit zijn slechts de tussendoelen: richting 2050 zal de productie nog verder toe moeten nemen.

Aanvullend op dit basisscenario is er mogelijk meer duurzame elektriciteitsproductie nodig. Wanneer er sterker wordt gestuurd op elektrificatie, bijvoorbeeld vanuit de industrie, zal de productie van 84 TWh verder moeten groeien naar 110 TWh. Bij verdere emissiereductie van 49% naar 55% wordt er toegewerkt naar 120 TWh. Hieruit ontstaat een grote behoefte naar kritische metalen.

Transitie-agenda Maakindustrie

In de *Transitieagenda Maakindustrie*⁴, opgesteld naar aanleiding van het Grondstoffenakkoord en het Rijksbrede Programma Circulaire Economie, is de leveringszekerheid van kritieke materialen een van de thema's. De agenda richt zich onder meer op productontwerp, betere recycling en het veranderen van prikkels om de prestaties en levensduur van producten te verbeteren. Op het vlak van kritieke materialen wil de agenda een inschatting maken van de toekomstige

materiaalbehoefte, en een meerjarig programma ontwikkelen voor substitutie van deze materialen. Dit zijn belangrijke stappen in het kader van deze studie.

Bij het inschatten van onze toekomstige materiaalbehoefte is het belangrijk om te beseffen dat wij een importeur zijn van zowel windmolens als zonnepanelen - kritische metalen zijn vaak al verwerkt in deze producten. Wij zijn en blijven afhankelijk van andere landen voor de levering van de onderdelen, ook als we erin zouden slagen om een eigen maakindustrie voor duurzame energietechnologieën op te zetten.



METAALVRAAG VOOR ONZE WINDMOLENS EN ZONNEPANELEN

Zowel windmolens als zonnepanelen zijn opgebouwd uit veel verschillende materialen, waaronder metaal. Dit onderzoek richt zich op drie vragen:

- 1. Metaalvraag:** Hoeveel kritische metalen hebben wij nodig voor onze duurzame elektriciteitsproductie?
- 2. Herkomst:** Waar komen deze kritische metalen vandaan?
- 3. Technologieën:** Welke kritische metalen worden gebruikt in de verschillende zon- en windtechnologieën?

Totale metaalvraag

Voor het realiseren van de gestelde productiecapaciteit in 2030 heeft Nederland zo'n 2,4 tot 3,2 miljoen ton aan metalen nodig. Voor de eindsituatie in 2050 verviervoudigd die behoefte tot zo'n 8,6 - 11,7 miljoen ton. Het overgrote deel hiervan, zo'n 87%, is staal en ijzer voor de funderingen en schachten van windmolens. Daarnaast zijn silicium, koper, lood en zink elementen waar in absolute zin veel vraag naar gaat ontstaan. Van deze metalen is echter voldoende voorraad: we gebruiken deze immers al eeuwenlang in grote hoeveelheden, waardoor er grote voorraden in onze economie aanwezig zijn. Bovendien is de recyclebaarheid van deze metalen hoog.

Kritische metalen

In deze studie richten we ons op de 22 meest voorkomende metalen in windmolens en zonnepanelen. De meeste van deze metalen zijn kritische metalen. De figuren op de volgende pagina's laten vier aspecten van de toepassing van kritische metalen in duurzame elektriciteitsproductie zien:

- Figuur 1 visualiseert de totale jaarlijkse vraag naar deze 22 metalen voor de Nederlandse energietransitie, in vergelijking met de wereldwijde jaarproductie.
- Figuur 2 laat de herkomst van deze metalen zien, waarbij de mijnbouwlocatie in beeld is gebracht (of, in het geval van bijproducten, de locatie van raffinage).
- Figuur 3 brengt de metaalvraag van de verschillende technologieën in beeld.
- Figuur 4 geeft een doorkijk naar de wereldwijde vraag van zes specifieke metalen, die nodig zijn voor zon en PV, vergeleken met de huidige jaarproductie.

Concurrentie met andere toepassingen

De kritische metalen die nodig zijn voor zon en wind, kennen ook andere toepassingen. Neodymium, dysprosium en praseodymium zijn bijvoorbeeld cruciaal in elektrische voertuigen: een technologie waar de komende jaren ook een sterke groei op verwacht wordt. Daarnaast wordt neodymium gebruikt in allerlei elektronica, zoals harde schijven en luidsprekers. Een ander metaal, indium, wordt in de vorm van ITO (Indium Tin Oxide) in zonnecellen gebruikt, maar heeft ook veelgebruikte andere toepassingen zoals beeldschermen en touchscreens.

Deze andere toepassingen zitten niet verwerkt in de berekeningen in dit rapport, terwijl het cruciaal is om ook deze metaalvraag mee te nemen in het bepalen van een jaarlijks budget. Wanneer het gebruik van deze metalen voor andere toepassingen wordt meegenomen, wordt duidelijk dat de beschikbaarheid op termijn nog kritischer wordt. Ter illustratie: de gecombineerde Nederlandse jaarlijkse vraag naar neodymium zou verdubbelen van 2% naar 4% van de wereldwijde

productie wanneer elektrische voertuigen ook zouden zijn meegenomen in de scope van deze studie.

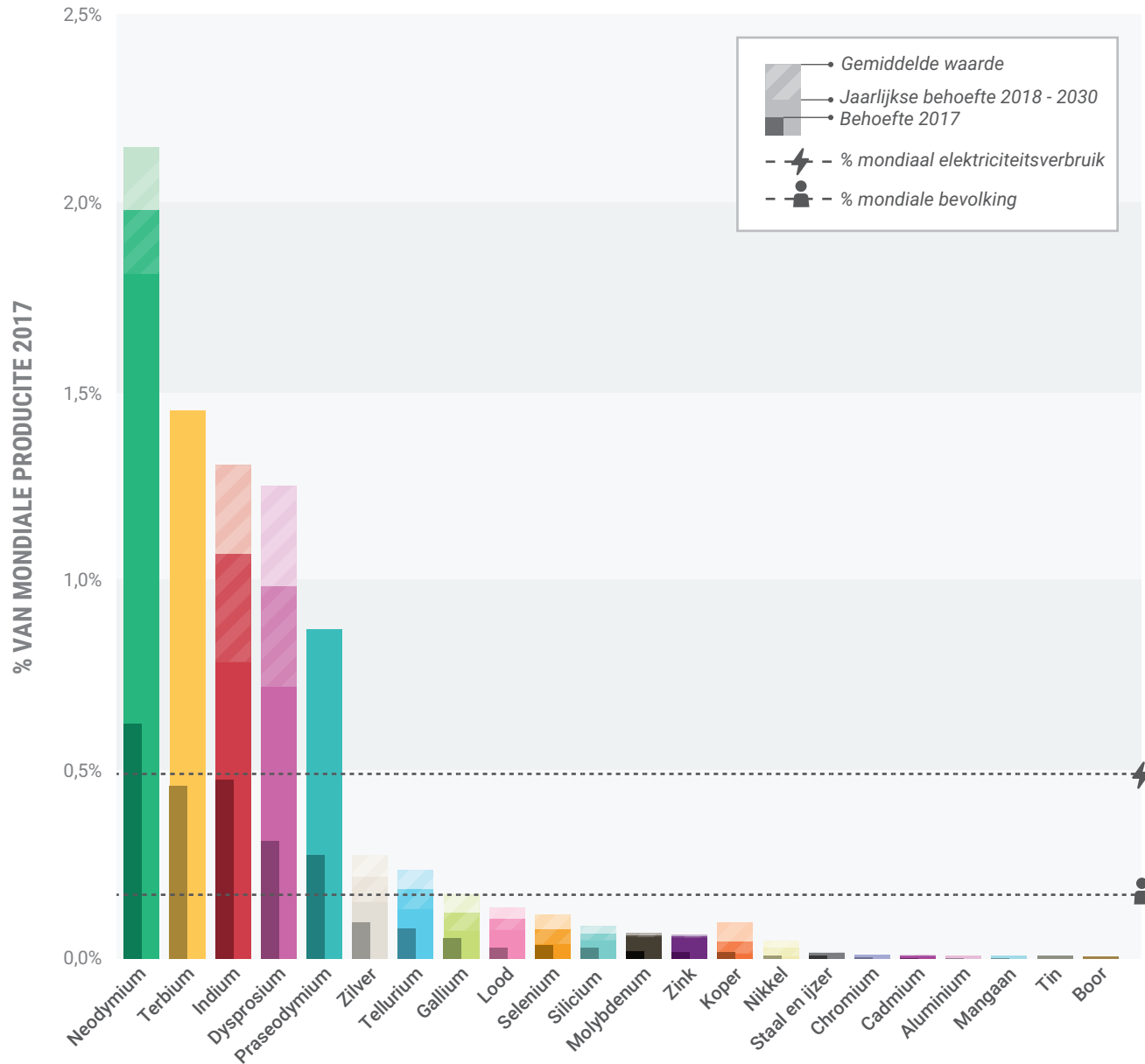
Schaarste zal op termijn leiden tot concurrentie tussen verschillende toepassingen, en daarmee tussen bedrijven en landen. Dit is een serieus risico voor de transitie naar een meer schone en duurzame energievoorziening, zowel binnen Nederland als daarbuiten.

Illustratie: Neodymium in elektrische auto's

Neodymium is een van de metalen waarvan de vraag sterk toe gaat nemen de komende jaren. Het metaal wordt gebruikt in permanente magneten in windmolens, maar is ook belangrijk voor elektrische auto's. Een sterke toename in de vraag naar elektrische auto's kan de neodymium-toevoer voor windmolens beïnvloeden, en vice versa.

Een rekenvoorbeeld: we nemen aan - conservatief - dat we in 2030 zo'n 1,2 miljoen elektrische auto's op de Nederlandse wegen hebben rijden. Dat resulteert in een jaarlijkse vraag naar 100.000 elektrische auto's. Met een neodymiumvraag van 1,46 kilo per auto betekent dat een totale neodymiumvraag van 146 ton per jaar. Samen met de benodigde neodymium voor windmolens betekent dit dat Nederland tot en met 2030 ieder jaar zo'n 4% van de wereldwijde jaarproductie van neodymium nodig heeft voor haar energietransitie.

Buiten neodymium hebben elektrische auto's ook grote hoeveelheden kobalt en lithium nodig. Voor deze twee metalen wordt richting 2050 een toename van de vraag met een factor 25 verwacht⁵.



Metaalvraag van Nederlandse elektriciteitsproductie

Dit diagram laat de jaarlijkse vraag naar metalen voor nieuwe windmolens en zonnepanelen zien, in verhouding met de wereldwijde jaarproductie. De twee lijnen (onze nationale "budgetten") geven aan hoeveel metalen we nodig zouden hebben, kijkend naar:

1. ons elektriciteitsverbruik als deel van het wereldwijde elektriciteitsverbruik (0.49%)
2. onze bevolking als deel van de wereldbevolking (0.23%)

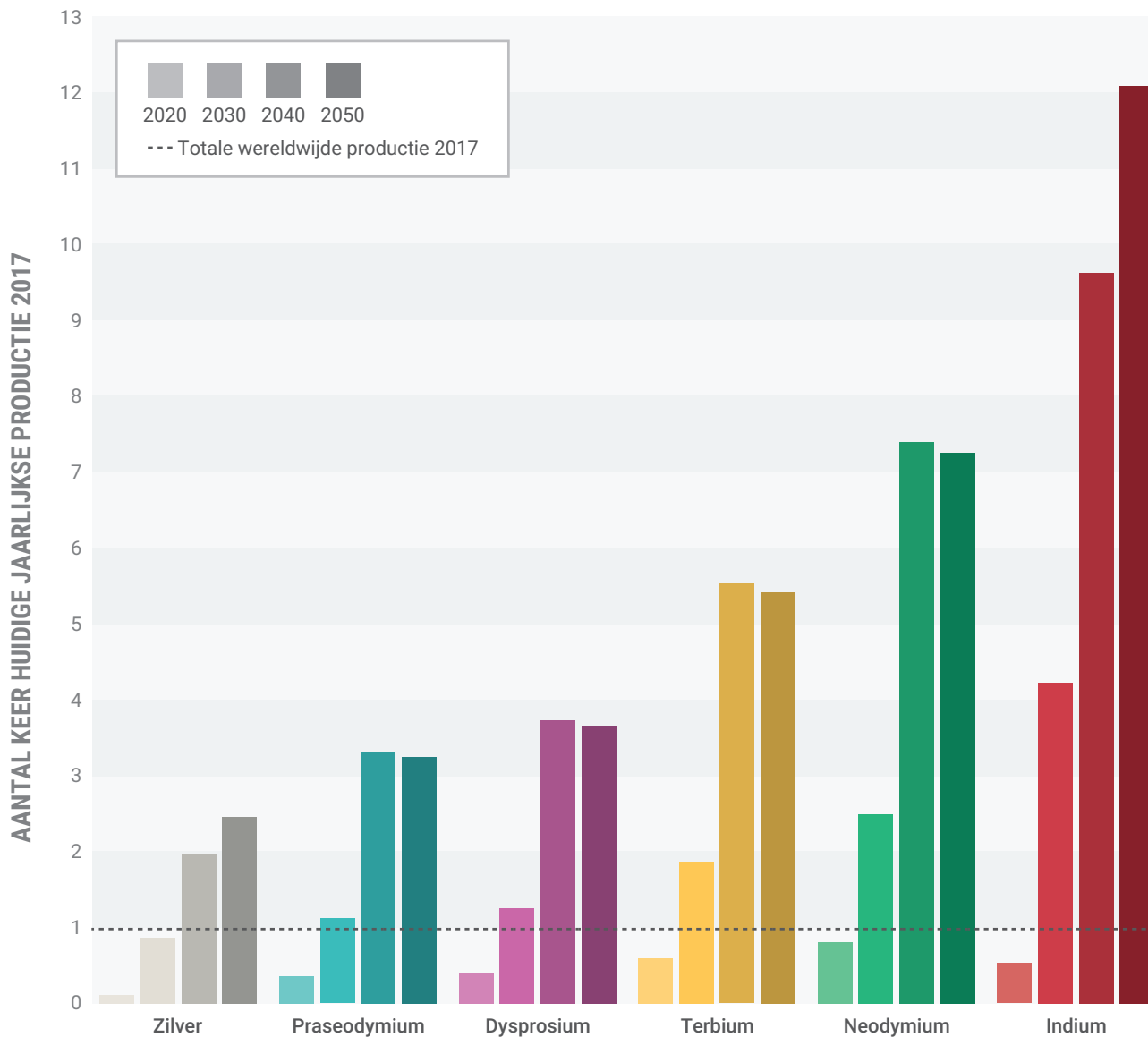
Conclusies

- Van vijf specifieke metalen hebben wij voor onze duurzame elektriciteitsproductie fors meer nodig dan een potentieel nationaal budget: neodymium, terbium, indium, dysprosium en praseodymium.
- Als de rest van de wereld in het Nederlandse tempo productiecapaciteit voor duurzame elektriciteit wil installeren, ontstaat er voor enkele metalen een flink tekort.
- Wanneer we ook andere toepassingen van deze metalen meenemen (zoals elektrische auto's), neemt de Nederlandse vraag nog verder toe.

Methode

Op basis van de doelen voor 2030 is de jaarlijks te installeren capaciteit voor windmolens en zonnepanelen bepaald. De hiervoor benodigde metalen zijn uitgezet tegen de huidige wereldwijde jaarproductie van deze metalen.

Figuur 1: De gemiddelde jaarlijkse Nederlandse metaalvraag voor windmolens en zonnepanelen voor de periode 2018-2030, vergeleken met de wereldwijde productie in 2017.



Wereldwijde vraag naar kritische metalen voor wind en PV

Wanneer we een wereldwijd perspectief kiezen, is ook daar de metaalvraag voor de toekomstige elektriciteitsproductie fors. Deze grafiek laat de jaarlijkse metaalvraag voor wind en PV zien, vergeleken met de jaarlijkse productie. De onderbroken lijn geeft de huidige wereldwijde jaarproductie aan.

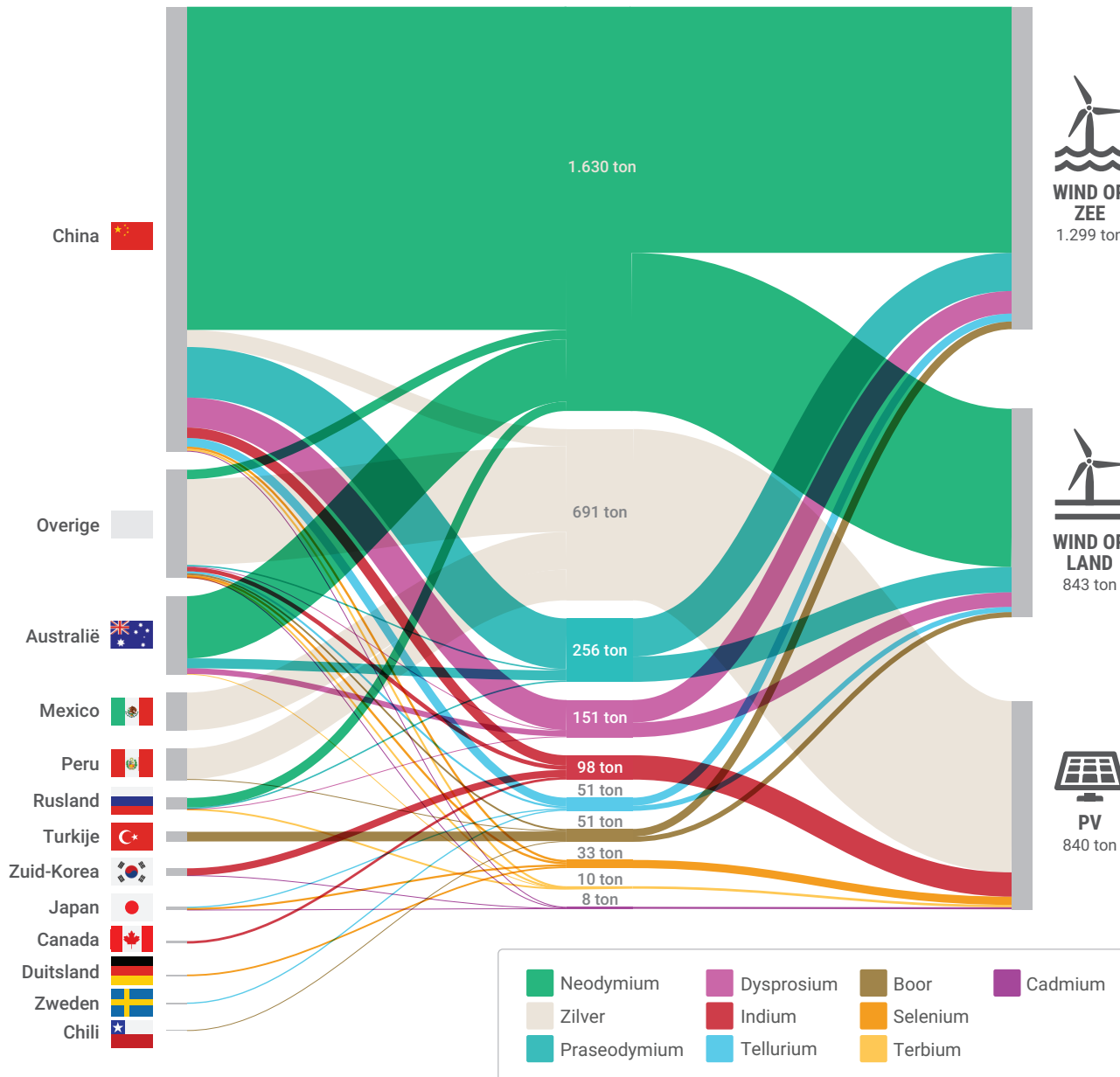
Conclusies

- De toekomstige wereldwijde jaarlijkse vraag naar kritische metalen voor zon en PV is groter dan de toekomstige wereldwijde jaarproductie.
- Een exponentiële groei van duurzame elektriciteitsproductie is op basis van de bestaande technologie en de huidige jaarproductie niet mogelijk. Ter illustratie: in 2050 is er twaalf keer meer indium nodig dan de huidige jaarproductie, uitsluitend voor toepassing in zonnepanelen.
- Om een duurzaam elektriciteitssysteem te realiseren, is het zowel nodig om minder kritische metalen toe te passen, als om de wereldwijde jaarproductie van deze metalen te vergroten.

Methode

De groeicurves van wind en PV zijn gebaseerd op de SR15-modellen van het IPCC, waarbij is uitgegaan van de scenario's die uitkomen op een temperatuurstijging van minder dan twee graden. De verwachte capaciteitsgroei van wind en PV is gebaseerd op een gemiddelde van deze modellen. Vervolgens is de metaalvraag voor die productiecapaciteit bepaald.

Figuur 2: Jaarlijkse wereldwijde metaalvraag voor wind en PV tussen 2020 en 2050, vergeleken met de huidige wereldwijde jaarproductie (2017 = 1).



Herkomst van kritische metalen

Dit diagram laat zien hoeveel kritische metalen er tot 2030 jaarlijks nodig zijn om de doelen uit het Klimaatakkoord te realiseren. De linkerkant van het diagram laat zien waar de verschillende metalen op dit moment gewonnen worden. De rechterkant laat de cumulatieve metaalvraag voor zonnepanelen en windturbines tot en met 2030 zien.

Conclusies

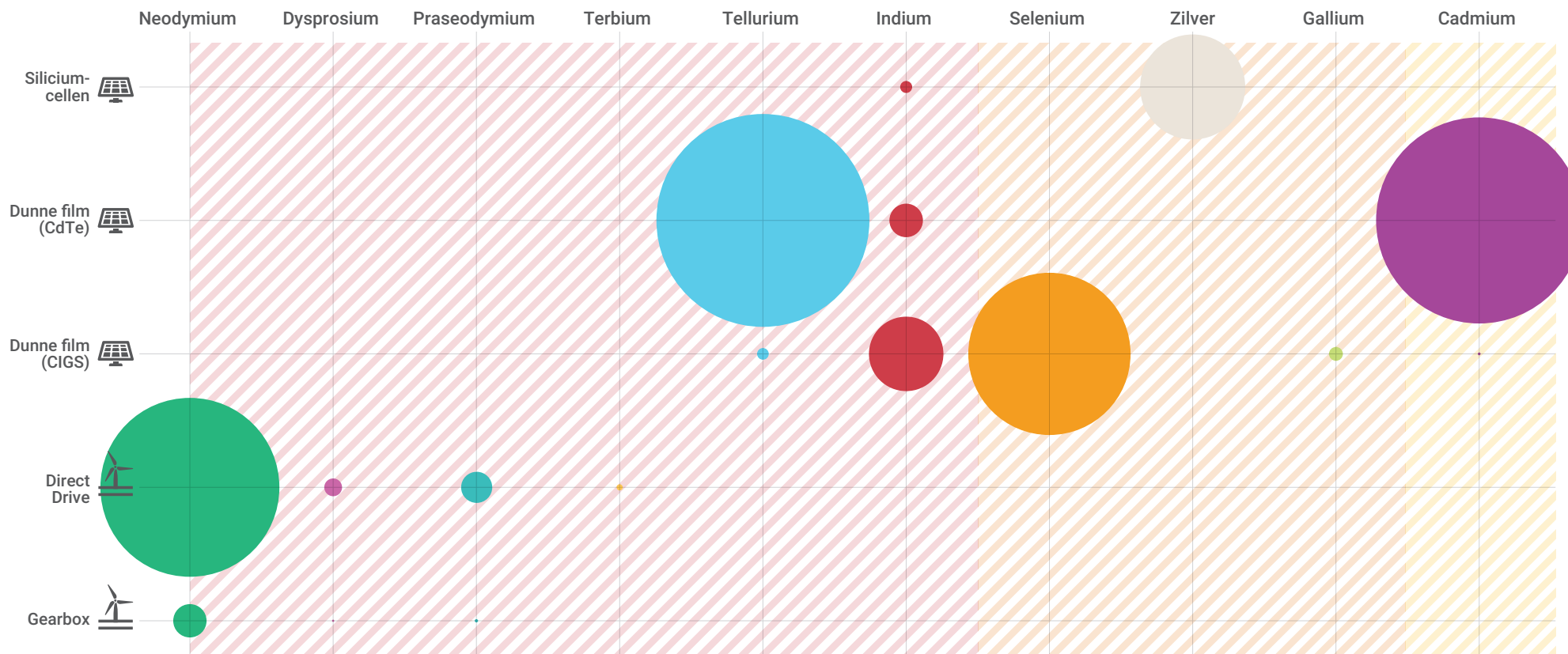
- Voor de levering van verschillende metalen in zonnepanelen en windturbines is Nederland volledig afhankelijk van landen buiten Europa, voornamelijk China.
- Niet alleen bevindt het merendeel van de huidige productie zich in China, het land huisvest ook het grootste deel van de raffinageprocessen.
- Australië en Turkije zijn andere belangrijke landen voor de productie van metalen, vooral voor neodymium (Australië) en boor (Turkije).

Methode

Vanuit de duurzame elektriciteitsproductie in 2030 is de benodigde capaciteit (in GW) bepaald. Die capaciteit is vertaald naar een metaalvraag, waarvan de herkomst is bepaald. De verhoudingen voor de wereldproductie zijn bepaald op basis van de statistieken voor 2017.⁶

Noot: deze figuur laat de mijnbouwlocaties van metalen zien. Voor vier specifieke metalen (indium, cadmium, tellurium en selenium) zijn de raffinagelocaties weergegeven, omdat dit bijproducten zijn van raffinage.

Figuur 3: De cumulatieve vraag van een de meest kritische metalen tot en met 2030, uitgesplitst naar oorsprong (links) per technologiegroep (rechts)



Figuur 4: Metaalvraag van verschillende duurzame elektriciteitstechnologieën (in kg / MWh). De achtergrondkleur toont de jaarlijkse Nederlandse vraag voor zon- en windenergie als percentage van de wereldproductie

>1% van mondiale productie
 >0.20% van mondiale productie
 >0.025% van mondiale productie

Metaalvraag per technologie

Voor elektriciteitsproductie uit zon en wind zijn verschillende technologieën beschikbaar. Iedere technologie heeft een eigen vraag naar kritische metalen. Deze figuur laat zien hoeveel metaal nodig is voor de meest gangbare technologieën.

Conclusies

- Nieuwe technologieën hebben vaak een hogere efficiëntie en zijn goedkoper, maar creëren een hogere vraag naar kritische metalen

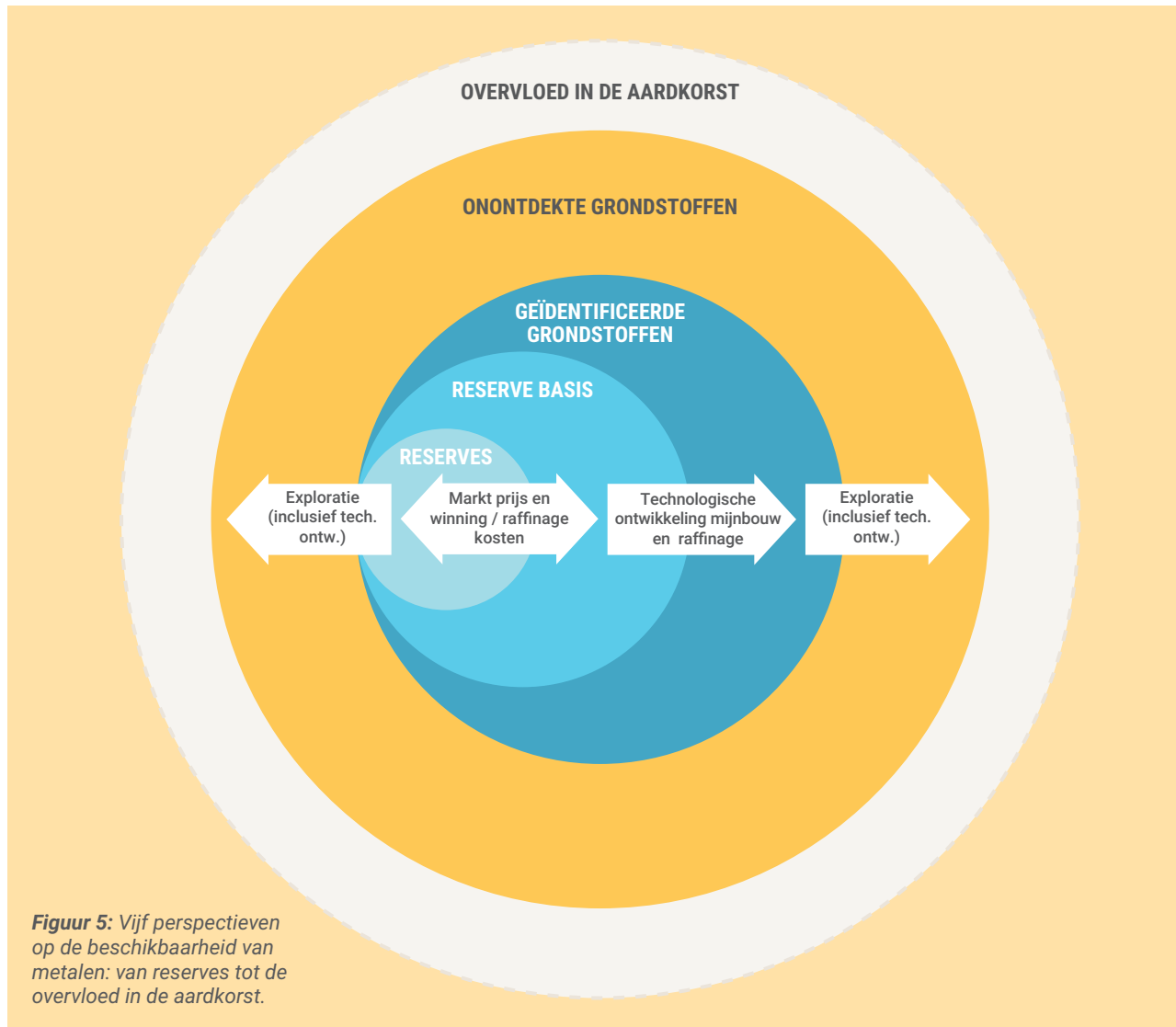
- Dunne film cadmium-tellurium zonnepanelen hebben volgens LCA-studies de beste prestaties op gebied van CO₂-uitstoot en energie-terugverdientijd, maar vragen te grote hoeveelheden tellurium en cadmium voor grootschalige toepassing - tellurium is een van de meest zeldzame metalloïden.
- Direct drive turbines gebruiken grote permanente magneten met veel neodymium en dysprosium, maar zijn vaak goedkoper in hun exploitatie. Turbines met een schakelkast (*gearbox*) hebben een lagere

vraag naar kritische metalen, maar naar verwachting hogere onderhoudskosten omdat zij meer bewegende onderdelen hebben. Turbines met een schakelkast hebben wel een kortere energetische terugverdientijd.

Methode

Voor elke technologie is de gemiddelde metaalvraag berekend op basis van de vollasturen voor de Nederlandse situatie.⁷⁻⁹ Daarbij is uitgegaan van de volledige levensduur van de technologieën.

KRITISCHE METALEN: VIJF PERSPECTIEVEN OP RESERVES



Een van de meest veelgestelde vragen over kritische metalen is: "Hoeveel hebben we nog over?" Een eerste wedervraag zou kunnen zijn: "Hoeveel zit er nog in de aardkorst?" Deze vraag is te beantwoorden, maar het antwoord is in feite niet relevant. Wanneer we bijvoorbeeld willen weten hoeveel koper er nog beschikbaar is voor toekomstige generaties is de relevante vraag: "Hoeveel koper kunnen we nog uit de aardkorst halen?"

De Amerikaanse geoloog Brian Skinner¹¹ merkte op dat bijna alle metalen die in de aardkorst zitten, ingebed zijn in normaal gesteente. In graniet kunnen bijvoorbeeld op atomair niveau enkele granietatomen vervangen zijn door metaal-atomen. De concentratie metalen in de meeste rotsen is erg laag, maar door de enorme hoeveelheid rotsen bevatten deze verreweg de grootste hoeveelheid aan metalen. Commerciële mijnbouw is echter pas interessant als het gesteente een hoge concentratie metalen bevat, vanwege de hoeveelheid energie (en dus kosten) die nodig is om de metalen uit het gesteente te halen. Praktisch gezien kunnen we dus de meeste gesteentes uitsluiten voor het delven van metalen.

Definities van reserves

Als we willen weten hoeveel metalen we daadwerkelijk uit de aardkorst kunnen halen, moeten we ons richten op de metalen in zogenaamde geconcentreerde "ertslichamen". De beschikbare ertsen kunnen op vijf manieren worden ingedeeld:

- **Reserves** zijn de ertsen waarvan we weten dat die onder de huidige marktomstandigheden gewonnen kunnen worden.

- De **reserve basis** kan met bestaande technologieën gedolven worden, maar is op dit moment niet economisch winbaar.
- De **geïdentificeerde grondstoffen** omvat de hoeveelheid grondstoffen waarvan we weten dat die in de aardkorst zit.
- Er zijn naar verwachting **onontdekte grondstoffen**, die nog niet zijn meegenomen in bestaande datasets.
- De **overvloed in de aardkorst** (in het Engels: crustal abundance) omvat al het materiaal van een bepaald element, tot en met de laagst voorstelbare concentratie.

De groottes van deze voorraden kunnen wijzigen als gevolg van veranderende marktcondities, innovatieve mijnbouwtechnieken of aanvullende vondsten. Het is daarom lastig om een eenduidig antwoord te geven op de vraag hoeveel van een bepaald element we uit de aardkorst kunnen halen.

Tijd is de meest schaarse grondstof van allemaal

Het goede nieuws is dat er van de meeste metalen voldoende beschikbaarheid is voor de energietransitie. De meer urgente vraag is of we deze metalen ook kunnen winnen in de korte tijd die er over is voor de energietransitie: zo'n 30 jaar. Het uitbreiden van productie is immers een langzaam proces, omdat het openen van een nieuwe mijn zo'n 10-20 jaar kan duren. Het ligt daarom niet voor de hand dat de metaalproductie de komende jaren gaat kunnen meegroeien met de metaalvraag.

Mijnbouw versus recycling

Op dit moment gaat de mijnbouw van de meeste metalen een exponentiële groei door. Bij het voortzetten van een groeipercentage van 3% zou de mijnbouw van een specifiek metaal iedere 25 jaar verdubbelen. Op lange termijn is dat niet houdbaar.

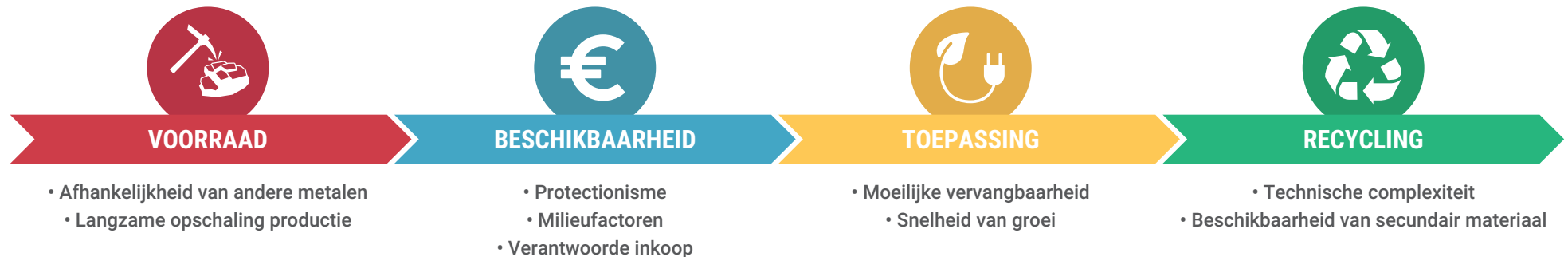
Het verleden laat zien dat de vraag naar nieuwe metalen afvlakt wanneer economieën en toepassingen volwassen worden. Wanneer de metalen in de economie zitten, kan recycling bijna volledig aan de vraag voldoen. Ter illustratie: het ijzergebruik is tussen 1975 en 2000 afgevlakt, na een periode van sterke groei als gevolg van de opbouw van steden en infrastructuur in OECD-landen.

Dit beeld is echter anders voor de meeste kritische metalen (zoals indium en neodymium). Allereerst zit er op dit moment simpelweg nog onvoldoende in onze economieën. Daarnaast liggen recyclingpercentages nog onder de 1%.¹² Om recycling op lange termijn de dominante bron van materialen te maken, zijn veel hoge recyclingpercentages nodig.



KRITISCHE METALEN: EEN COMPLEXE KETEN

De beschikbaarheid en toepassing van kritische metalen gaan gepaard met grote onzekerheden. Er is veel dat we nog niet weten rondom de ontwikkeling van zowel de vraag naar als het aanbod van specifieke kritische metalen. Deze onzekerheid zit in verschillende delen van de keten: de voorraad, de beschikbaarheid, de toepassing en de recycling. Per stap vatten wij de belangrijkste factoren in deze onzekerheid samen.



Onzekerheid in mijnbouwproductie

De voorraad van kritische metalen is niet altijd duidelijk, en hangt af van meerdere factoren:

- **Afhankelijkheid van andere metalen:** Een aantal kritische metalen kunnen alleen worden gewonnen in combinatie met andere, meer reguliere metalen. Zonder de winning van deze reguliere metalen is winning van de kritische metalen economisch niet rendabel. Ter illustratie: tellurium is een bijproduct bij de raffinage van koper, en indium is een bijproduct van de productie van zink.
- **Langzame opschaling productie:** Het openen van een nieuwe mijn duurt zo'n 10 - 20 jaar. Deze tijd is onder meer nodig voor onderzoek, het aanleggen van infrastructuur en het verkrijgen van milieuvergunningen. Als de vraag snel groeit, kan het aanbod dus niet snel meestijgen.



Onzekerheden in beschikbaarheid

De aanwezigheid van winbare reserves van een specifiek metaal, betekent niet direct dat dit metaal vrij beschikbaar is op de wereldmarkt. Er zijn drie belangrijke factoren:

- **Protectionisme:** Producerende landen zijn dominante spelers wanneer het gaat over de beschikbaarheid van kritische metalen. Vooral China heeft haar export verlaagd om meer industrie aan te trekken. Immers: de transformatie van materialen naar producten leidt tot een hogere exportwaarde.
- **Milieufactoren:** Mijnbouw heeft grote milieu-effecten op de gebieden waar dat plaatsvindt. Wettelijke standaarden rondom gezondheid en milieu kunnen de kosten verhogen of mijnbouw zelfs onmogelijk maken, zoals recent gebeurde in de Mountain Pass (Californië).

- **Verantwoorde inkoop:** Een belangrijk aandachtspunt in de keten van kritische metalen is de arbeidsomstandigheden waaronder metalen worden gewonnen. Ketens van een aantal metalen staan bekend om de verplaatsing van hele dorpen of het toepassen van kinder- of gedwongen arbeid.



Onzekerheden in materiaalbehoefte voor toepassing

De behoefte aan vrijwel alle kritische metalen groeit, als gevolg van de brede toepassing in producten die wij dagelijks gebruiken. Deze groei vindt primair plaats in drie typen toepassingen: elektronica (zowel voor consumenten als in de openbare ruimte), militaire toepassing (zowel in technische doorontwikkeling als in aantallen producten) en toepassingen voor een duurzame energievoorziening. Twee factoren bepalen, specifiek voor duurzame energietechnologie, het grootste deel van de onzekerheid:

- **Moelijke vervangbaarheid:** Kritische metalen hebben unieke eigenschappen. Dat maakt dat de meeste kritische metalen lastig te vervangen zijn. Als gevolg van de hoge complexiteit van toepassingen is onderzoek naar vervangbaarheid vaak kostbaar en tijdrovend (in de orde van decennia), waarbij het alternatief waarschijnlijk een ander zeldzaam metaal is.
- **Snelheid van groei:** Het is onduidelijk hoe snel de toepassing van duurzame energietechnologieën gaat groeien in de komende jaren. Bij een snelle groei, wat wenselijk is vanuit het reduceren van CO₂-emissies, is de kans groot dat de productiecapaciteit van mijnen en raffinage de groeiende metaalvraag niet bij kan houden.



Onzekerheden in recyclebaarheid

Recycling van kritische metalen lijkt de oplossing om de beschikbare voorraad aan te vullen en te voldoen aan de groeiende behoefte. Er zijn twee belangrijke factoren die de onzekerheden van recycling bepalen:

- **Technische complexiteit:** Het recyclen van kritische metalen is technisch complex. Materialen zijn vaak op een onlosmaakbare manier aan elkaar verbonden, en vermengd met andere materialen om de juiste eigenschappen te creëren. Ter illustratie: het Belgische Umicore, een wereldwijde koploper in recycling, slaagt er bij een telefoon in om slechts 8 van de 25 kritische metalen terug te winnen voor hergebruik. De andere materialen gaan verloren in dat recyclingproces.
- **Beschikbaarheid van secundair materiaal:** De komende 20 jaar overstijgt de materiaalvraag van nieuwe windmolens en zonnepanelen het aanbod uit recycling: er is simpelweg nog niet voldoende materiaal beschikbaar om te gaan recyclen. Daarom blijft er voorlopig nieuw materiaal nodig, zelfs wanneer er meer beschikbaar komt uit recycling.



INZICHTEN

De gevolgen van de toepassing van kritische metalen zijn complex. Wij hebben vier inzichten in kaart gebracht, die belangrijk zijn om mee te nemen in beleid en besluitvorming.

1. Gebruik van kritische metalen bespaart energie

Het gebruik van kritische metalen en de energietransitie zijn nauwer verbonden dan het op het eerste oog lijkt. De crux: de toepassing van kritische metalen verhoogt de efficiëntie van producten, en bespaart daarmee energie. Voorbeelden zijn overal om ons heen te vinden:

- Het gebruik van neodymium en dysprosium in permanente magneten van windmolens maakt generatoren efficiënter, omdat er geen elektriciteit nodig is om een magnetisch veld op te wekken.
- De toevoeging van niobium versterkt staal, waardoor minder staal nodig is voor dezelfde draagkracht. Omdat er vervolgens minder staal geproduceerd hoeft te worden, wordt er minder energie verbruikt in staalproductie.
- De toepassing van indium, gallium en selenium is nodig om LED-lampen te laten werken, die weer zorgen voor een lager energieverbruik reguliere gloei- of spaarlampen.

Wanneer we sturen op het reduceren van CO₂-emissies, lijkt de toepassing van kritische metalen verstandig: we besparen zowel energie als materiaal in de productiefase, en energie in de gebruiksfase. Echter, wanneer we onze geopolitieke afhankelijkheid van kritische metalen willen beperken, zullen we waarschijnlijk meer energie-intensieve producten nodig gaan hebben.

2. Beperkte beschikbaarheid en één dominante speler beperken de vrije markt

Op dit moment lijken de voorraden kritische metalen relatief goed aan de vraag te kunnen voldoen. De belemmering zit niet zo zeer in de *hoeveelheid* die er van een metaal gewonnen kan worden, maar in de jaarlijkse *productie* van dat metaal. Het snel kunnen opschalen van productie bij een stijgende vraag gaat hier dus niet op.

China is op dit moment wereldwijd de dominante speler in de productie van kritische metalen – en die dominantie groeit. Het land heeft de afgelopen jaren structureel de economische waarde van deze metalen vergroot: eerst heeft zij de winning van deze grondstoffen opgebouwd, en vervolgens de productie van de metalen uit deze grondstoffen geïnternaliseerd. Nu bouwt het land haar productie van componenten en producten, waarin kritische metalen zitten verwerkt, verder uit.

In de komende jaren gaat niet alleen in Europa, maar ook in andere delen van de wereld de behoefte naar fossielvrije elektriciteitsproductie stijgen. Als gevolg daarvan stijgt ook de vraag naar kritische metalen. Dit zet de beschikbaarheid onder druk. De belangrijke vraag is of wij de kritische metalen krijgen die wij nodig hebben, wanneer de vraag groter is dan de beschikbaarheid, en één dominante speler bepaalt aan wie hij zijn producten verkoopt.

3. Recycling is een lange-termijn strategie, geen korte-termijn oplossing

Recycling kan een flinke bijdrage leveren aan het beperken van de vraag naar nieuwe kritische metalen. Dit kan echter alleen wanneer de totale behoefte niet groeit, en wanneer de levensduur van producten relatief beperkt is.

In het geval van duurzame elektriciteitsproductie wordt aan geen van beide factoren voldaan: de markt moet snel groeien om de wereldwijde temperatuurstijging te beperken tot 1,5 graden, en de levensduur van zowel zonnepanelen als windmolens is relatief lang (rond de 25 jaar).

Dit betekent dat recycling alleen een bijdrage kan leveren om in de toekomst materialen uit de 'bestaande voorraad' te behouden. Er blijft dus voor de komende decennia een enorme vraag naar nieuwe, kritische metalen. Bij het maken van zonnepanelen en windmolens is het daarom belangrijk om circulaire ontwerpprincipes toe te passen, om te borgen dat deze materialen aan het einde van de levensduur kunnen worden hergebruikt.

4. Onze afhankelijkheid neemt ieder jaar verder toe

Het verbruik van kritische metalen blijft razendsnel groeien. Dit is het beste zichtbaar in consumentenelektronica, maar geldt ook voor technische apparatuur en militaire toepassingen. De groei van de wereldwijde middenklasse van 1 miljard naar 3 miljard mensen gaat deze groei alleen maar verder versnellen. Dat maakt dat we voorlopig afhankelijk blijven van de winning van nieuwe kritische metalen.

Daarnaast worden over de hele wereld nieuwe technologieën ontwikkeld, die uniek zijn in hun functionaliteit. Het feit dat de meeste van deze nieuwe technologieën ook kritische metalen bevatten, wordt vaak nauwelijks meegenomen. Daardoor creëren we nieuwe afhankelijkheden, en nemen risico's rondom leveringszekerheid in de toekomst verder toe.

OPLOSSINGSRICHTINGEN

Kritische metalen lijken onmisbaar voor de energietransitie. Zorgen voor een toereikend aanbod van deze metalen voor Nederland is echter complex. Noch technisch, noch geopolitiek is er een eenvoudige oplossing. Toch zijn er drie oplossingsrichtingen waarmee we onze beschikbaarheid van kritische metalen kunnen verhogen, en daarmee onze afhankelijkheid van andere landen kunnen beperken.

1. Beperk vraag naar kritische metalen door substitutie

Als een tekort van een specifiek metaal leidt tot een prijstoenname, worden producten opnieuw ontworpen om minder van deze metalen te gebruiken of om deze metalen in zijn geheel niet meer te gebruiken. Dit proces heet substitutie.

De prijspijs van neodymium in 2010 geeft een beeld van de substitutiemogelijkheden voor duurzame energietechnologieën. Voor deze prijspijs gingen onderzoekers ervan uit dat vervanging van neodymium in magneten lastig was.¹³ Nadat de prijs piekte, vonden producenten verschillende manieren om hun neodymiumverbruik te verminderen, of het volledig te vervangen: 20-50% van de neodymium-magneten is vervangen door andere technologieën.¹⁴ Deze vervanging vindt ook plaats bij windmolens: Enercon heeft bijvoorbeeld een Direct drive mechanisme ontwikkeld zonder neodymium, en produceren als Vestas en Gamesa hebben hybride generatoren ontwikkeld met veel kleinere permanente magneten gekoppeld aan traditionele schakelkasten.

Naast het volledig vervangen van permanente magneten, zijn er andere mogelijkheden om minder

kritische metalen te gebruiken, onder meer door andere fabricageprocessen van legeringen. Ter illustratie: Siemens heeft een systeem ontworpen om permanente magneten in een turbine te koelen, waardoor het percentage kritische metalen kon dalen van 4,5% tot 3%.¹⁵

Ondanks dat substitutie een veelbelovende oplossing lijkt, zijn er grenzen. Een andere technologie kan wellicht leiden tot het voorkomen van neodymium, maar leidt vaak tot suboptimale prestaties. Het verbeteren van de eigenschappen van legeringen om de toepassing van kritische metalen te verminderen, leidt tot minder suboptimale prestaties, maar lijkt de vraag met niet meer dan 50% te kunnen terugbrengen.^{14,15}

Tot slot, en wellicht het meest belangrijk, is dat substitutie de metaalvraag als geheel niet vermindert, maar verschuift naar een ander materiaal. Als de totale metaalvraag groot genoeg is - wat waarschijnlijk lijkt in de wereldwijde energietransitie - dan worden verschillende materialen tegelijkertijd schaars, wat zou kunnen leiden tot een nog grotere uitdaging.

2. Pas circulaire ontwerpprincipes toe bij windmolens en zonnepanelen

Door de inzet op circulaire ontwerpprincipes kan de levensduur van windmolens en zonnepanelen worden geoptimaliseerd en kunnen componenten (en metalen) hoogwaardig worden hergebruikt.

Het eerste principe van circulair ontwerp is het maken van producten met een lange levensduur: wanneer windturbines en zonnepanelen langer mee gaan, neemt de behoefte aan nieuwe metalen af. Het tweede principe

is modulair ontwerp, waardoor componenten eenvoudig kunnen worden gescheiden. Modulair ontwerp maakt aanpassingen en reparaties eenvoudiger, en maakt ook hoogwaardig hergebruik mogelijk omdat componenten aan het einde van hun functionele levensduur kunnen worden opgeknapt en hergebruikt. Laagwaardige recycling, waarbij een deel van de metalen verloren gaat, is dan niet nodig.

Voor windturbines, vooral op zee, lijkt het belangrijk om vooral te richten op het verlengen van de levensduur: omdat de windmolens stroom blijven produceren, ontstaat er geen nieuwe metaalvraag. Voor zonnepanelen lijkt een focus op modulair ontwerp relevanter: met de huidige technologieën kunnen de meeste materialen nauwelijks van elkaar worden gescheiden en daardoor niet worden hergebruikt. Recycling gaat in dat geval gepaard met forse materiaalverliezen. Het verhogen van de zuiverheid van herwonnen materialen en het verlagen van het benodigde energieverbruik zijn belangrijke aandachtspunten voor de komende jaren.

Het hergebruik van kritische metalen bevindt zich nog in een ontdekkingsfase. Hoogwaardig hergebruik kan op lange termijn sterk bijdragen aan verminderde afhankelijkheid van nieuwe grondstoffen: de windmolens en zonnepanelen die nu worden neergezet, leveren de materialen van de toekomst.

3. Overweeg een Europese mijnbouwindustrie

In een wereld met een toenemende honger naar grondstoffen is internationale competitie rondom deze grondstoffen niet te voorkomen. Het is daarom belangrijk om nu al na te denken over toekomstige leveringszekerheid. Vanuit dat perspectief is het goed

om te beseffen dat Europa op dit moment voor het overgrote deel van haar metaalvraag afhankelijk is van import. Een interessante vraag is of Europa weer eigen mijnbouw- en raffinageactiviteiten kan ontwikkelen, om haar toekomstige leveringszekerheid te vergroten.

Wanneer we in de toekomst een groot deel van onze grondstoffen uit Europa willen laten komen, is het nodig om de factoren aan te pakken die mijnbouw hebben laten verdwijnen: de kosten moeten omlaag, en mijnbouw moet plaatsvinden binnen heldere milieugrenzen. Daarvoor zijn de condities in Europa niet optimaal: de reserves zijn relatief beperkt, het grootste deel van Europa is dicht bevolkt, publieke acceptatie is laag en arbeid relatief duur. Een van de weinige voordelen van Europa is de sterke high-tech-industrie, die ook mijnbouwmaterieel produceert.

De Europese mijnbouwindustrie ziet een toekomst voor zich met een combinatie van op afstand bestuurd en autonome robots die de ondergrondse mijnbouw uitvoeren, waarbij menselijke arbeid tot een minimum wordt beperkt. Voorlopig spreekt dit echter tot de verbeelding, in ieder geval voor de komende drie decennia waarin we voldoende materialen voor de energietransitie zullen moeten winnen.

Ondanks het feit dat kritische metalen in Europa nauwelijks gewonnen kunnen worden, liggen er enkele reserves op het continent, vooral in Groenland en Zweden. Het gebied Kvanefjeld (Groenland) zou jaarlijks 31.000 ton zeldzame aardoxiden (REO) kunnen leveren, voor een periode van ruim 33 jaar. Ter vergelijking: de huidige jaarlijkse wereldwijde REO-winning is 130.000 ton. Deze mijn bevat voornamelijk lichte zeldzame aardmetalen (LREE), zoals Neodymium, maar waarschijnlijk ook Uranium en Zink. Nora Kärr (Zweden) zou jaarlijks 6800 ton REO kunnen leveren, waarvan 3600 ton zware zeldzame aardmetalen (HREE). Deze mijn kan mogelijk tot 15% van de jaarlijkse globale hoeveelheid Dysprosium gaan produceren¹⁶.

Deze mijnen bevinden zich op dit moment in de ontwikkelingsfase: het kan daarom nog enkele jaren duren voordat deze mijnen in productie zijn. Daarbij is het belangrijk om de grondstoffen niet alleen te delven, maar ook een industrie te ontwikkelen om deze grondstoffen te zuiveren en te verwerken tot metalen: ook dat gebeurt op dit moment voor het overgrote deel in China.





Om de doelstellingen voor duurzame elektriciteitsproductie uit het Klimaatakkoord waar te maken, hebben we voor vijf kritische metalen een flink percentage van de huidige wereldwijde jaarproductie nodig. Het feit dat de verwachte wereldwijde vraag naar deze metalen het aanbod overstijgt, maakt onze energietransitie kwetsbaar. Terwijl we bezig zijn met het afbouwen van onze afhankelijkheid van Arabische en Russische olie, creëren we tegelijkertijd een nieuwe afhankelijkheid: van (Chinese) metalen.

Met die afhankelijkheid ontstaat een risico op toekomstige conflicten, die voortkomen uit schaarste van deze metalen. Dat risico neemt verder toe wanneer ook andere niet-Europese landen in gaan zetten op een duurzame elektriciteitsproductie vanuit zon en wind. Omdat we nog in een vroege fase van de energietransitie zitten, kunnen we nu nog stappen zetten om onze afhankelijkheid te beperken.

Rondom kritische metalen is er vooral nog veel dat we niet weten. Door actief in te zetten op technisch onderzoek op dit vlak, kan Europa zich gaan onderscheiden. Daaruit kunnen nieuwe economische activiteiten voortkomen, waarbij Europa de leiding neemt in het opzetten van een circulaire economie voor kritische metalen.

AANPAK

Voor dit onderzoek zijn een aantal aannames gedaan en berekeningen gemaakt. Dit hoofdstuk licht de gezette stappen toe vanuit vier onderwerpen:

- Toekomstige productiecapaciteit duurzame elektriciteit
- Technologiemix zon en wind
- Kritische metaalvraag per technologie
- Huidige productie van kritische metalen

Tot slot worden de gebruikte definities toegelicht.

Toekomstige productiecapaciteit duurzame elektriciteit

Voor de toekomstige productiecapaciteit van duurzame elektriciteit zijn we uitgegaan van de doelstellingen uit de Hoofdlijnen voor het Klimaatakkoord: 49 TWh wind op zee, en 35 TWh hernieuwbaar op land - een combinatie van wind en zon.

Op basis van Nederlandse gegevens over vollasturen (het aantal uur dat een energiebron op vol vermogen energie heeft geleverd) zijn de doelstellingen omgezet naar benodigde productiecapaciteit:

- 4.200 vollasturen voor off-shore wind⁷
- 2.500 vollasturen voor on-shore wind⁸
- 875 vollasturen voor PV⁹

De benodigde capaciteit voor 2030 is bepaald op basis van de benodigde elektriciteitsproductie en de vollasturen. Daarbij gaan we uit van een lineaire groei in de installatie van deze capaciteit van 2018 tot

2030. Startpunt bij die berekening is de geïnstalleerde capaciteit eind 2017.¹⁷ De totale jaarlijkse capaciteit per jaar is opgenomen in tabel 1.

	2017	2030	2050
Wind op zee	1	11.7	28.2
Wind op land	3.2	7.2	16.8
PV	2	19.5	48.0

Tabel 1. Aannames geïnstalleerde capaciteit in GW wind en PV in Nederland, vergeleken met de geïnstalleerde capaciteit in 2017

Zowel voor zonnepanelen als voor windmolens wordt hierbij uitgegaan van een levensduur van 25 jaar. Dit komt overeen met bestaande contracten voor wind op zee, en ervaringen met de levensduur van zonnepanelen. Het vervangen van bestaande capaciteit na de periode van 25 jaar is ook meegenomen - dat wil zeggen: als er in 2030 1.3 GW PV wordt geïnstalleerd, moet dat ook in 2045 weer worden geïnstalleerd, aanvullend op de reeds geplande capaciteit voor dat jaar. Deze vervanging zal naar verwachting pas tegen 2050 grootschalig onderdeel van de vraag worden.

Technologiemix

Voor zowel wind als voor zon zijn er verschillende technologieën beschikbaar, met ieder een eigen metaalbehoefte per GW. Omdat de toekomstige technologiemix lastig te voorspellen is, is hiervoor een scenario gemaakt. Dit scenario is gebaseerd op een

Duitse studie¹⁸ en een Europese studie door het Joint Research Centre.¹⁹ De technologiemix die voor deze studie is gekozen, is opgenomen in tabel 2.

PV		WIND OP ZEE			WIND OP LAND	
C-Si	CdTe	CIGS	PM-DD	PM-Gearbox	PM-DD	PM-Gearbox
90%	5%	5%	30%	70%	45%	55%

Tabel 2: Scenario voor toekomstige technologiemix, waarbij de percentages de verhouding tussen de verschillende technologieën aangeven.

Dat voorspellen van de technologiemix lastig is, is bijvoorbeeld terug te zien bij windturbines: zowel de gearbox (GB) als de Direct Drive (DD) hebben sterke en zwakke punten.²⁰

- DD generatoren zijn waarschijnlijk betrouwbaarder en hebben minder onderhoud nodig hebben, maar dit is nog niet bewezen.
- Gearbox generatoren zijn efficiënter dan DD generatoren en zijn daarom uitvoeriger onderzocht en geoptimaliseerd.
- Het verschil in efficiëntie bij verschillende windsnelheden is klein en daarom niet doorslaggevend voor het bepalen van een toekomstige verhouding tussen de verschillende technologieën.

Metaalbehoefte per technologie

Voor het berekenen van de materiaalbehoefte is er een literatuurstudie gedaan naar de metaalbehoefte per GW. Hierbij is gebruik gemaakt van verschillende onderzoeken.^{17,18,20-33} Op basis van de waarden uit deze onderzoeken is een lage, een hoge en een gemiddelde waarde berekend. In de resultaten wordt uitgegaan van de gemiddelde waarde, waarbij de marges zijn aangegeven. In het onderzoek zijn 22 verschillende metalen meegenomen.

Huidige productie kritische metalen

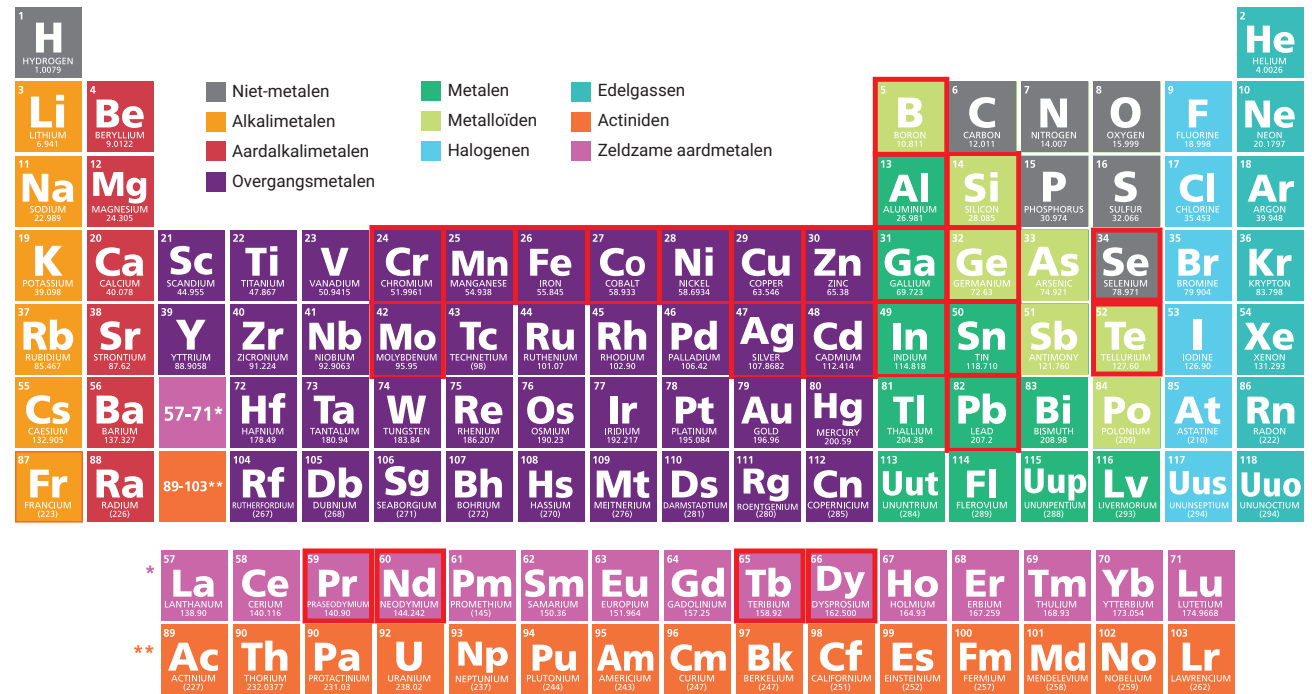
Voor de productie van metalen baseren we ons op de rapporten van het United States Geological Survey (USGS). Voor een aantal kritische metalen is onderzoek van Månberger & Stenqvist (2018)²⁰ gebruikt.

Definities

Metalen worden in veel categorieën ingedeeld: voornamelijk op basis van chemische eigenschappen, maar ook op prijs en veelvoorkomendheid. In dit onderzoek kiezen we voor de term kritische metalen (niet te verwarren met zeldzame aardmetalen): dit is geen groep op zich, maar een verzamelnaam van de lastig vindbare of winbare metalen.³⁴ In figuur 6, wordt aangegeven welke metalen zijn onderzocht en de groep waarin ze toebehoren.

Zeldzame aarden ("Rare Earth Elements" (REE))

De term 'rare earth elements' wordt gebruikt als verzamelnaam voor een aantal elementen met gelijksoortige eigenschappen (roze in de tabel hierboven). Deze categorie omvat zowel de 'lichte' REE's (LREE) als de 'zware' REE's (HREE). De elementen worden gewonnen in een geoxideerde vorm, en heten bij hun winning 'rare earth oxides' (REO). Tijdens het raffinageproces worden deze elementen omgezet in hun pure vorm: een metaal. In dit rapport wordt geen onderscheid gemaakt tussen LREE's en HREE's.



Figuur 6: Periodiek systeem der elementen, waarbij de rode omlijsting geeft weer welke elementen zijn meegenomen in de studie.

Minor metals

De term 'minor metals' (geen Nederlandse vertaling beschikbaar) refereert naar metalen die worden geproduceerd als bijproduct van een raffinageproces van basismetalen. Voorbeelden hiervan zijn indium en tellurium. Omdat deze metalen een bijproduct zijn, is het vaak lastig om de productie van deze metalen significant toe te laten nemen. Daarom is de kans groot dat bij deze metalen een tekort kan ontstaan bij een snelgroeiende vraag.³⁵

Metalloïdes

Metalloïde zijn metaalachtige elementen die tussen metaal en non-metaal inzitten. De precieze grens is niet vastgelegd, maar elementen die meestal worden geaccepteerd als metalloïde zijn:

Boor (B), Silicium (Si), Germanium (Ge), Arseen (As), Antimoon (Sb) en Tellurium (Te). Selenium (Se) en Polonium (Po) worden minder vaak gezien als onderdeel van deze groep.

REFERENTIES

1. **Sociaal Economische Raad.** Voorstel voor hoofdlijnen van het Klimaatakkoord. (2018).
2. **Kleijn, R.** Materials and energy: a story of linkages. (Leiden University, 2012).
3. **Rijksoverheid.** Nederland circulair in 2050. (2016).
4. **Rijksoverheid.** Transitie-agenda Maakindustrie. (2018).
5. **Deetman, S., Pauliuk, S., van Vuuren, D. P., van der Voet, E. & Tukker, A.** Scenarios for Demand Growth of Metals in Electricity Generation Technologies, Cars, and Electronic Appliances. *Environ. Sci. Technol.* 52, 4950–4959 (2018).
6. **USGS.** Mineral Commodity Summaries. Highlights of Spanish Astrophysics IV - Proceedings of the 7th Scientific Meeting of the Spanish Astronomical Society, SEA 2006 (2017). doi:10.1007/978-1-4020-6000-7-35
7. **ECN.** Kosten wind op zee 2015. (2015).
8. **CE Delft & ECN.** MKEA zon-PV en wind op land. (2016).
9. **RVO.** Opbrengs van zonnestroomsystemen in Nederland. (2014).
10. **Huppmann, D. e.a.** IAMC 1.5°C Scenario Explorer and Data hosted by IIASA. (2018). doi:10.22022/SR15/08-2018.15429
11. **Skinner, B. J.** Exploring the Resource Base. in *The Long-Run Availability of Minerals 25* (RFF, 2001).
12. **Reck, B. K. & Graedel, T. E.** Challenges in Metal Recycling. *Science* (80-.). 337, 690–695 (2012).
13. **Nassar, N. T.** Limitations to elemental substitution as exemplified by the platinum-group metals. *Green Chem.* 17, 2226–2235 (2015).
14. **Sprecher, B.** When materials become critical : lessons from the 2010 rare earth crisis. (Leiden University, 2016).
15. **Smith, B. J. & Eggert, R. G.** Costs, Substitution, and Material Use: The Case of Rare Earth Magnets. *Environ. Sci. Technol.* 52, 3803–3811 (2018).
16. **Leading Edge Materials. Norra Karr REE Project.** (2015). bij <<https://leadingedgematerials.com/norra-karr/>>
17. **Centraal Bureau voor Statistiek.** Meer stroom uit wind en zon. (2018). bij <<https://www.cbs.nl/nl-nl/nieuws/2018/09/meer-stroom-uit-wind-en-zon>>
18. **Viebahn, P. e.a.** Assessing the need for critical minerals to shift the German energy system towards a high proportion of renewables. *Renew. Sustain. Energy Rev.* 49, 655–671 (2015).
19. **Moss, R. L., Tzimas, E., Kara, H., Willis, P. & Kooroshy, J.** Critical Metals in Strategic Energy Technologies. JRC-scientific and strategic reports, European Commission Joint Research Centre Institute for Energy and Transport (2011). doi:10.2790/35600
20. **Polinder, H. e.a.** Trends in wind turbine generator systems. *IEEE J. Emerg. Sel. Top. Power Electron.* 1, 174–185 (2013).
21. **Davidsson, S. & Höök, M.** Material requirements and availability for multi-terawatt deployment of photovoltaics. *Energy Policy* 108, 574–582 (2017).
22. **Månberger, A. & Stenqvist, B.** Global metal flows in the renewable energy transition: Exploring the effects of substitutes, technological mix and development. *Energy Policy* 119, 226–241 (2018).
23. **Fthenakis, V. & Zweibel, K.** CdTe PV: Real and Perceived EHS Risks. *Natl. Cent. Photovoltaics Sol. Progr. Rev. Meet.* 1–3 (2003).
24. **Burton, M.** China push into solar, wind power to heat up global copper markets. *Reuters* (2015).
25. **Janssen, L. G. J. e.a.** Scientific Assessment in support of the Materials Roadmap enabling Low Carbon Energy Technologies. Wind Energy. Publications Office of the European Union (2012). doi:10.2790/42568
26. **Viebahn, P. e.a.** Kritische mineralische Ressourcen und Stoffströme bei der Transformation des deutschen Energieversorgungssystems. (2014).
27. **Elshkaki, A. & Graedel, T. E.** Dynamic analysis of the global metals flows and stocks in electricity generation technologies. *J. Clean. Prod.* 59, 260–273 (2013).
28. **Kleijn, R., van der Voet, E., Kramer, G. J., van Oers, L. & van der Giesen, C.** Metal requirements of low-carbon power generation. *Energy* 36, 5640–5648 (2011).
29. **Woodhouse, M. e.a.** Perspectives on the pathways for cadmium telluride photovoltaic module manufacturers to address expected increases in the price for tellurium. *Sol. Energy Mater. Sol. Cells* 115, 199–212 (2013).
30. **Stamp, A., Wäger, P. A. & Hellweg, S.** Linking energy scenarios with metal demand modeling—The case of indium in CIGS solar cells. *Resour. Conserv. Recycl.* 93, 156–167 (2014).
31. **Blagoeva, D. T., Alves Dias, P., Marmier, A. & Pavel, C. C.** Assessment of potential bottlenecks along the materials supply chain for the future deployment of low-carbon energy and transport technologies in the EU. (2016). doi:10.2790/08169
32. **World Bank Group & EGPS.** The growing role of minerals and metals for a low carbon future. (2017).
33. **Kavлак, G., McNerney, J., Jaffe, R. L. & Trancik, J. E.** Metal production requirements for rapid photovoltaics deployment. *Energy Environ. Sci.* 8, 1651–1659 (2015).
34. **European Commission.** Critical raw materials for the EU. (2010).
35. **Sprecher, B., Reemeyer, L., Alonso, E., Kuipers, K. & Graedel, T. E.** How “black swan” disruptions impact minor metals. *Resour. Policy* 54, 88–96 (2017).



Universiteit
Leiden

Copper8

